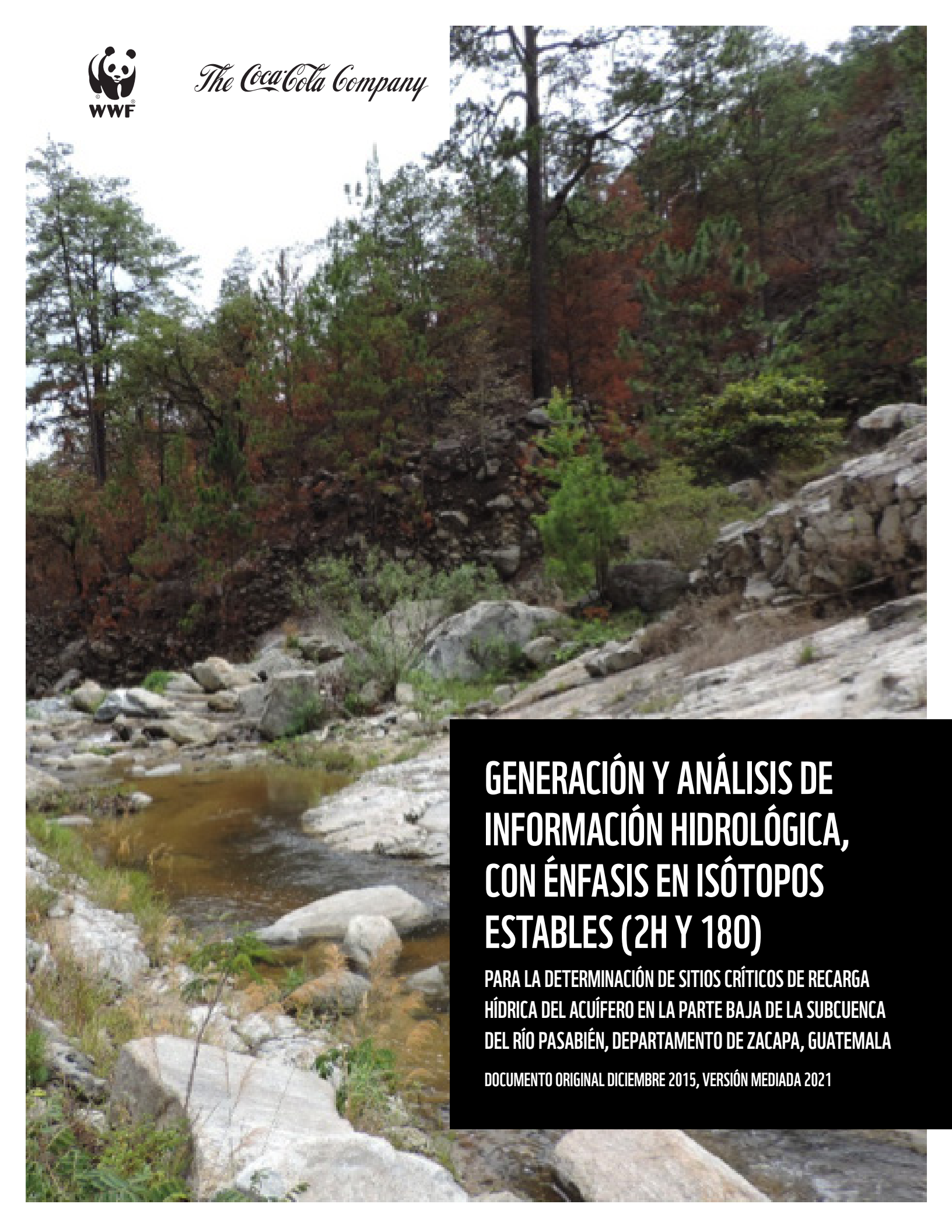




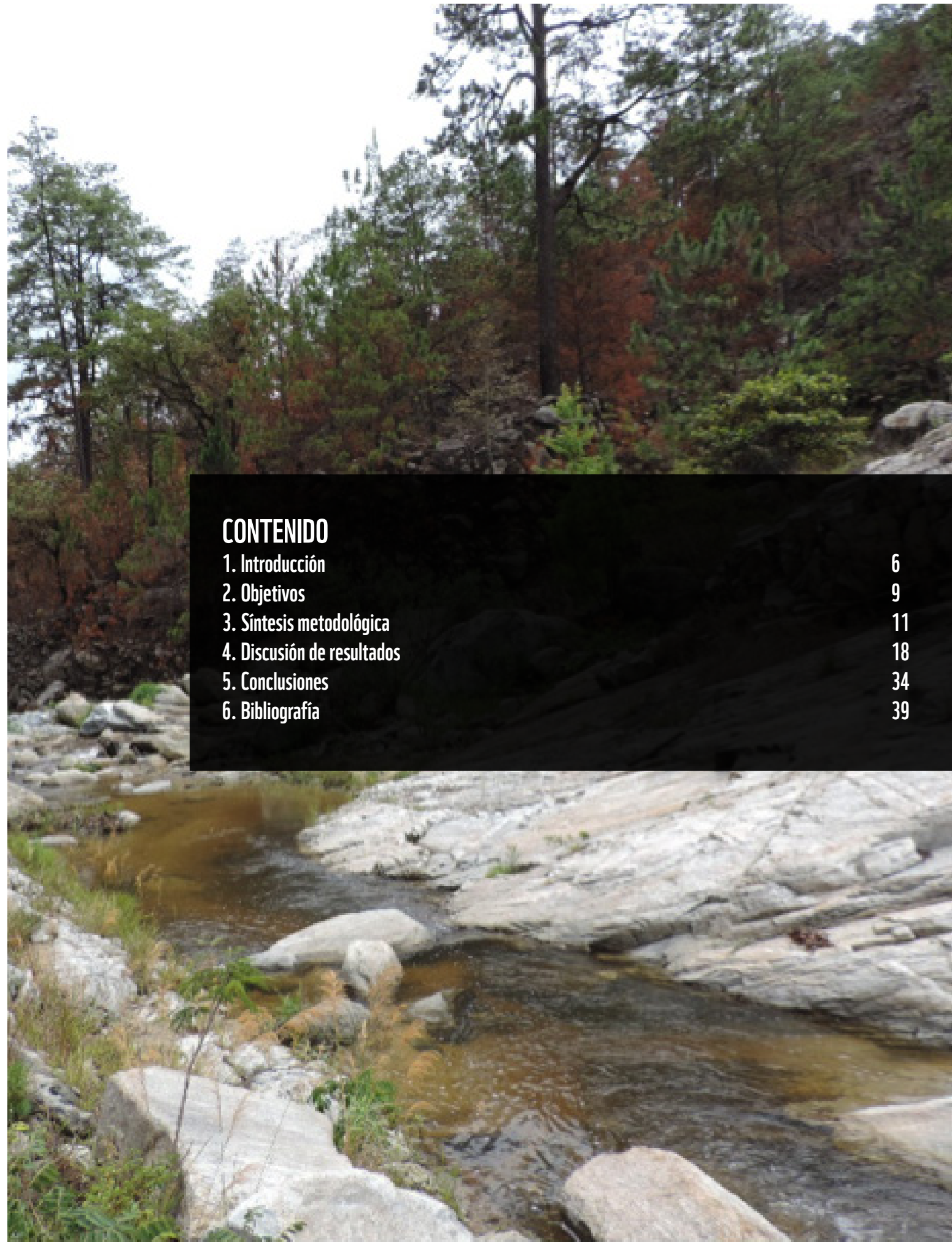
The Coca-Cola Company



GENERACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA, CON ÉNFASIS EN ISÓTOPOS ESTABLES (2H Y 18O)

PARA LA DETERMINACIÓN DE SITIOS CRÍTICOS DE RECARGA
HÍDRICA DEL ACUÍFERO EN LA PARTE BAJA DE LA SUBCUENCA
DEL RÍO PASABIÉN, DEPARTAMENTO DE ZACAPA, GUATEMALA

DOCUMENTO ORIGINAL DICIEMBRE 2015, VERSIÓN MEDIADA 2021



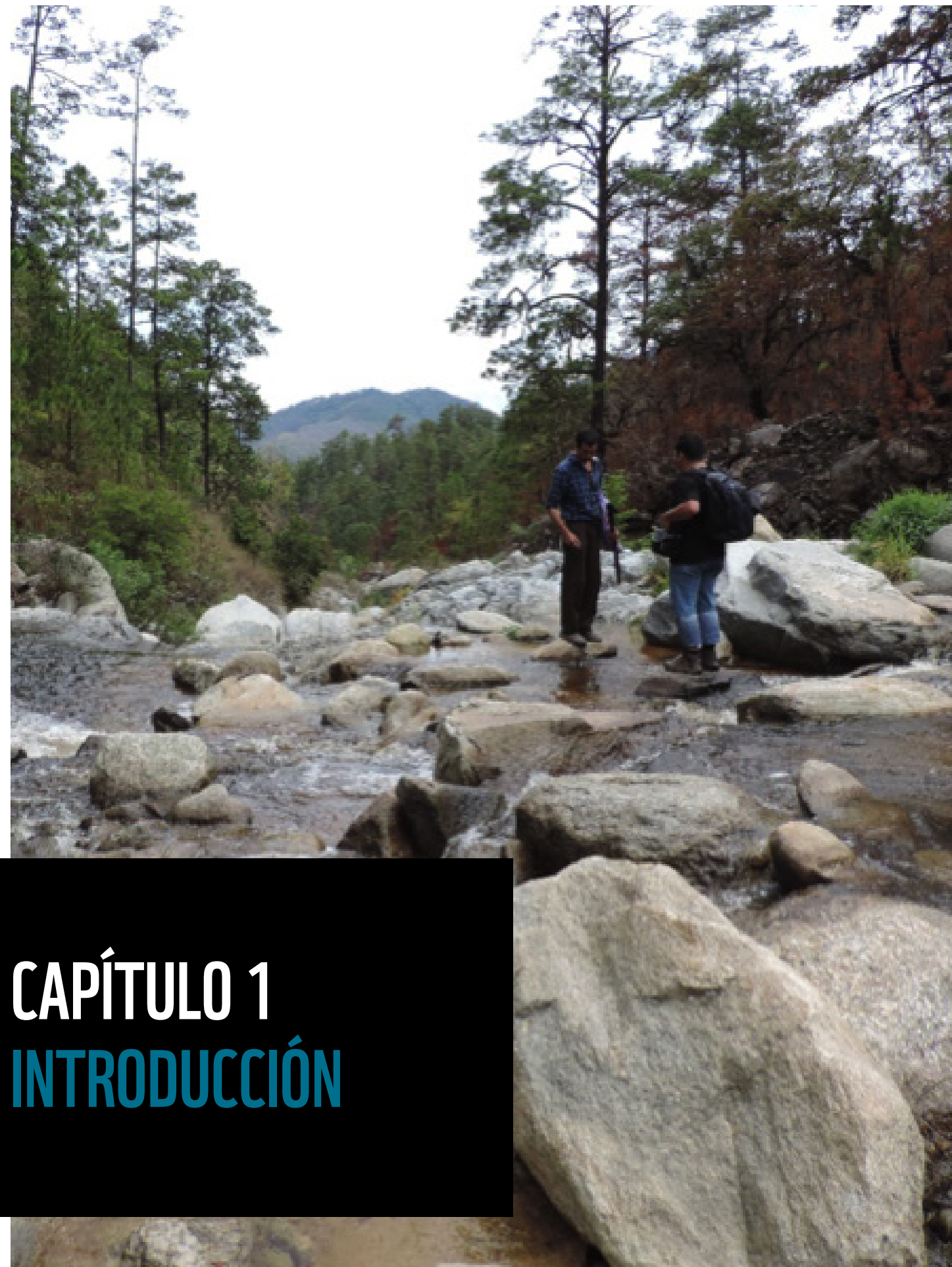
CONTENIDO

1. Introducción	6
2. Objetivos	9
3. Síntesis metodológica	11
4. Discusión de resultados	18
5. Conclusiones	34
6. Bibliografía	39

GENERACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA, CON ÉNFASIS EN ISÓTOPOS ESTABLES (2H Y 18O)

**PARA LA DETERMINACIÓN DE SITIOS CRÍTICOS DE
RECARGA HÍDRICA DEL ACUÍFERO EN LA PARTE
BAJA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO PASABIÉN,
DEPARTAMENTO DE ZACAPA, GUATEMALA**

DOCUMENTO ORIGINAL DICIEMBRE 2015, VERSIÓN MEDIADA 2021



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Este informe integra los datos de campo y un análisis preliminar de la investigación denominada “Generación y análisis de información hidrológica, con énfasis en isótopos estables (2H y 18O), para la determinación de sitios críticos de recarga hídrica del acuífero de la parte baja de la subcuenca del río Pasabién, departamento de Zacapa, Guatemala”.

