Universidad Nacional

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

Escuela de Ciencias Ambientales

Licenciatura en Gestión Ambiental con énfasis en Tecnologías Limpias

ESCENARIOS DE DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO PORROSATÍ, HEREDIA, COSTA RICA

Tesis de grado para optar por el título de Licenciatura en Gestión Ambiental

ESTEBAN MONTERO SÁNCHEZ

Campus Omar Dengo

Heredia, Costa Rica

2016

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, compañeros de distintas carreras, profesores, lectores y tutor por el gran apoyo brindado.

A las Asadas de San Pedro, San José de la Montaña, Puente Salas y a la empresa de Servicios Públicos de Heredia por la confianza y respaldo.

A la naturaleza, motor de mis estudios y esta investigación.

ACTA DE APROBACIÓN

El Tribunal Examinador aprobó el trabajo titulado:

ESCENARIOS DE DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO PORROSATÍ, HEREDIA, COSTA RICA

Como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Gestión Ambiental con énfasis en Tecnologías Limpias

Miembros del Tribunal

Decano Facultad de Tierra y Mar
Tomás Marino Herrera

Representante de la Escuela de Ciencias Ambientales
M. Sc. Sonia Arguedas Quiros

Ph. D. Jorge Herrera Murillo
Tutor

M. Sc. Pablo Ramírez Granados
Lector

M. Sc. Franz Ulloa Chaverrí
Lector

Esteban Montero Sánchez
Sustentante

Fecha:_____

TABLA DE CONTENIDOS

Tabla de Contenidos III
Índice de Figuras VI
Índice de Tablas VIII
Resumen 1
1. INTRODUCCIÓN 2
2. JUSTIFICACIÓN 4
3. OBJETIVOS 7
3.1 Objetivo general 7
3.2 Objetivos específicos 7
4. MARCO TEÓRICO 8
4.1 Ciclo hidrológico y agua para consumo humano 8
4.2 Modelado del efecto de la variabilidad climática en agua subterránea 9
4.3 Clima 11
4.4 Modelado de escenarios climáticos 12
4.5 Cuenca y microcuenca hidrográfica 14
4.6 Uso de la tierra 14
4.7 Tecnologías limpias para la adaptación y resiliencia en el manejo de cuencas hidrográficas 15
5. MARCO METODOLÓGICO 17
5.1.1 Área de estudio 17
5.2 Fase I: Diagnóstico de las condiciones hidrológicas de la microcuenca del río Porrosatí 18
5.2.1 Información de los entes encargados del suministro de agua en la microcuenca 19
5.2.2 Depuración de la base de datos de concesiones de agua en la microcuenca del río Porrosatí 19
5.2.3 Corrección y rellenado de información meteorológica 20
5.3 Fase II: Balance y comportamiento hídrico en el periodo 2000-2014 21
5.3.1 Balance hídrico 22
5.3.2 Fracción de lluvia interceptada por el follaje 22
5.3.3 Coeficientes de infiltración 22
5.3.4 Infiltración por efecto del suelo 23
5.3.5 Muestreo de suelo 24