El principal objeto de estudio es el análisis de los isótopos estables del agua, ya que este método ha resultado muy útil para definir el origen, la distribución y la disponibilidad de los recursos hídricos.

Se denominan isótopos a los núcleos atómicos de los elementos con el mismo número de protones, pero con distinto número de neutrones. Los isótopos, por tanto, corresponden al mismo elemento químico, pero tienen un peso atómico diferente, dado que este resulta de la suma de protones y neutrones del núcleo. La molécula de agua se compone de hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno es el elemento más simple en la naturaleza. Los átomos de hidrógeno normal contienen un protón y un electrón, pero cuando el átomo de hidrógeno tiene un neutrón que acompaña al protón, se llama Deuterio y se expresa con el símbolo 2H . Químicamente, los isótopos tienen las mismas características, pero difieren físicamente porque tienen un mayor peso.

Muchos procesos naturales causan una distribución desigual de isótopos pesados y livianos, y esta distribución puede dar información acerca de las transformaciones isotópicas. El proceso en el que los isótopos más livianos forman enlaces químicos, los cuales requieren menos energía para romperse, se denomina fraccionamiento. La variación isotópica puede ser utilizada para marcar y trazar elementos que se mueven en ciclos biogeoquímicos complejos, como el ciclo del agua.

La lluvia que cae en Guatemala proviene de la evaporación del agua de mar. Con el método de isótopos, se puede trazar el agua porque la concentración de estos isótopos pesados disminuye progresivamente en cuanto se alejan del mar o ascienden a las montañas en forma de vapor. Se pueden determinar las concentraciones isotópicas en la lluvia, en los ríos y en el agua subterránea o acuíferos. Los isótopos estables del agua son el 2H o deuterio y el 18O , con cuyas concentraciones se puede determinar dónde están las zonas de recarga hídrica.

La implementación de campo se basó en el seguimiento de un protocolo específico para la recopilación de variables biofísicas relacionadas con la distribución temporal y espacial de los recursos hídricos en la subcuenca. Para la definición de sitios críticos de recarga y regulación hidrológica, se establecieron los principales alcances: a) la validación de métodos novedosos de investigación hidrológica útiles para la planificación de recursos hídricos, gestión de riesgo al cambio climático y esquemas de conservación; b) la generación de información científica para fundamentar estrategias que garanticen el abastecimiento hídrico de la población, el sector económico y los ecosistemas, y c) el desarrollo de una experiencia piloto que se pueda reproducir en otras subcuencas estratégicas, tanto en la Reserva de la Biósfera Sierra de las Minas como en Centroamérica.




CAPÍTULO 2 OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar los sitios de recarga hídrica del acuífero de la parte baja de la subcuenca Pasabién.

Objetivos Específicos

- Recolectar muestras de agua de lluvia, escorrentía superficial y subterránea.
- Establecer proporciones de isótopos estables $2H$ y $18O$ en el agua muestreada.
- Monitorear y analizar información biofísica complementaria, especialmente de calidad de agua, climática, hidrológica e hidrogeológica .
- Desarrollar un modelo conceptual que explique el origen, distribución y disponibilidad de recursos hídricos en la subcuenca Pasabién.



CAPÍTULO 3 SÍNTESIS METODOLÓGICA

Geografía del área de estudio

La subcuenca Pasabién se ubica 125 kilómetros (km) al nororiente de la ciudad de Guatemala, en los departamentos de Zacapa principalmente un 97% y Alta Verapaz.

Su extensión es de 10,084 hectáreas (ha), en los municipios de Río Hondo, con 9,358 ha (92.8%), y Pasabién con 443.73 ha, (04.4 %) en el departamento de Zacapa, y el municipio de Panzós, con 282 ha (02.8%), en el departamento de Alta Verapaz. El punto más bajo de la subcuenca está a 180 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.), en donde se une con el río Motagua. El punto más alto está casi a 3,000 m s. n. m. en la Sierra de las Minas. La parte media y alta de la subcuenca Pasabién se traslapa con la zona núcleo y la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biósfera Sierra de las Minas (RBSM) (Figura 1).

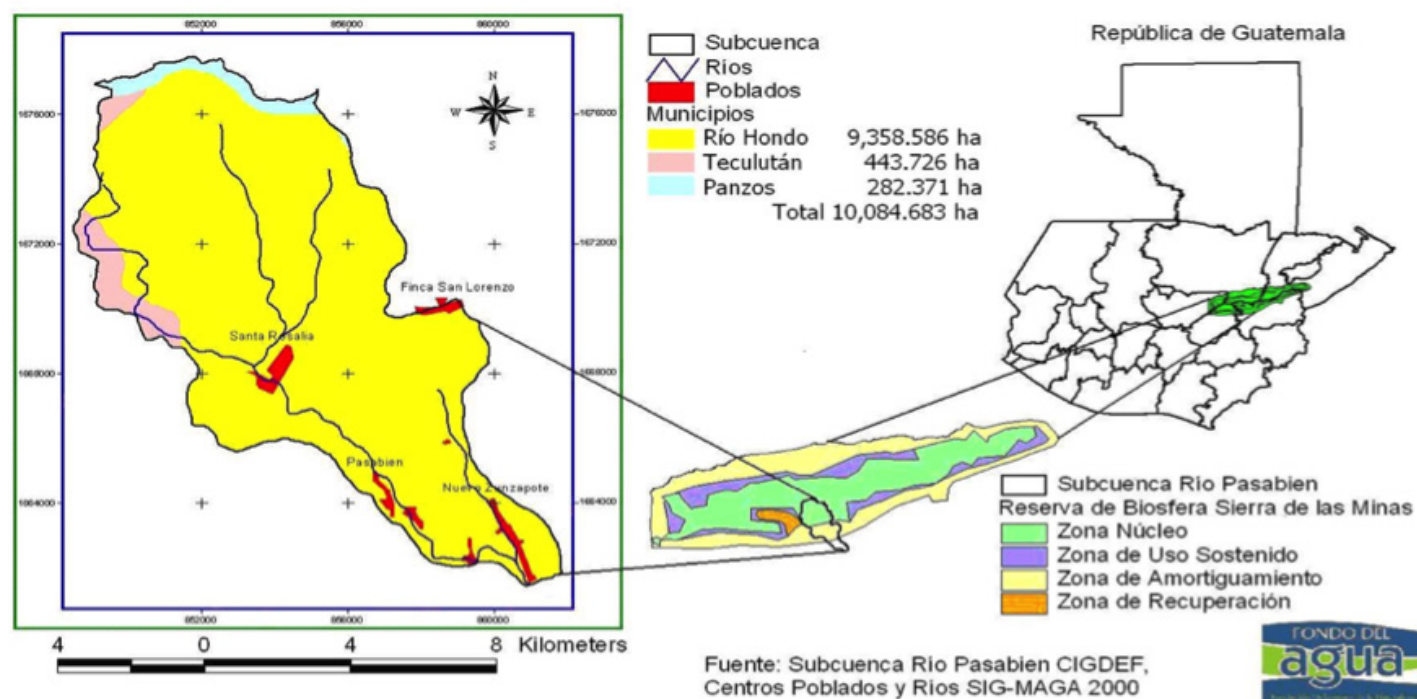


Figura 1: Ubicación general de la subcuenca río Pasabién.

Monitoreo de isótopos ^2H y ^{18}O

Para este trabajo, se recopilaron datos biofísicos secundarios con énfasis en la información geológica, climática e hidrológica para contextualizar y delimitar el área de estudio y el período de muestreo en 2015, con el fin de analizar los isótopos estables (^2H y ^{18}O) y obtener los datos de calidad de agua complementarios.

Estos datos contribuyen a determinar la ubicación de los sitios más probables de recarga hídrica del acuífero ubicado en la parte baja de la subcuenca Pasabién.

El muestreo de agua se realizó en la región hidrológica de sotavento (vertiente sur de la Sierra de las Minas), ubicando puntos de muestreo de lluvia, escorrentía superficial y agua subterránea a lo largo de un gradiente altitudinal. Las zonas de muestreo se eligieron según la clasificación altitudinal:

Parte de la cuenca	Tipo de bosque o lugar y altitud
Parte alta de la cuenca	Bosque enano a 2,700 m s. n. m. Bosque nuboso a 2,250 m s. n. m. San Lorenzo a 1,750 m s. n. m.
Parte media de la cuenca	Santa Rosalía (900 m s. n. m.)
Parte baja de la cuenca	Poblado Pasabién cerca de 250 m s. n. m.

Cuadro 1: Ubicación altitudinal de las zonas de muestreo para isótopos en la subcuenca del río Pasabién.

Las muestras compuestas que se recopilaron sirven para observar concentraciones isotópicas representativas en diferentes momentos de muestreo y épocas del año. Durante la estación seca, se realizó un muestreo mensual, y durante estación lluviosa, generalmente se realizaron muestreos cada quince días. Durante el mes de octubre (mes más lluvioso), se realizó un muestreo semanal (ver Figura 2).

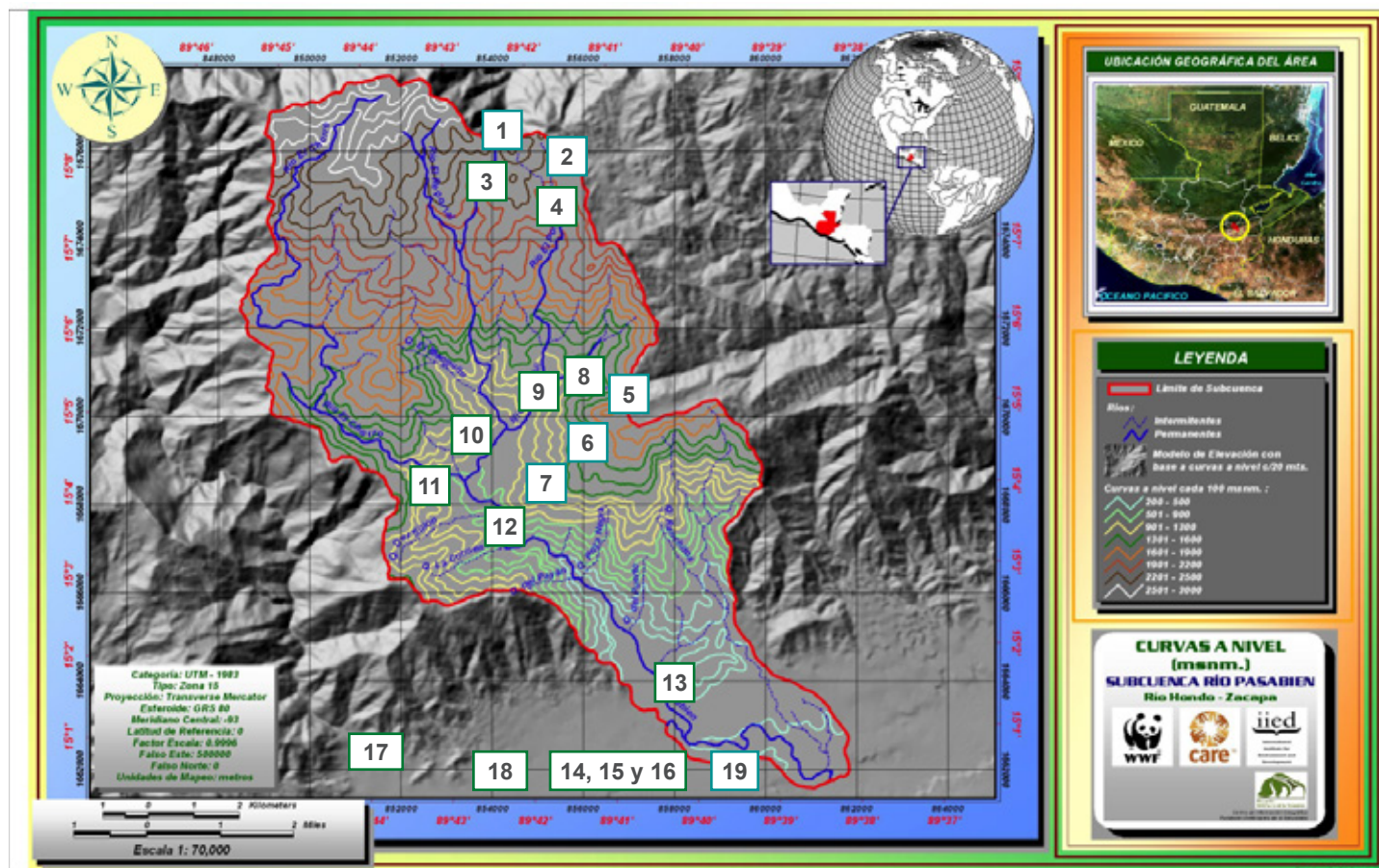


Figura 2: Ubicación de los puntos de muestreo de agua para el análisis de isótopos estables.

Localización de la red de puntos de muestreo de aguas de lluvia y drenaje superficial y subterráneo en la subcuenca Pasabién

En el Cuadro 2 y la Figura 2 se indica la ubicación de los puntos de muestreo de agua realizados en campo. También se identifican las principales características y la naturaleza del agua muestreada, es decir, si las muestras de agua provienen de colectores de agua de lluvia, de caudal superficial o de nacimientos o pozos. Los códigos del Cuadro 2 corresponden a la cantidad de sitios de muestreo por tipo de agua: P (precipitation) representa las muestras de agua de lluvia, R (river) representa las muestras tomadas de los ríos y W (well) representa las muestras recolectadas de pozos.

Cuadro 2: Identificación y ubicación geográfica y descripción de los puntos de muestreo para la recopilación de datos de agua. Los subíndices i de los componentes lluvia, caudal y pozos ubicados en la columna de medición de variables, corresponde a que se tomarán muestras de agua para su análisis de laboratorio de isótopos.

No.	Código	Nombre del sitio	Altitud m s. n. m.	Medición de variables						Ubicación	
				Lluvia	Lluvia i	Caudal	Caudal i	Pozo	Pozo i	Latitud	Longitud
1	P1	Bosque enano	2600							15° 08' 09"	89° 42' 08"
2	P2	Bosque nuboso (El Timbo)	2300							15° 08' 42"	89° 42' 08"
3	R1	Río El Inglés parte alta	2000							15° 08' 08"	89° 40' 36"
4	R2	Río El Portón parte alta	2000							15° 07' 28"	89° 40' 16"
5	P4	San Lorenzo	1750							15° 05' 06"	89° 40' 10"
6	P5	El Naranjo	1300							15° 05' 15"	89° 41' 02"
7	P6	Santa Rosalía	950							15° 05' 15"	89° 41' 02"
8	R3	Santa Rosalía, El Inglés	950							15° 05' 15"	89° 41' 02"
9	R4	Santa Rosalía, El Portón	950							15° 05' 09"	89° 41' 52"
10	R5	Santa Rosalía, El Repollal	950							15° 04' 40"	89° 42' 17"
11	R6	Santa Rosalía, La Cascada	950							15° 04' 05"	89° 42' 19"
12	R7	Santa Rosalía, La Presa	900							15° 04' 04"	89° 42' 18"
13	R8	Balneario Pasabien	300							15° 02' 25"	89° 42' 01"
14	W1	Planta Coca Cola Pozo 1	250							15° 00' 05"	89° 40' 32"
15	W5	Planta Coca Cola Pozo 3	250							15° 00' 05"	89° 40' 32"
16	W6	Planta Coca Cola Pozo 4	250							15° 00' 05"	89° 40' 32"
17	R9	Río Teculután, estación Las Minas	250							15° 00' 45"	89° 44' 08"
18	R10	Río Motagua	180							15° 00' 50"	89° 57' 32"

Fuente: Elaboración propia

Datos de calidad de agua y otras características hidroquímicas

En cada una de las muestras colectadas se obtuvieron datos básicos de la calidad de agua, como temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, total de sólidos disueltos y pH. Además, algunas de las muestras tomadas de los pozos durante la estación lluviosa se analizaron para determinar la dureza y la presencia de sílice.

Balance hídrico de suelos

Los procesos metodológicos se basaron en la propuesta de Schosinsky (2006). Los datos se tomaron del estudio “Evaluación hidrológica de las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo” (WWF 2007, Avalos y Rosito). Fue necesario desarrollar tres fases para generar un balance hídrico de suelos y determinar la recarga hídrica.

Se integró la información cartográfica digital de geología, suelos y cobertura del vegetal, con los que se logró la delimitación de las unidades de mapeo. Asimismo, se integraron los datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial generados a partir de los mapas de isolíneas.

La fase de trabajo de campo (realizado en el 2006) consistió en llevar a cabo pruebas de infiltración (método Porchet) para cada unidad de mapeo definida, se determinó la profundidad efectiva representativa y se tomaron muestras de suelo. También se determinaron las velocidades de infiltración para después estimar la infiltración básica. Con esta información, se calculó la recarga mensual y anual para cada unidad de mapeo definida. El balance hídrico consiste en determinar las entradas de agua al sistema, como la precipitación, y restarle la evapotranspiración, la escorrentía superficial, la interceptación de la vegetación y la recarga hídrica profunda.

A partir de la integración de la información anteriormente descrita, la cual está vinculada a la geología, el clima, la hidrología, la hidroquímica y la calidad del agua, se procedió a la elaboración de un perfil que representa el modelo conceptual hidrogeológico de la subcuenca analizada. Finalmente, se analizó la recarga hídrica de cada subcuenca y se realizaron análisis del comportamiento de esta recarga de acuerdo con las propiedades biofísicas de las microcuencas y las subcuencas.





CAPÍTULO 4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los aspectos biofísicos relevantes son los geológicos y climáticos, que determinan los procesos de recarga hídrica.

Las principales formaciones geológicas en Teculután, en la parte alta de la subcuenca Pasabién y las subcuencas vecinas hacia el oeste, contienen granito, gneis (rocas con escasa formación de acuíferos), mármol y aluviones del cuaternario (material suelto constituido por grava, arena, limo y arcilla). El perfil geológico (Figura 3) confirma la posible formación de acuíferos, especialmente en las formaciones de mármol y aluviones.

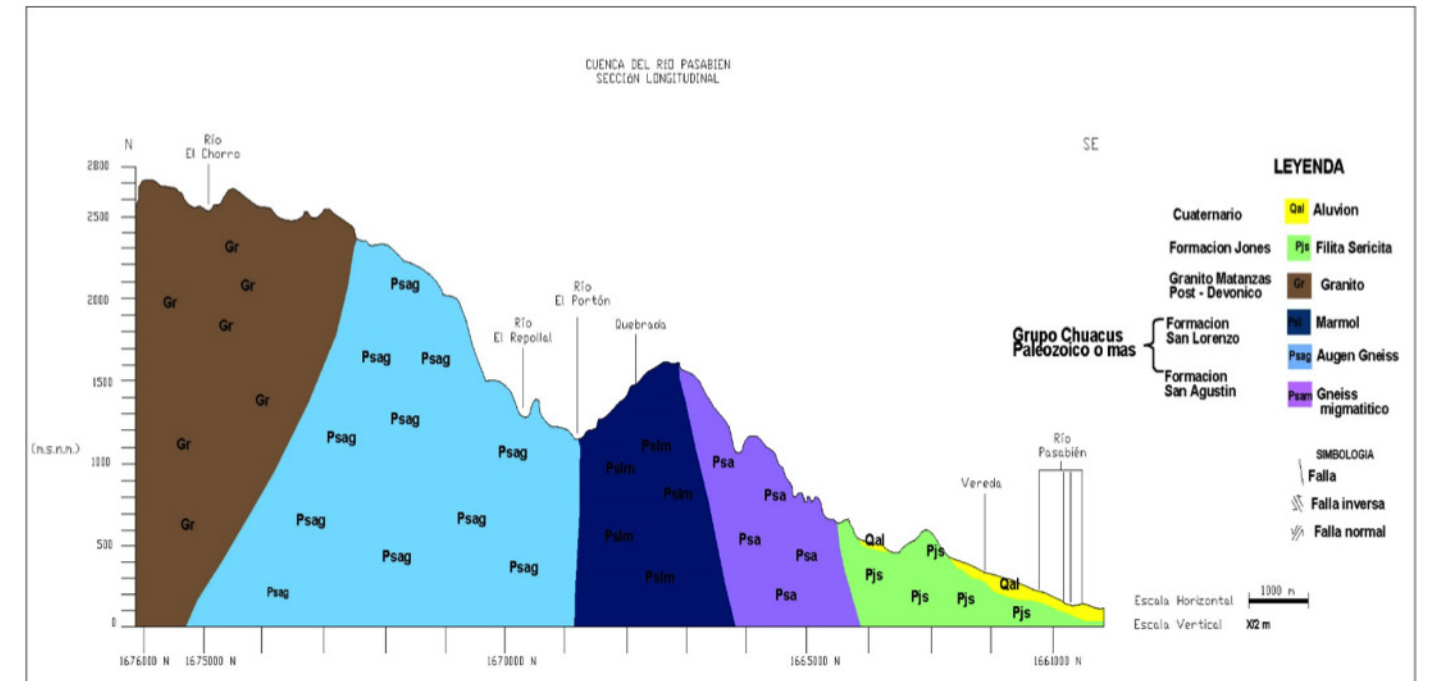


Figura 3: Perfil geológico de la subcuenca Pasabién. Fuente: Mapa geológico preliminar para la cuenca del río Pasabién (CORDILLERA, S. A. 2007).

En la Figura 4 se muestran las precipitaciones históricas para el período 1994-2010 y su comparación con un año muy seco (2009-2010) y un año muy húmedo (2010-2011). Se evidencia un alto contraste entre la parte alta y baja de la subcuenca, así como entre el promedio histórico y el año muy seco y el año muy húmedo.