5.3.6 Precipitación que infiltra en el suelo 25
5.3.7 Balance del agua en el suelo 27
5.3.8 Evapotranspiración 27
5.3.9 Recarga al acuífero 29
5.3.10 Estimación de la humedad inicial en un mes seleccionado 29
5.3.11 Cálculo de recarga potencial al acuífero 32
5.3.12 Zonas de balance hídrico 33
5.3.13 Dinámicas de cambio de uso de la tierra periodo 2000-2014 35
5.3.14 Coeficiente de impermeabilización 36
5.4 Fase III: Escenarios de recarga y demanda hídrica en los tractos temporales 2025-2030 y 2050-2055 37
5.4.1 Datos climáticos 38
5.4.2 Determinación de los escenarios de temperatura y precipitación 2020-2015 y 2050-2055 39
5.4.3 Escenario de uso de la tierra 2020-2025 y 2050-2055 39
5.5 Fase IV: Recomendaciones a la gestión integral del recurso hídrico en la microcuenca, apoyadas en el uso de tecnologías limpias 40
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 41
6.1 Fase I: Diagnóstico de las condiciones hidrológicas en la microcuenca del río Porrosatí 41
6.1.1 Caracterización biofísica de la microcuenca 41
6.1.2 Clasificación en tipo de usuario 43
6.1.3 Principales características biofísicas en relación con el comportamiento hidrológico en la microcuenca del río Porrosatí 44
6.1.4 Uso de la tierra 48
6.1.5 Concesiones de agua dentro de la microcuenca del río Porrosatí 50
6.1.6 Comportamiento de la precipitación en la microcuenca del Porrosatí de 2000 a 2014 53
6.1.7 Comportamiento hidrométrico de manantiales 56
6.2 Fase II: Balance y comportamiento hidrológico en el periodo 2000-2014 en la microcuenca del río Porrosatí 62
6.2.1 Recarga potencial al agua subterránea en el periodo 2000-2015 62
6.2.2 Dinámica de las áreas de recarga en el periodo 2000-2014 en la microcuenca del río Porrosatí 63
6.2.3 Volumen anual de agua recargado al agua subterránea en la microcuenca del río Porrosatí, periodo 2000-2014 64
6.2.4 Respuesta de los volúmenes de recarga ante fenómenos atmosféricos 65

6.2.5 Volumen de recarga potencial por zonas dentro de la microcuenca del río Porrosatí en el periodo 2000-2014 66

6.3 Fase III: Escenarios de recarga hídrica en los periodos 2025-2035 y 2050-2055 71

6.3.1 Recarga potencial al agua subterránea en el periodo 2025-2030 71

6.3.2 Recarga potencial al agua subterránea en el periodo 2050-2055 72

6.3.3 Escenarios de uso de la tierra para el mediano y largo plazo en la microcuenca del río Porrosatí 73

6.3.4 Escenarios de volumen de recarga en el mediano plazo 73

6.3.5 Escenarios de uso de la tierra para el mediano y largo plazo en la microcuenca del río Porrosatí. 74

6.3.6 Escenarios de volumen de recarga en el largo plazo 75

6.3.7 Comparación entre la recarga potencial basada en registros y los escenarios a mediano y largo plazo 75

6.3.8 Comparación del comportamiento del volumen de recarga en el periodo 2000-2014 y los escenarios de volúmenes de recarga 77

7. Fase IV: Recomendaciones para la gestión del recurso hídrico en la microcuenca priorizando el consumo humano, apoyadas en el uso de tecnologías limpias 81

7.1 Gobernanza climática: eje social y político en la gestión del recurso hídrico y las tecnologías limpias 81

7.1 Zonificación para la conservación de áreas de importancia hídrica dentro de la microcuenca del río Porrosatí en el mediano y largo plazo 84

7.2 Otras medidas basadas en tecnologías limpias para asegurar la disponibilidad del recurso hídrico en la microcuenca del río Porrosatí 87