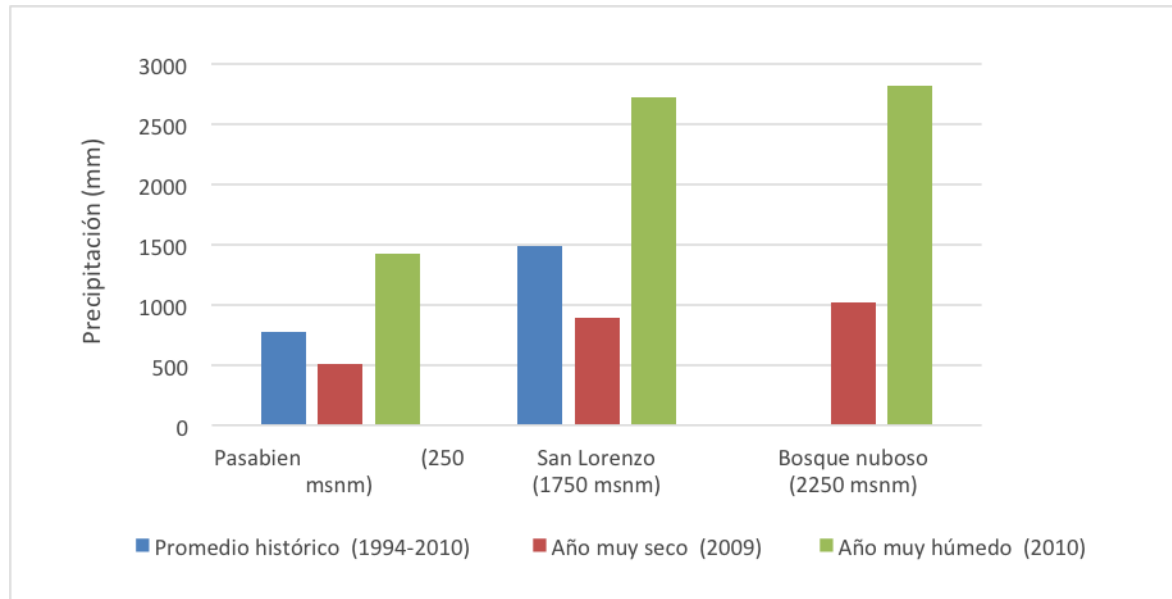


Figura 4: Precipitación histórica y de un año muy seco (2009) y un año muy húmedo (2010) de estaciones climáticas ubicadas en la subcuenca Pasabién.

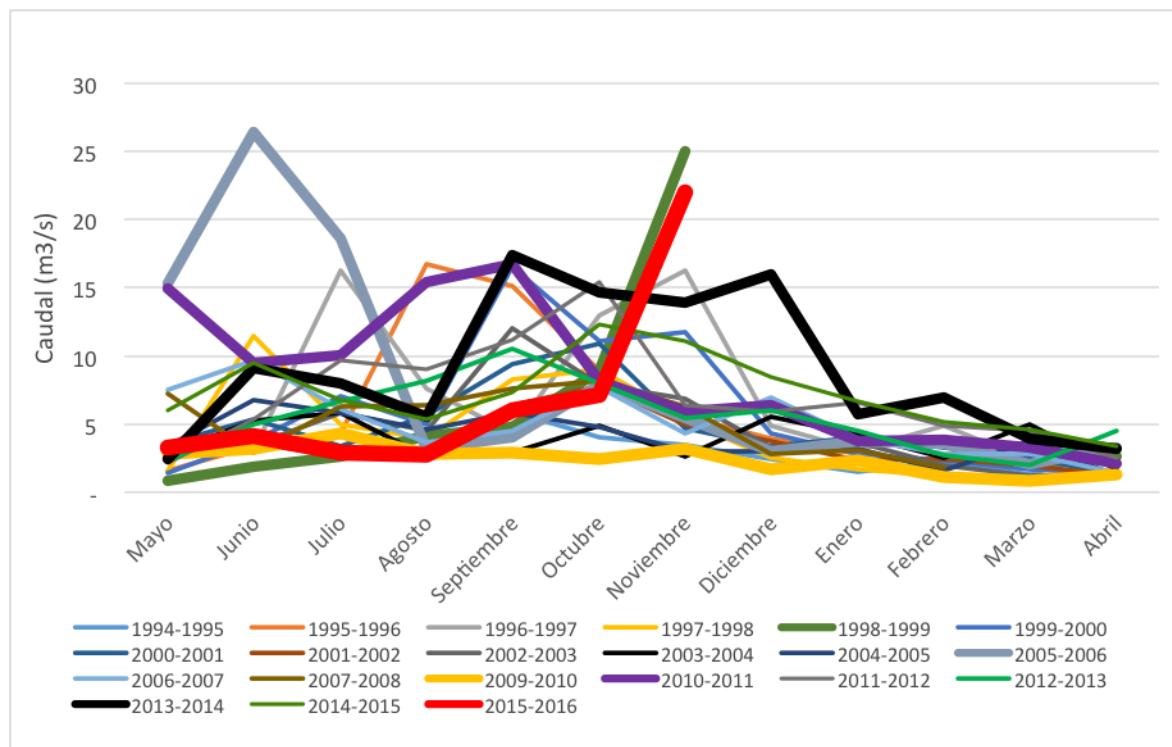


Figura 5: Caudal histórico mensual (período 1994-2015) destacan los siguientes años: 1998-99, 2009-10 y 2015 años muy secos, y 2005-06, 2010-11, 2013-14 años muy húmedos con meses récord históricos. Datos de la estación Las Minas, en subcuenca Teculután, Fuente: INDE.

La Figura 5 muestra el registro histórico de caudales, que revela que los años más secos fueron en los periodos de 1998-1999, 2009-2010 y la primera parte de 2015. Los caudales más bajos se registraron en julio y agosto de 2015, aunque en noviembre se registró como el mes de mayor caudal mensual. En contraste, los caudales más altos se registraron en 1998, 2005-2006, 2010-2011 y 2013-2014, con eventos extremos de precipitación. Los datos de huellas isotópicas de las aguas subterráneas fueron similares y consistentes desde el inicio del muestreo hasta noviembre de 2015.

En las Figuras 6 y 7 se muestran las gráficas de distribución de carga isotópica de 2H o deuterio de las muestras tomadas durante diferentes periodos de 2015. Adicionalmente, se muestra la categorización de dichas muestras de agua de acuerdo con la ubicación, fuente y naturaleza de los sitios de monitoreo.

En este sentido, se logra diferenciar el agua vinculada al flujo básico, que evidencia que el acuífero de la parte media de la subcuenca está conectado con el agua subterránea de la parte media y alta. En la Figura 8 se muestra la línea meteórica local, es decir, la definición de la huella isotópica del agua proveniente de la precipitación y su relación con el agua subterránea de los pozos de Alimentos y Bebidas del Atlánticos, S. A. (ABASA).

Discusión de los principales hallazgos

a) Trazabilidad del agua de la precipitación

Se logró evidenciar que las muestras de precipitación de febrero y marzo únicamente capturables (único sitio con lluvia) en la parte alta de la subcuenca (bosque nuboso) presentan carga isotópica cercanas a cero, es decir, son aguas “pesadas” derivadas, que están asociadas a la neblina o precipitación horizontal (vinculadas a lluvias orográficas), (Figuras 6 y 7).

La carga isotópica de las muestras de las precipitaciones de inicio de estación lluviosa (abril, mayo y junio) son catalogadas como “livianas”, es decir, con valores superiores a -60 en 18O (Figuras 6 y 7).

Durante los meses de febrero, marzo y abril, las aguas superficiales muestreadas en los ríos ubicados en la parte media y baja de la subcuenca Pasabién presentan una alta influencia –o concentración isotópica– de agua proveniente del bosque nuboso y de precipitaciones “pesadas”, es decir, de neblina o precipitación horizontal, propias de la parte alta de la subcuenca o bosque nuboso en esa época del año.

Es importante notar que el agua de lluvia captada en la parte alta de la subcuenca se manifiesta de manera muy pronunciada en parte baja de la subcuenca. Esto indica que el agua de lluvia ha sido trazable desde su origen en forma de lluvia hasta sus manifestaciones en forma de agua de corrientes superficiales y en acuíferos en la parte media y baja.

b) Las cargas isotópicas del agua del acuífero que está en la parte baja de la subcuenca, especialmente la de los pozos de ABASA, ha sido altamente consistente y constante durante todo el muestreo (enero a noviembre de 2015). Existe una similitud entre las cargas isotópicas del agua de los pozos de ABASA y las precipitaciones de septiembre y octubre del año 2014, con ocurrencia en la parte media de la subcuenca. Asimismo, existe esta misma correlación entre el agua de los pozos y el agua de la parte media de la subcuenca Pasabién en la estación lluviosa de 2015.

En cuanto a aspectos hidrogeológicos, se ha definido la existencia de estructuras geológicas permeables en la parte media de la subcuenca y de fracturas y fallas geológicas, precisamente entre San Lorenzo (1,750 m s. n. m.) y Santa Rosalía (900 m s. n. m.). La geología de rocas meta sedimentarias (mármol y otras) son raras excepciones en esta región, con predominancia de formaciones plutónicas, metamórficas (muchas veces cristalinas) y de origen máfico, es decir, con escasa formación de acuíferos profundos. Estos datos son coherentes con la información hidrogeológica de la subcuenca.

c) La carga isotópica del caudal mínimo es la misma que la del manto acuífero de la parte baja de la subcuenca. Esto evidencia la comunicación activa entre el agua subterránea y superficial de las partes media y baja de las subcuencas Pasabién y Teculután (Figuras 8 y 9).

Lo anterior sugiere que al menos la parte media de la subcuenca Pasabién, además de ser el sitio donde se capta el agua del acuífero de la parte baja de esta subcuenca (pozos de ABASA), también es vital para mantener la alta calidad del agua.

d) De acuerdo con el Cuadro 3, los valores de muestras de agua de los pozos de ABASA muestran presencia de sílice y valores relativamente altos de dureza. Esto plantea que existe una alta residencia en sitios con material geológico de mármol y rocas afines.

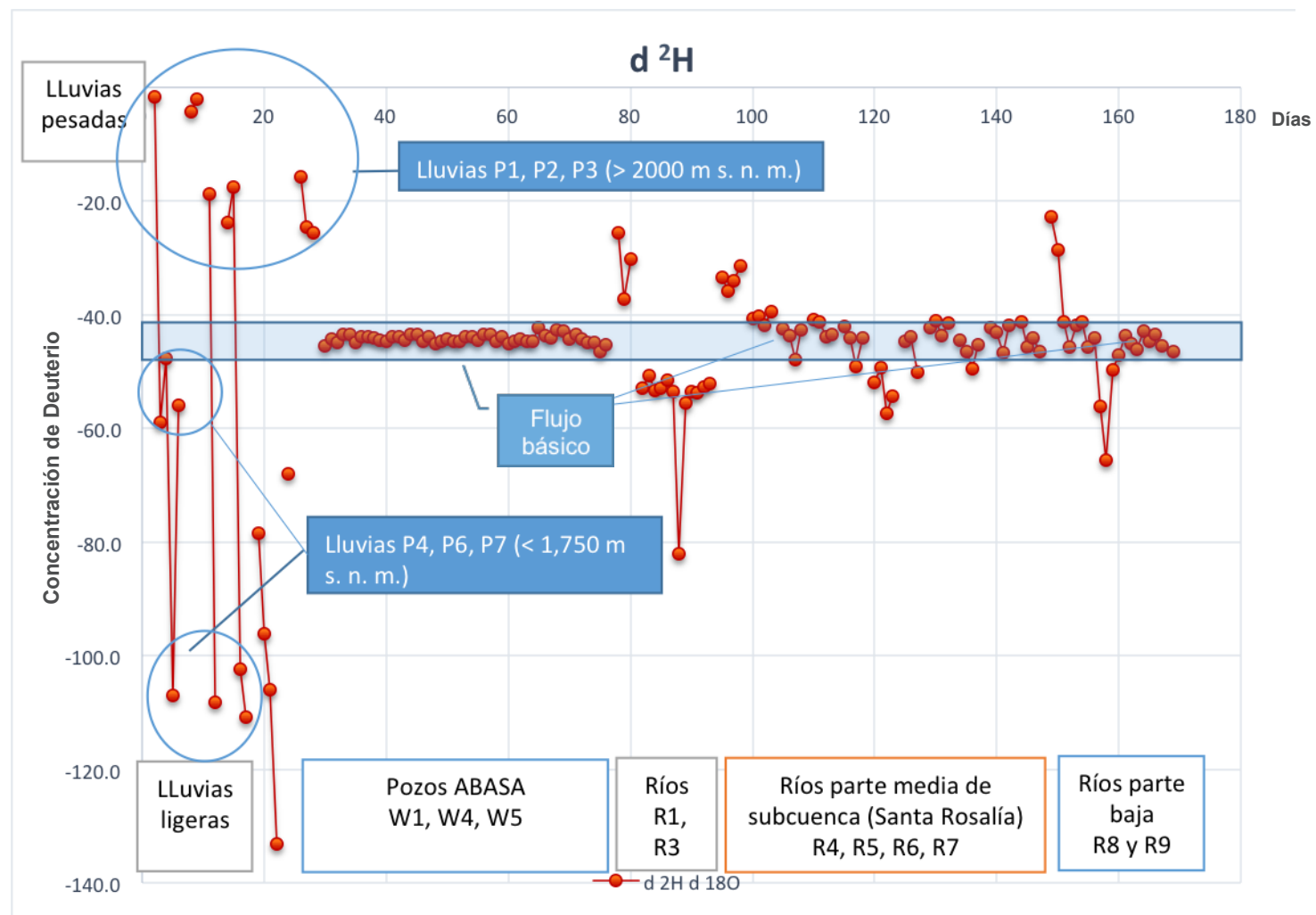


Figura 6: Concentración de deuterio (isótopo 2H) de acuerdo con los puntos de muestreo y definición de la concentración del flujo básico o agua vinculada al acuífero principal (período con énfasis en el primer semestre de 2015).

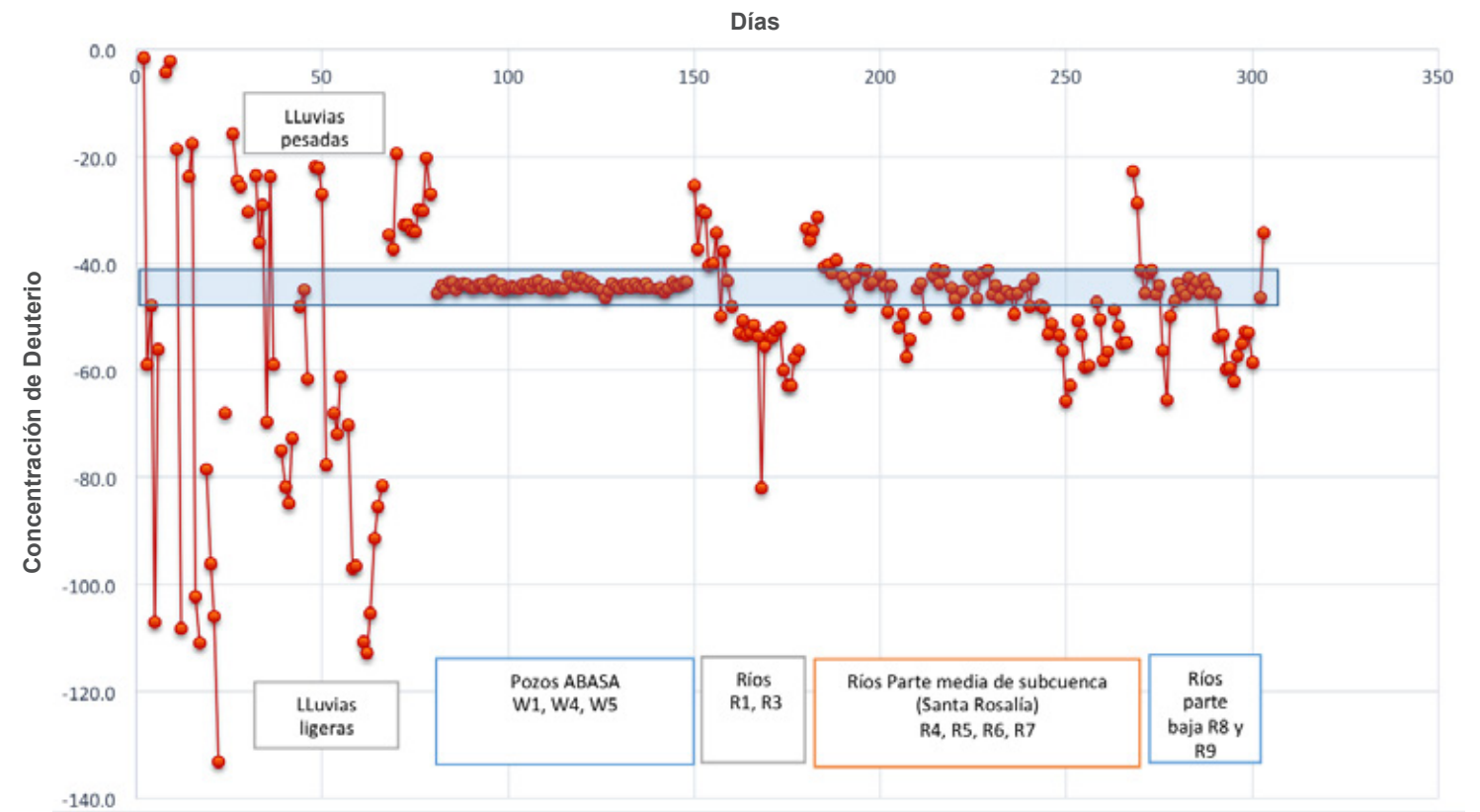


Figura 7: Concentración de deuterio (isótopo 2H) de acuerdo con los puntos de muestreo y definición de la concentración del flujo básico o agua vinculada al acuífero principal (período octubre de 2014 a noviembre de 2015).

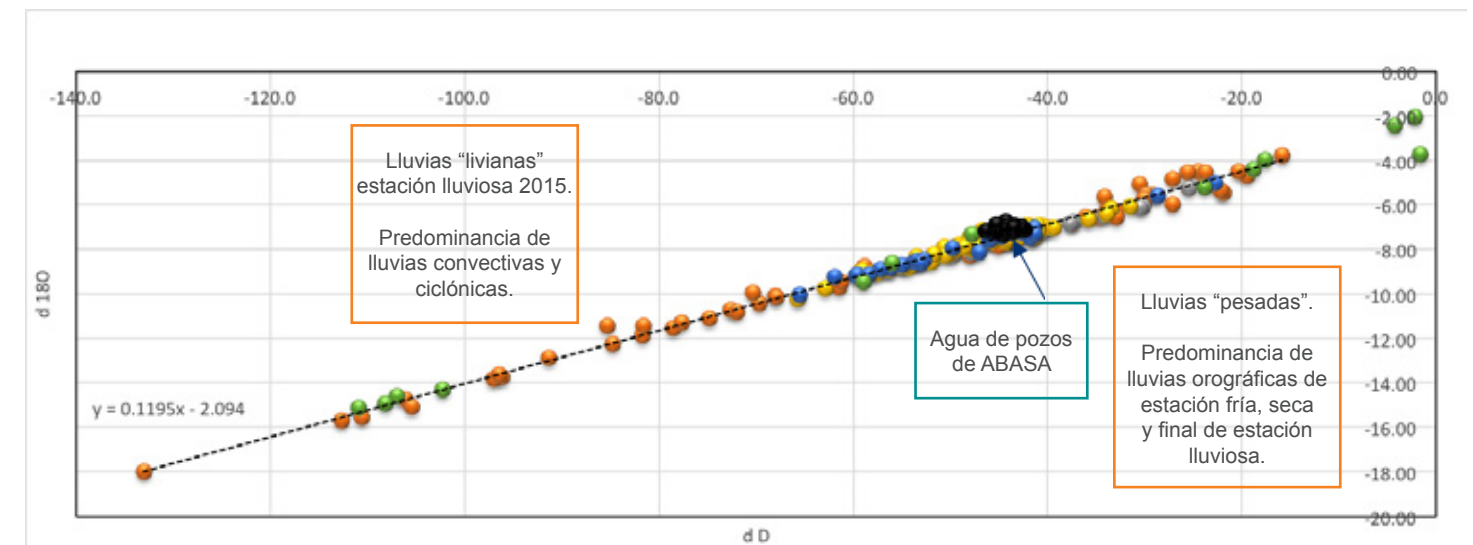


Figura 8: Línea meteorológica de la precipitación de la subcuenca Pasabién y relación con concentraciones isotópicas de agua de pozos.

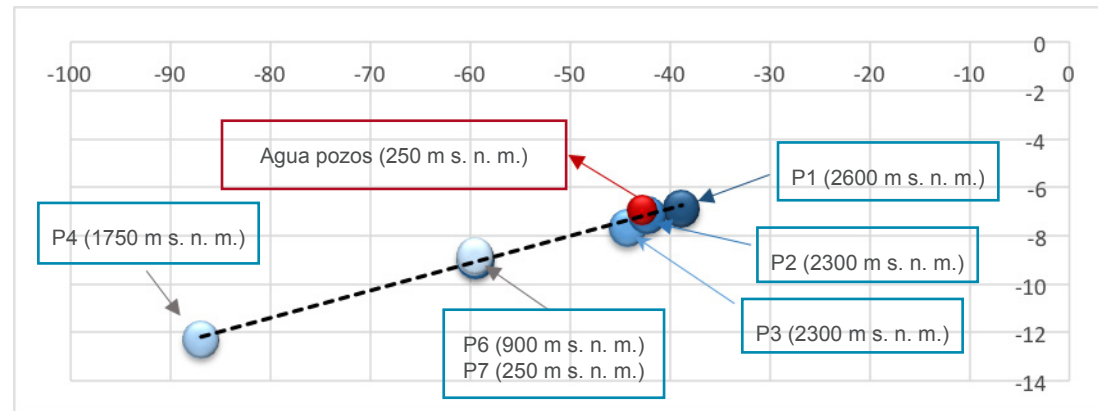


Figura 9: Relación entre promedios aritméticos de los principales puntos de muestreo de lluvia y pozos

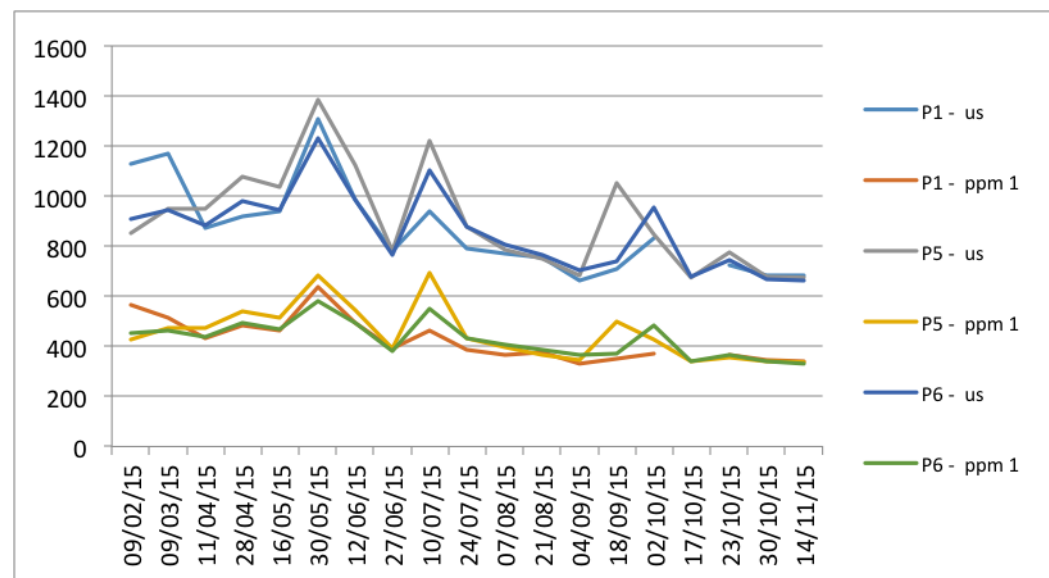


Figura 10: Datos de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y sólidos disueltos de los pozos de ABASA (período febrero-noviembre de 2015).