8. Conclusiones 89

9. BIBLIOGRAFÍA 92

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Ubicación de la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia. 18
Fig. 2. Zonas de recarga establecidas para los balances hídricos dentro de la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia 35
Fig. 3. Ubicación de las fuentes de agua de los entes operadores en la microcuenca 42
Fig. 4. Proporción de usuarios según clasificación por tipo de uso del agua. Fuente: Elaboración propia. 44
Fig. 5. Modelos de elevación digital de la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia. 45
Fig. 6. Escala de pendientes en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia. 46
Fig. 7. Conformación geomorfológica de la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia 48
Fig. 8. Uso del suelo en la microcuenca del río Porrosatí, 2015. Fuente: Elaboración propia. 50
Fig. 9. Concesiones de agua según origen dentro de la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia. 52
Fig. 10. Comportamiento de la precipitación mensual en las estaciones con influencia en la microcuenca del río Porrosatí, 2000-2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN corregidos. 54
Fig. 11. Comparación del comportamiento mensual de las estaciones en el periodo 2001-2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN. 55
Fig. 12. Comportamiento hidrométrico de la naciente Chagos del año 2010 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN. 56
Fig. 13. Comportamiento hidrométrico de la naciente Calle Segura del año 2010 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN. 57
Fig. 14. Comportamiento hidrométrico de la naciente Steinvorth del año 2010 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN. 58
Fig. 15. Comportamiento hidrométrico de la naciente Naranjo del año 2010 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN. 58
Fig. 16. Comportamiento hidrométrico de la naciente Centro del año 2010 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN. 59
Fig. 17. Comportamiento hidrométrico de la naciente Bosque del año 2010 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN. 59
Fig. 18. Comparación del comportamiento hidrométrico de las seis naciente en el periodo 2010-2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN. 60
Fig. 19. Hidrograma de precipitación quincenal acumulada y variaciones de caudal en las nacientes de la Asada de San Pedro, 2010-1014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN y Asada San Pedro. 61
Fig. 20. Valores de recarga potencial mensual en el periodo 2000–2014 en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia. 62
Fig. 21. Volúmen anual de agua recargado en la microcuenca del río Porrosatí en el periodo 2000-2014. Fuente: Elaboración propia. 64

Fig. 22. Relación de volumen de recarga en la microcuenca del río Porrosatí y el Índice Oceánico del Niño en el período 2000-2015. Fuente: Elaboración propia y datos NOAA (2016). 66
Fig. 23. Recarga potencial anual (m) por zonas para el año 2000. Fuente: Elaboración propia. 67
Fig. 24. Recarga potencial anual (m) por zonas para el año 2008. Fuente: Elaboración propia. 68
Fig. 25. Recarga potencial anual (m) por zonas para el año 2009. Fuente: Elaboración propia. 69
Fig. 26. Recarga potencial anual (m) por zonas para el año 2012. Fuente: Elaboración propia 70
Fig. 27. Recarga potencial mensual en el periodo 2025-2030 en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia. 71
Fig. 28. Recarga potencial mensual en el periodo 2050-2055 en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia. 72
Fig. 29. Escenario de volumen de recarga (hm3) para el periodo 2025-2030 en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia. 74
Fig. 30. Escenario de volumen de recarga (hm3) para el periodo 2025-2030 en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia. 75
Fig. 31. Comportamiento mensual de la recarga potencial en periodos de 5 años. Fuente: Elaboración propia. 76
Fig. 32. Comportamiento mensual del volumen de recarga en periodos de 5 años. Fuente: Elaboración propia. 78
Fig. 33. Proceso para la transferencia del conocimiento científico en clima y gestión del Recurso Hídrico para el aumento de la resiliencia de la disponibilidad de agua. Fuente: Elaboración propia. 82
Fig. 34. Proceso iterativo para las acciones de adaptación. Fuente: Modificado de PROVIA-UNEP (2003). 83
Fig. 35. Acciones basadas en tecnologías limpias en los sectores domiciliar, agropecuario y comercial industrial para el uso eficiente del agua en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia. 84
Fig. 36. Propuesta de priorización para la conservación de zonas de recarga en el mediano y largo plazo en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia. 85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios para la escogencia de estaciones para interpolaciones de datos meteorológicos 21
Tabla 2. Componentes del coeficiente de infiltración Kp y Kv 23
Tabla 3. Parámetros y métodos empleados para la determinación de condiciones hidráulicas del suelo 25
Tabla 4. Ecuaciones para la determinación de la precipitación que infiltra 26
Tabla 5. Ecuaciones para el balance de humedad en el suelo 30
Tabla 6. Ecuación para la determinación de la recarga potencial 33
Tabla 7. Características hidrológicas en las zonas de balance para la microcuenca del río Porrosatí 34
Tabla 8. Ubicación de manantiales georeferenciados pertenecientes a los diferentes acueductos en la microcuenca del río Porrosatí, 2013 41
Tabla 9. Distribución de abonados según el uso del agua de la población abastecida con fuentes dentro de la microcuenca 43
Tabla 10. Distribución de la pendiente según rangos 47
Tabla 11. Proporción en usos del suelo en la microcuenca del río Porrosatí, 2015 49
Tabla 12. Concesiones de agua registradas en la microcuenca del río Porrosatí 51
Tabla 13. Características de los datos de precipitación de las estaciones con influencia del área de estudio (mm) 55
Tabla 14. Área efectiva de recarga para cada zona de balance hídrico en la microcuenca del río Porrosatí (km^2) 63
Tabla 15. Escenarios de área de recarga por zonas para el mediano plazo, periodo 2025-2030 (km^2) 73
Tabla 16. Escenarios de área de recarga por zonas para el largo plazo, periodo 2050-2055 (km^2) 74
Tabla 17. Promedio del volumen de recarga entre los períodos 2000-2014 y los escenarios de mediano y largo plazo 77
Tabla 18. Promedio del volumen de recarga entre los períodos 2000-2014 y los escenarios de mediano y largo plazo 78
Tabla 19. Descripción de los factores utilizados para la priorización dentro de la microcuenca del río Porrosatí 86