Oxígeno disuelto en ppm y % para muestras de agua de pozos ABASA

Fecha	Pozo					
	P1		P5		P6	
	ppm*	%	ppm	%	ppm	%
09/02/2015	3.5	58.1	3.3	52.0	3.3	54.0
28/04/2015	3.5	62.3	3.4	53.8	3.8	61.0
16/05/2015	3.9	64.4	3.8	58.4	4.6	72.6
30/05/2015	6.0	99.3	4.6	73.6	4.0	69.0
13/06/2015	3.6	63.6	3.4	54.0	3.6	63.6
27/06/2015	9.9	175.0	5.8	98.9	6.2	103.3
10/07/2015	4.9	81.1	4.1	65.1	3.3	53.7
24/07/2015	4.0	64.8	3.8	61.7	4.4	69.0
07/08/2015	4.1	66.1	3.9	62.4	4.0	64.6
21/08/2015	4.0	68.2	3.8	62.0	4.0	76.6
04/09/2015	5.4	81.3	8.5	107.4	7.5	88.3
18/09/2015	2.8	46.2	3.6	54.1	3.1	58.0
02/10/2015	5.2	86.5	4.4	69.1	3.5	55.0
17/10/2015			4.6	79.7	4.5	73.3
23/10/2015	4.2	66.7	4.3	67.5	4.2	67.5
30/10/2015	4.8	89.9	4.1	68.5	4.1	67.3
14/11/2015	7.1	112.9	7.0	111.1	7.4	110.4

*ppm = partes por millón

Cuadro 3: Datos de oxígeno disuelto de los pozos de ABASA (período febrero-noviembre de 2015).

Dureza de agua de los pozos ABASA		Sílice		
Fecha	Dureza ppm*	Fecha	# pozo	Sílice ppm*
03/11/2015	320	10/11/2015	5	73
04/11/2015	300	11/11/2015	6	74
05/11/2015	296			
06/11/2015	270			
07/11/2015	249			
08/11/2015	270			
09/11/2015	271			
10/11/2015	270			
11/11/2015	257			
12/11/2015	268			
13/11/2015	255			
14/11/2015	244			

*ppm = partes por millón

Cuadro 4: Datos de oxígeno disuelto de los pozos de ABASA (período febrero-noviembre de 2015).

Balance hídrico

Para determinar el origen, distribución y disponibilidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en la subcuenca Pasabién, con énfasis en el análisis de su relación con el abastecimiento hídrico, se hizo el análisis de balances hídricos en la subcuenca.

Para definir las unidades de análisis hidrológico, se identificaron los cinco principales ecosistemas, cuyas delimitaciones de altitud se observan en la siguiente descripción, de donde se procedió a coleccionar la información de medidores de precipitación (Figura 12).

Ecosistema	Metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.)
Bosque enano	Arriba de 2,650
Bosque nuboso	Entre 2,000 y 2,650
San Lorenzo, Santa Rosalía	Entre 900 y 2,000
Parte media baja de la subcuenca	Entre 900 y 300
Parte baja de la subcuenca	Inferior a 300 (esta región se caracteriza por presentar pendientes muy bajas)

Cuadro 5: Ecosistemas de la subcuenca del río Pasabién definidos como unidades de análisis hidrológico.

Los patrones de la distribución de lluvia con niveles de precipitación muy bajos y muy altos generaron fuertes cambios en la recarga hídrica. Con base en esta información, se puede afirmar que 2015 fue un año con una estación lluviosa muy seca, con lluvias y recarga hídrica muy inferior al promedio histórico (Figura 11).

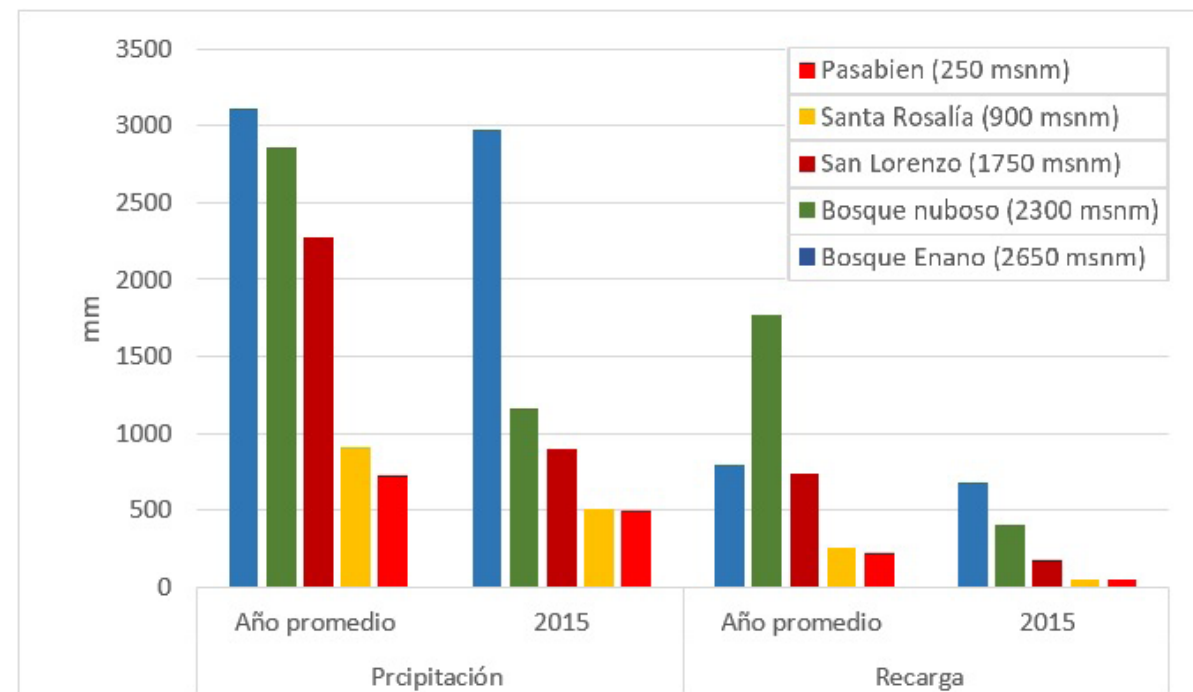


Figura 11: Comparación entre precipitación y recarga de años promedio histórico y año 2015 (año muy seco).

En la Figura 13 y 14 se puede apreciar la distribución de la recarga hídrica histórica y a lo largo del año 2015, respectivamente. Esto es importante definirlo para contar con mejores elementos de análisis de la distribución temporal de las lluvias con mayor influencia en los procesos de recarga hídrica y abastecimiento de acuíferos.

Para el año promedio histórico, el mes de mayor recarga hídrica es septiembre, seguido de octubre, y el ecosistema con mayor recarga es el bosque nuboso. Para el año muy seco de 2015, el ecosistema con mayor recarga es el bosque enano, durante el mes de noviembre. El bosque enano es el único ecosistema que no contrasta tanto con el promedio histórico sus láminas (espesor) de recarga hídrica.

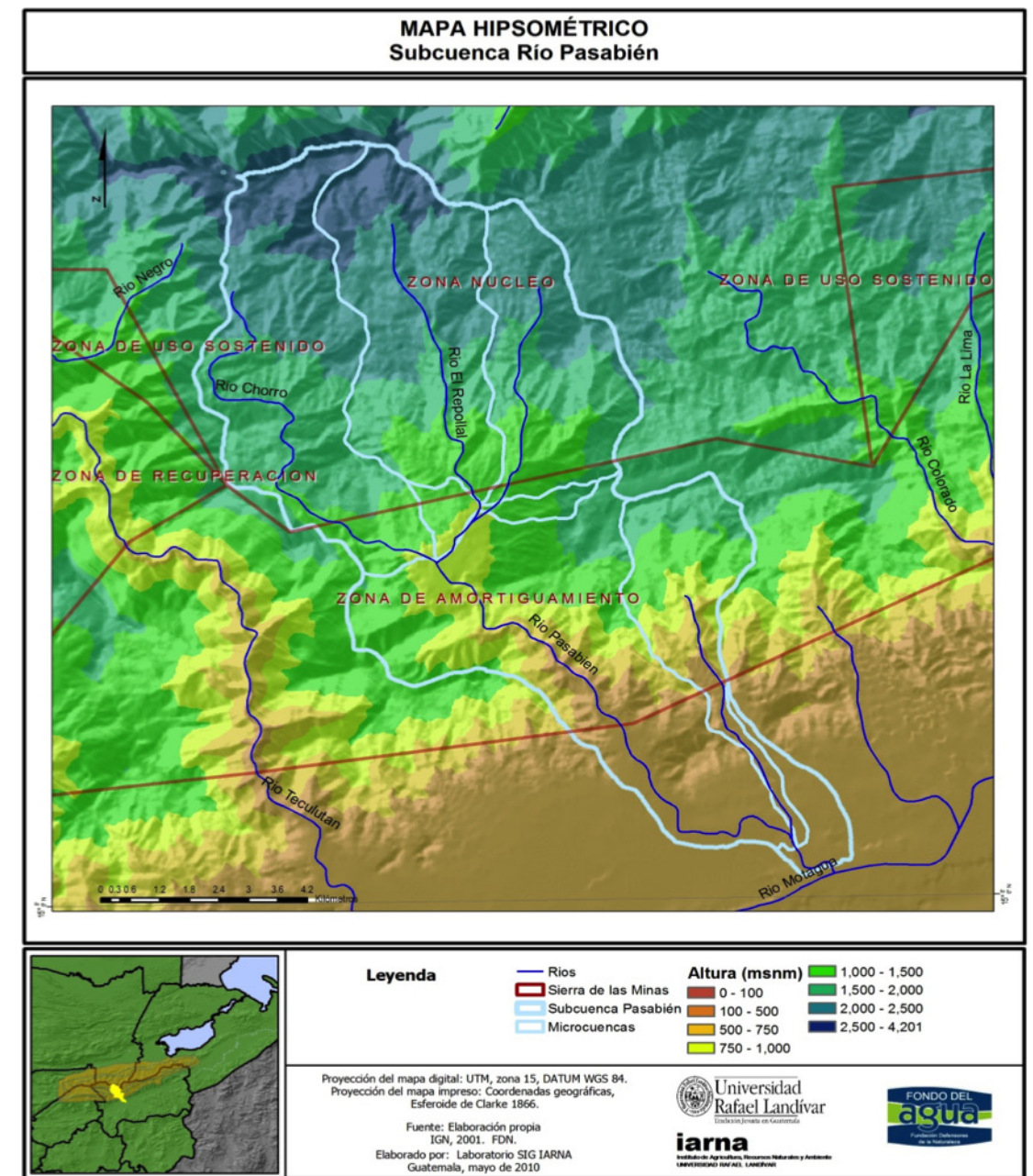


Figura 12: Ecosistemas representativos de análisis.

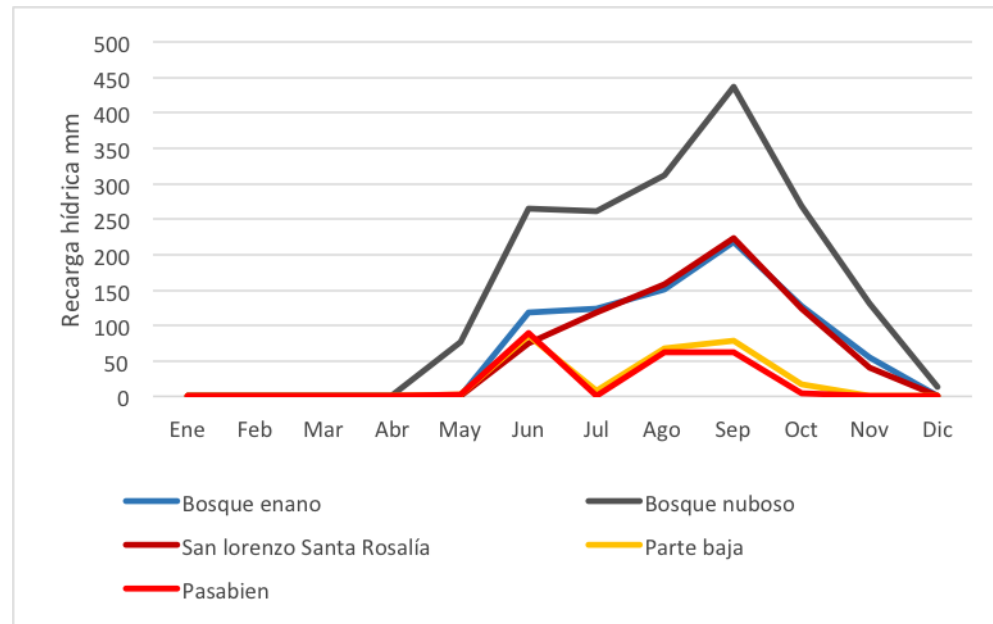


Figura 13: Distribución mensual de la recarga hídrica en un año promedio histórico en la subcuenca Pasabién.