RESUMEN

Se analizó la disponibilidad de agua para consumo humano con énfasis en la recarga de agua subterránea en la microcuenca del río Porrosatí. Esta microcuenca se caracteriza por una importante densidad de afloramientos naturales de agua subterránea, los cuales abastecen a cerca de 25 000 personas de manera directa por medio de entes como las ASADAS, las municipalidades y la Empresa de Servicios Públicos de Heredia. Además, se encuentra en una importante zona de recarga de agua subterránea de los acuíferos Barva y Colima, los cuales abastecen a más de la mitad de la población del Valle Central de Costa Rica.

El análisis de la recarga de agua subterránea muestra una alta sensibilidad ante las variaciones climáticas, principalmente en los años bajo la incidencia de eventos como El Niño o La Niña, pese a que solo se presentaron eventos de magnitud leve o moderada.

El cambio de uso de la tierra mostró una tendencia constante hacia la disminución de usos agrícolas y de cultivos para dar paso al aumento del uso urbano, principalmente hacia las partes medias y bajas de la microcuenca. El incremento del área urbana disminuyó las áreas de recarga por efecto de impermeabilización del suelo, lo cual tuvo un efecto notorio sobre la capacidad de recarga.

Los escenarios de disponibilidad muestran comportamientos atípicos con cambios significativos en el comportamiento estacional de la recarga, los cuales se originaron basados en las proyecciones climáticas bajo un escenario de emisiones A2 en los periodos 2025-2030 y 2050-2055. Los escenarios indican una disminución relevante debido al aumento del área impermeabilizada si se continúa con las tendencias de cambio de uso mostradas en los últimos 15 años. Tanto las proyecciones climáticas como las de uso de la tierra presentan un escenario complejo con limitaciones a la recarga hídrica de agua subterránea y, por ende, a la disponibilidad de agua para consumo humano en el mediano y largo plazo.

Se propuso una priorización de zonas por proteger dirigida a los entes encargados del suministro de agua para consumo humano en la microcuenca mediante diferentes mecanismos para asegurar la recarga de agua en el subsuelo, así como otras medidas para aumentar la resiliencia de los sistemas de abastecimiento y el manejo de variables hidrológicas

1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de recurso hídrico para el abastecimiento de consumo humano es un tema de relevancia mundial (Prieto 2004). La presión sobre el recurso por el incremento poblacional y el agotamiento de sus fuentes es un fenómeno complejo de variados origines. Factores como la impermeabilización de zonas de recarga, la ausencia de planificación en cuanto a las capacidades de abastecimiento de los entes, el crecimiento demográfico y la alteración del comportamiento climático aumentan la incertidumbre y complejidad respecto a los escenarios de disponibilidad del agua en el corto y mediano plazo (Ureña 2005).