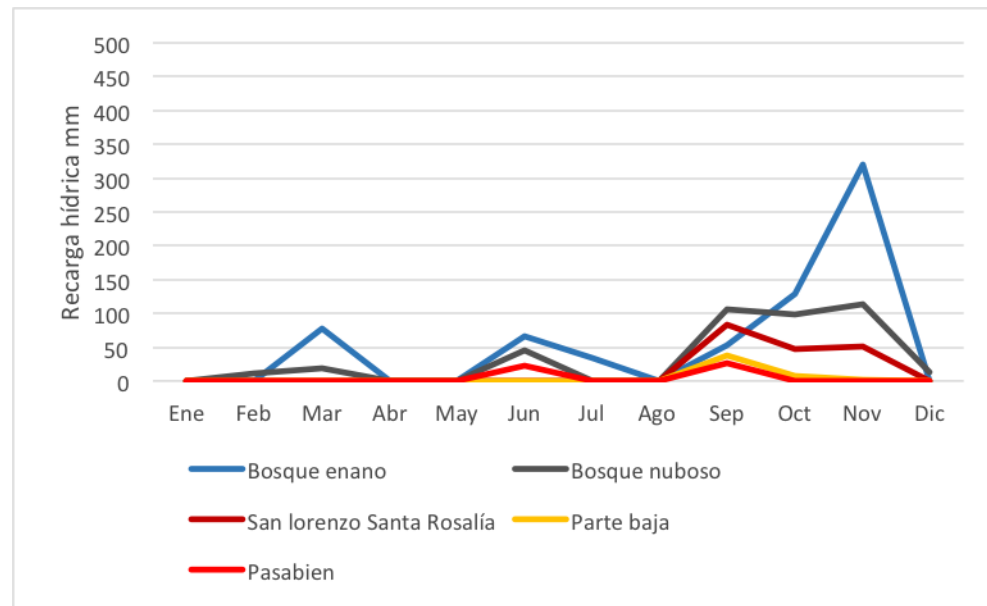


Figura 14: Distribución mensual de la recarga hídrica en el año 2015 en la subcuenca Pasabién.

En la Figura 15, se muestra la distribución de caudales promedio mensuales en el punto de aforo en Santa Rosalía denominado “la presa”, que está ubicado cerca de la presa con el mismo nombre, a 900 m s. n. m. Allí también se pueden apreciar caudales mucho más bajos de lo esperado, con caudales máximos de casi 1,300 litros por segundo (l/s). El volumen acumulado durante la estación lluviosa es de casi 16 millones de metros cúbicos (m³). Al comparar este valor con la recarga hídrica estimada para las regiones ecológicas (Cuadro 6) correspondientes a la parte media y alta de la subcuenca, se logra evidenciar que sí existen valores significativos de recarga hídrica profunda (aproximadamente 10 millones de m³). Se confirma que la parte media de la subcuenca puede aportar agua subterránea a la parte baja.

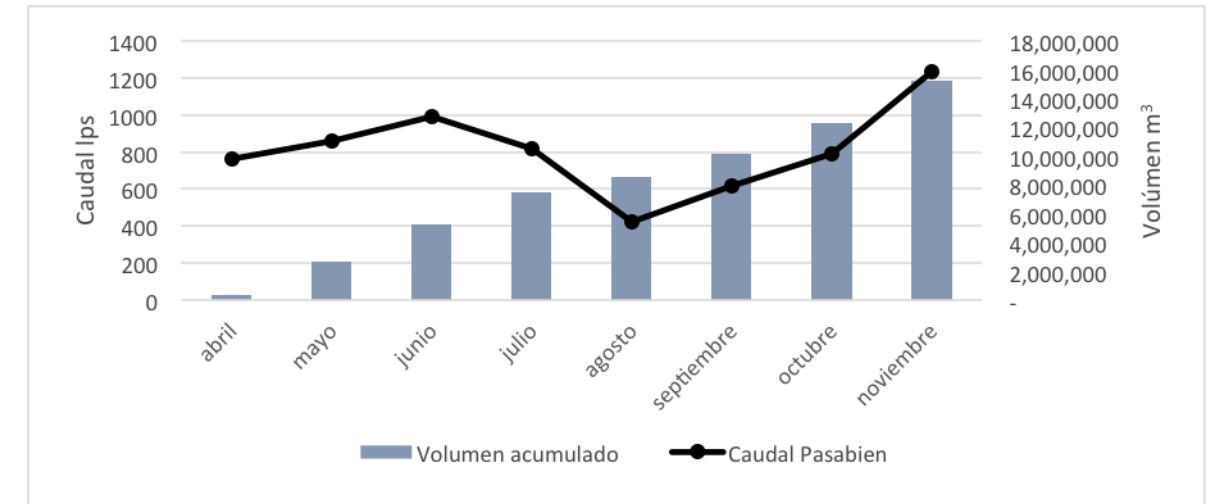


Figura 15: Caudal promedio mensual y caudal acumulado en el punto de aforo de Santa Rosalía (La presa de la hidroeléctrica), subcuenca Pasabién.

Ecosistema	Año 2015		Precipitación (m ³)	Recarga (m ³)	Caudal superficial (m ³)
	Precipitación (mm)	Recarga (mm)			
Bosque enano	2,971	678	43,078,050	9,837,151	
Bosque nuboso	1,162	406	34,267,200	11,982,747	
San Lorenzo Santa Rosalía	902	181	17,581,200	3,535,198	
Parte baja	512	47	12,292,800	1,135,727	
Pasabién	494	49	6,175,000	615,949	
TOTAL			113,394,250	27,106,772	No establecido
Parte alta y media de la subcuenca			94,926,450	25,355,097	15,257,525

Cuadro 6: Estimado de precipitación y recarga en lamina (mm) y volumen (m³) en las diferentes regiones ecológicas de la subcuenca Pasabién.

Modelo conceptual

La integración de la información geológica, climática e hidroquímica permite la construcción de un modelo conceptual de los procesos hidrogeológicos y el origen del agua de los pozos de ABASA (Figuras 16 y 17). Los datos de isótopos estables, calidad de agua y balance hídrico de suelos en un año seco indican claramente que el agua del acuífero de la parte baja de la subcuenca Pasabién se origina de las lluvias que caen principalmente durante la estación lluviosa, en la parte media y alta de la subcuenca Pasabién, entre 1,750 y 3,000 m s. n. m.

En la Figura 17 se ilustra la importancia del gradiente hidrostático para mantener la calidad de agua de los pozos de ABASA. Es decir, que la recarga hídrica ocurrida en la parte media de las subcuencas Pasabién y Teculután es responsable del abastecimiento cuantitativo y mantenimiento de la calidad del agua en acuíferos de la parte baja de las subcuencas que drenan desde la Sierra de las Minas, especialmente en aquellos sitios en donde existen afloramientos de mármol.

Con este análisis, se puede elaborar un perfil conceptual de hidrogeología y del origen del agua de los pozos ubicados en la parte baja de la subcuenca Pasabién. Lo más probable es que exista abastecimiento subterráneo desde la región de alta recarga, con presencia de mármol y caliza en la región de San Lorenzo y Santa Rosalía, hacia el acuífero ubicado en la parte baja de la subcuenca.

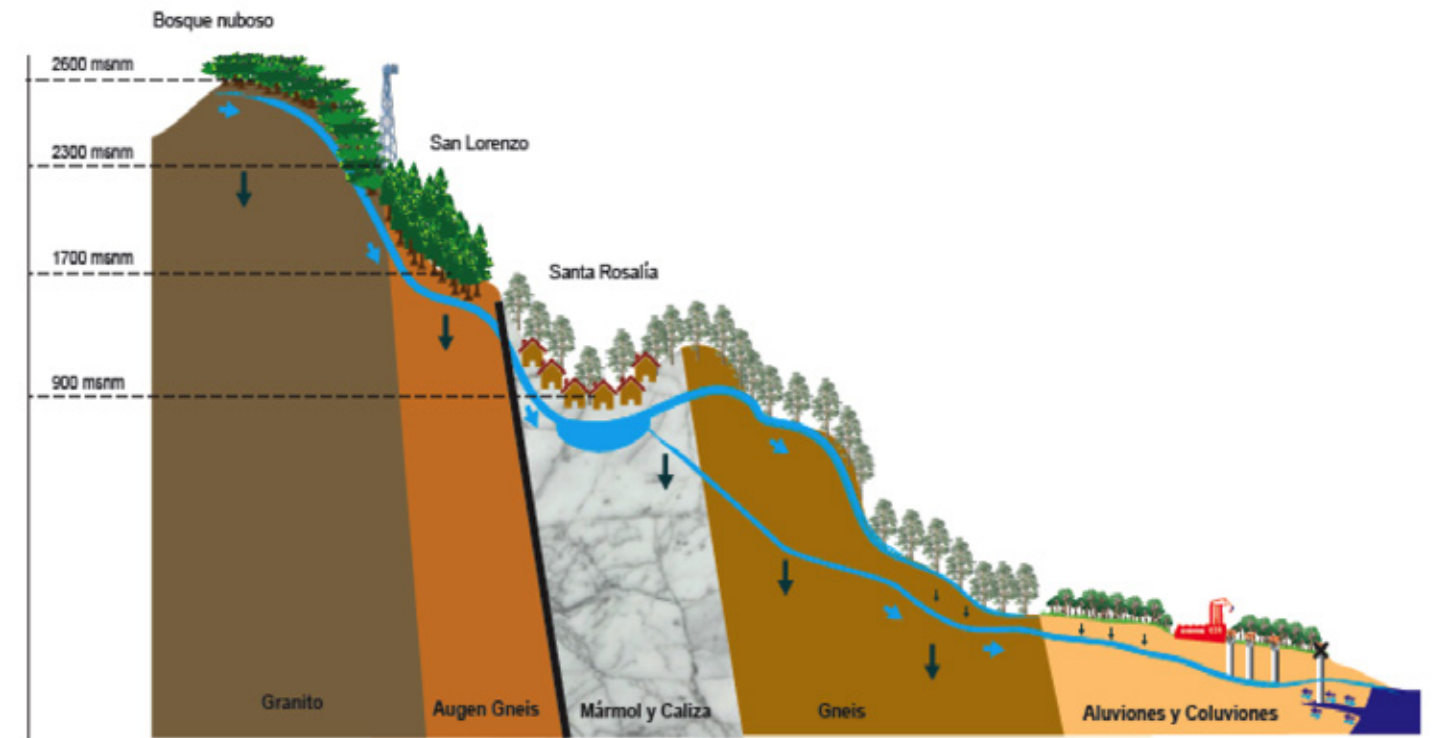


Figura 16: Perfil del modelo conceptual de la hidrogeología y el origen de agua de los pozos ubicados en la parte baja de subcuenca Pasabién.