En los últimos años se ha discutido con preocupación la incidencia de los patrones climáticos globales sobre el recurso hídrico (Fowler et al. 2007), debido a que la irregularidad del comportamiento atmosférico puede provocar potenciales alteraciones del ciclo hidrológico en distintas escalas (Marshall & Plumb 2013). Esta inestabilidad resulta dificultosa de predecir por la gran cantidad de variables inmersas y la especificidad de cada sistema hidrológico.

Dentro de las variaciones del clima que han sido reportadas en la historia reciente, se encuentra el aumento de la temperatura atmosférica (Stocker et al. 2013). El ascenso de la temperatura promedio modifica los rangos de evaporación del agua en el suelo y superficies acuáticas. En el caso de las superficies terrestres, la temperatura tiene efectos directos sobre los valores de evapotranspiración, siendo este factor a su vez, una limitante de la cantidad de agua en el subsuelo y, por ende, de la recarga de agua subterránea (Losilla & Schosinsky 2000).

Por otro lado, la distribución, frecuencia e intensidad de los eventos de precipitación es otro efecto esperado. Los volúmenes de lluvia determinan en buena medida el comportamiento de los sistemas hidrológicos (Prieto 2004). La alteración de patrones históricos pone en riesgo el comportamiento de las fuentes de agua; de manera evidente, la ausencia prolongada de precipitación impide el reabastecimiento de los sistemas. Las condiciones secas acompañadas de temperaturas altas provocan un efecto de reforzamiento que incrementa el estrés hídrico y puede desencadenar en crisis de disponibilidad (Stocker et al 2013).

A su vez, las variaciones en la distribución e intensidad de los eventos de lluvia pueden generar inestabilidad respecto a la planificación de uso del recurso. Los eventos de mucha intensidad, pese al gran volumen de agua caída que representan, no benefician necesariamente la disponibilidad de agua para consumo humano. Una mayor intensidad hace que el suelo no tenga la capacidad suficiente para percolar el líquido a profundidades mayores por lo que su saturación incrementa el porcentaje de agua por escorrentía (Schosinsky 2006).

En Costa Rica, la población del Gran Área Metropolitana (GAM) consume en su gran mayoría agua de origen subterráneo (Reynolds 2002). La razón de este comportamiento se justifica en la existencia de reservorios subterráneos asociados a formaciones volcánicas de gran magnitud que han abastecido históricamente a la población dentro de este territorio (Denyer & Kussmaul 2000). Otro motivo de importancia de la predilección por el agua de origen subterráneo es representar un proceso de potabilización más simple que el agua de origen superficial.

Así, el entendimiento de los procesos hidrológicos involucrados en la recarga de los acuíferos del Valle Central es fundamental. En este sentido además de los procesos naturales, entran en juego factores antrópicos que pueden afectar de manera significativa la recarga de agua y con ello el abastecimiento de la población. La alteración de las condiciones naturales por el cambio de uso de la tierra provoca variaciones considerables que pueden ser irreversibles.

El uso urbano tiene un efecto impermeabilizador que produce la inexistencia de recarga hacia los reservorios subterráneos y aumenta la escorrentía superficial. Este efecto tiene repercusiones graves en zonas de alta recarga por lo que su estudio es un tema de tanta relevancia como el de la afectación por factores climáticos.

La generación de escenarios es una herramienta vital para la toma de decisiones y acciones sobre el manejo, uso y preservación del agua. Pese a la incertidumbre que implica realizar escenarios de variables como el clima o el uso de la tierra en el futuro, los esfuerzos en esta dirección son valiosos en cuanto se van perfeccionando las técnicas y manejo de datos (Dawes et al. 2012). En este sentido, el análisis de la disponibilidad de agua utilizando la cuenca hidrográfica como unidad de análisis permite una visión integral de todos los datos que entran en juego con relación a la recarga de agua subterránea y la disponibilidad de agua para la población inmersa dentro de esta área.