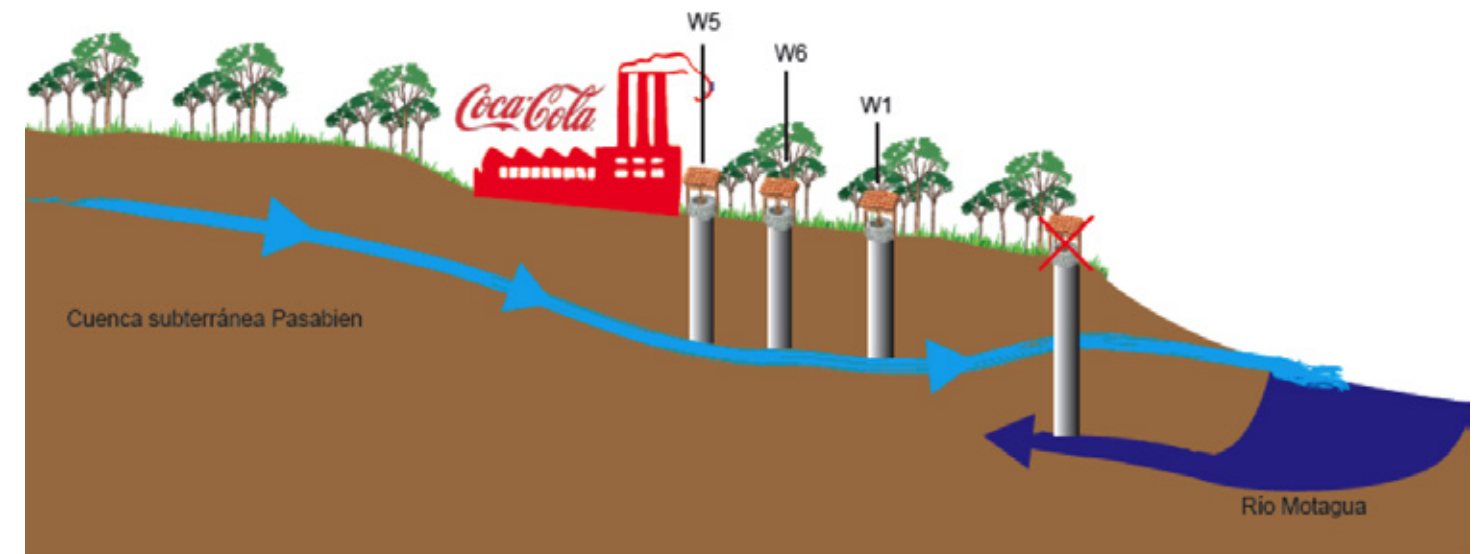


Figura 17: Modelo conceptual hidrogeológico de la parte baja de la subcuenca Pasabién (de acuerdo con el muestreo de isótopos y calidad de agua en el período febrero-noviembre de 2015).



CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

La información geológica contextual permitió definir que cerca del 90% del área de estudio presenta bajas capacidades para conformar acuíferos profundos importantes, debido a la predominancia de roca plutónica o de escaso metamorfismo poco permeables, tal como el granito, el gneis y el augen gneis.

Sin embargo, existen dos estratos propicios para la recarga hídrica profunda y posterior conformación de acuíferos según las características de alta fracturación y permeabilidad del material geológico constitutivo. Estos estratos son los denominados aluviones del cuaternario y afloramientos de mármol. Estos estratos están distribuidos en la parte baja (poblados de Pasabién y Teculután) y la parte media (poblados de Santa Rosalía y San Lorenzo).

Es posible diferenciar una región hidrogeológica más amplia que la subcuenca Pasabién y abarca parcialmente a las subcuencas de Teculután y Río Hondo. Destaca la presencia de fracturamiento geológico muy alto y la presencia de una franja de afloramiento de mármol.

La información climática histórica permitió definir una alta variabilidad interanual respecto a las precipitaciones a lo largo del gradiente altitudinal, desde la parte baja hasta la parte alta de la subcuenca Pasabién. Asimismo, se evidenció un gradiente altitudinal con un alto contraste respecto a los promedios de lluvia anual, lo cual es característico de las zonas de sotavento, en la parte baja (250 m s. n. m.) con lluvias promedio de 750 mm y en el bosque nuboso (de 2,200 hasta 3,000 m s. n. m.) con cerca de 3,000 mm.

Lo anterior, complementado con la información hidrológica histórica (período 1994-2015) del río Teculután (estación de aforo Las Minas), permitió definir el año de muestreo de 2015 como un año climático e hidrológicamente seco.

Todos los datos anteriores mostraron ser atributos biofísicos que contribuyeron significativamente para contextualizar y realizar el análisis y determinación del origen meteórico del agua subterránea de los pozos de ABASA.

Abajo se describen los hallazgos derivados del muestreo intensivo de agua de lluvia y escorrentía superficial (partes alta, media y baja), así como de agua subterránea (parte baja 250 m s. n. m.) y la determinación de cargas isotópicas del agua, específicamente de ^2H (deuterio) y ^{18}O :

a) Estos son los tres tipos de precipitaciones que afectaron al área de estudio: lluvias orográficas (lluvias pesadas) propias de la estación fría y seca, es decir, de noviembre a mayo; lluvias convectivas (lluvias livianas y mixtas), características de la estación lluviosa (paso de zona de convergencia intertropical), período de mayo a noviembre, y lluvias ciclónicas (livianas), también durante la estación lluviosa (octubre).

b) Conexión entre el caudal básico (agua subterránea) de la parte media de la subcuenca (escorrentía superficial) y el agua subterránea derivado de los pozos de ABASA (parte baja).

c) Se estableció una alta relación isotópica, por medio de promedios aritméticos (Figura 9), entre las lluvias del bosque nuboso (2,300 m s. n. m.) y bosque enano (2,600 m s. n. m.) con las aguas subterráneas provenientes de los pozos de ABASA. Esto identifica el origen meteorológico del agua de los pozos de ABASA y el acuífero correspondiente.

d) Constancia de los valores de cargas isotópicas del agua proveniente de los pozos de ABASA. Esto indica que el tránsito del agua desde que precipita en la parte alta de la subcuenca es mayor que un año. Además, que la recarga hídrica derivada de la lluvia ocurrida en la parte baja (valle del río Motagua) y de los aportes del agua del mismo río es proporcionalmente baja.

El muestreo de agua y el estudio de calidad de agua aportan los siguientes hallazgos:

a) El agua proveniente de los pozos de ABASA es de alta calidad, de acuerdo con los valores de oxígeno disuelto. Esto confirma los hallazgos discutidos anteriormente: baja contaminación por el curso de agua del río Motagua (evidentemente con alta contaminación y agua no potable). Sin embargo, existen informes de agricultores y pobladores cercanos a las instalaciones de ABASA sobre la existencia de pozos contaminados, generalmente ubicados cerca de sitios muy poblados o del curso del río Motagua.

b) Se estableció que los valores de dureza del agua proveniente de los pozos de ABASA son relativamente altos (índice mayor que 200). Además, se estableció la presencia de sílice (mayor que 70 ppm). Lo anterior sugiere alta residencia del agua en sitios con presencia de rocas calizas o mármol. El contacto del agua con estos materiales puede ser a altas profundidades en el valle del Motagua o en la parte media de la subcuenca Pasabién, formación de mármol existente entre los poblados de Santa Rosalía y San Lorenzo.

Los hallazgos a partir de la elaboración de balances hídricos de suelos realizados en las diferentes regiones ecológicas de la subcuenca Pasabién son los siguientes:

- a)** El ecosistema de mayor aporte en láminas de recarga hídrica en un año promedio histórico es el bosque nuboso (entre 2,000 y 2,600 m s. n. m.), con un estimado de 1,765 mm.
- b)** Aún en años secos (tal como el año 2015) existen valores significativos de recarga hídrica, como en el bosque enano (superior 2,650 m s. n. m.), especialmente en el mes de noviembre de 2015. Este ecosistema fue el único de los evaluados que no cambió significativamente el monto total anual de lámina de lluvia durante la estación lluviosa.
- c)** De acuerdo con las características hidrogeológicas, la región ecológica con mayor probabilidad de presentar altos valores de recarga hídrica profunda es en la parte media, particularmente en la región de rocas sedimentarias, mármol y rocas calizas. Esta región se caracteriza por tener rocas con altos valores de infiltración y muy alta presencia de fallas y fracturas. Lo anterior fue confirmado cuando se llevaron a cabo balances hídricos de suelos. Para el año 2015 (año muy seco) se estimó una recarga profunda de 10 millones de metros cúbicos al año. Esta es una característica importante para proporcionar alto grado de residencia del agua, una regulación anual del flujo hídrico mediante la conformación de acuíferos colgados y acuíferos libres, que liberan muy lentamente el agua subterránea. Una característica importante es que aumenta las probabilidades de contar con un flujo hídrico, tanto subterráneo como superficial en la parte baja, relativamente estable durante la estación seca. Además, se establece un gradiente de presión hidrostática que evita la contaminación de los pozos ubicados en la parte baja de la subcuenca Pasabién, sobre todo, de la empresa ABASA.

6. Bibliografía

- Bruijnzeel. (1990). Hydrology of moist tropical forest effects of conversion. A State of knowledge review. . Amsterdam: UNESCO, International Hydrological Programme.
- Bruijnzeel, S. (2008). Demonstrating hydrological benefits from tropical reforestation efforts. (pág. 31). Amsterdam: Vrije Universiteit.
- Custodio, & Llamas. (1983). Hidrología subterránea. Barcelona: Omega.
- Custodio, B., & Llamas, E. (2001). Recarga Hídrica. Madrid: Mundiprensa.
- FAO. (1992). Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Guía FAO Conservación. México: FAO.
- Frumau, K., Bruijnzeel, L., & Tobon, C. (2006). Hydrological measurement protocol for montane cloud forest. Annex 2, Final Technical Report DFID-FRP Project R7991. Amsterdam: Vrije Universiteit.
- García, G. (2007). An ecohydrological and soils study in a montane cloud forest in the National Park of Garajonay, La Gomera (Canary Island, Spain). Amsterdam: Vrije Universiteit.
- Hargreaves, & Samani. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Transactio of ASAE, 96-99.
- Herrera, I. (1995). Manual de Hidrología. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- IDEAM. (2010). Protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua. Lima, Perú: IDEAM.
- Instituto Nacional de Bosques. Guatemala. (2003). Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural. Manual Técnico. Guatemala: INAB.
- Kimaro, D., Poesen, J., Msanya, B., & Deckers, J. (2008). Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interril and Ril erosion. Catena, 75 38-44.

- Linsley, R. J. (1988). Hidrología para ingenieros. México: Mc Graw Hill.
- Loening, L., & Markussen, M. (2003). Pobreza, Deforestación y Pérdida de la biodiversidad en Guatemala. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen.
- Martin, E. M. (2003). Local Knowledge of Biodiversity and Water Conservation within Multi-Strata Coffee Agroforestry Systems, River Hato Watershed, El Progreso Department, Guatemala. University of Wales, Forestry . Wales: Forestry of University of Wales.
- Martinez, N. y. (1998). Hidrología Forestal. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Mathewson, K. (2004). A century and counting: Geographical research on Guatemala a historical perspective. (L. S. Department of Geography and Anthropology, Ed.) Geoforum.
- Naturaleza, F. D. (2003). III Plan Maestro 2003-2008 de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas. Guatemala: Fundación Defensores de la Naturaleza.
- OMM, Organización meteorológica Mundial . (1994). Guía de prácticas hidrológicas. Washington: Organización Meteorológica Mundial.
- Sandoval, I. (1989). Principios de riego y drenaje. Guatemala: Facultad de Agronomía, Universidad de San carlos de Guatemala.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial mediante el balance hídrico de suelos. Revista geológica de América Central, 13-30.
- Tobón, C. (2009). Protocolo de mediciones hidrológicas, de erosión y biológicas en la cuenca del río Jequetepeque, Perú. Bogotá: Universidad nacional de Colombia.
- Van Dijk, A. (2003). Ecohydrology. Course Reader. Amsterdam: Vrije Universitet.
- WWF (2007). Evaluación hidrológica de las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo. Guatemala. (pág. 15, 24, 39 y 40). Avalos, O.; Rosito, J.