Con esto presente, el proyecto de tesis *Escenarios de disponibilidad de agua para consumo humano en la microcuenca del río Porrosatí* pretende hacer un acercamiento entre el análisis de registros históricos de clima y uso de la tierra con respecto a los procesos de recarga en el periodo 2000-2014 y la generación de escenarios de disponibilidad hídrica con datos climáticos de alto detalle y escenarios de uso de la tierra basados en el análisis de las dinámicas de cambio en los últimos 17 años en la microcuenca en estudio.

2. JUSTIFICACIÓN

La disponibilidad del agua para consumo humano ha sido una preocupación permanente desde el inicio de las civilizaciones (Prieto 2004). La dependencia del líquido va más allá de las necesidades vitales, al ser necesaria para una gran cantidad de actividades que van desde la agricultura hasta procesos industriales (Mora 2009).

El agua resulta fundamental para la salud del ser humano, particularmente en los procesos de nutrición y sanidad. Según Mora (2009), la cobertura de agua para consumo humano de calidad potable tiene una correlación positiva con los indicadores básicos de salud. Sin embargo, no se puede hablar de calidad de agua sin antes hacer referencia a la disponibilidad.

Dentro de los principales factores que afectan la disponibilidad del recurso, se encuentran la disminución de cobertura vegetal, seguida de la impermeabilización por concepto de urbanización y las variaciones en precipitación y temperatura que afectan los procesos naturales del agua subterránea y superficial (Dawes et al. 2012). Por otro lado, el aumento de la población y las actividades asociadas a su desarrollo incrementan la presión sobre el recurso (UNESCO 2012; Ureña 2005).

Sumado a los puntos anteriores, se debe tomar en cuenta la incidencia del cambio climático sobre las fluctuaciones meteorológicas, las cuales podrían recrudecer las condiciones con épocas secas más secas y calientes, así como temporadas lluviosas con precipitaciones extremas más frecuentes (Sánchez et al. 2011). En el último siglo se han comprobado aumentos de la temperatura promedio en extensas áreas del mundo, además en lo que va del nuevo milenio se han sobrepasado los récords de temperatura promedio en repetidas ocasiones (Stocker et al. 2013).

La situación en Centroamérica es apremiante, pues esta zona ha sido denominada como “zona caliente”, en donde se espera que las variaciones climáticas se comporten con mayor intensidad, lo que aunado a la vulnerabilidad de sus países, hacen prever situaciones críticas (Galindo 2014). Se espera que el sector de abastecimiento de recurso hídrico sea uno de los más perjudicados por estas condiciones en la región, tanto por la escasez de agua en distintas épocas del año como por la afectación a la infraestructura de abastecimiento y la poca capacidad de respuesta de muchos de los entes encargados.

Específicamente en la zona del Valle Central se pronostica una reducción de entre -15 a -35 % en las regiones donde se estima menos lluvia que en la actualidad. El comportamiento puede ser similar al presentado en épocas del fenómeno El Niño/ Oscilación del Sur (ENOS), en donde los eventos de sequía o precipitación suceden

de manera extrema (Alvarado et al. 2012). Estos escenarios pronostican panoramas de mucha incertidumbre y compleja planificación.

Costa Rica es un país con abundantes recursos hídricos, no obstante, su distribución está sujeta a importantes variaciones geográficas, climáticas y de gestión, creando problemas de disponibilidad para sus pobladores (Varela 2007). En extracción de agua, el país ocupa el segundo lugar a nivel centroamericano pese a su limitado espacio terrestre (CEPAL 2010). Evaluaciones como las realizadas por el Instituto Meteorológico Nacional (2008), evidencian la vulnerabilidad de los sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano. Dentro de los principales factores que generan la alta vulnerabilidad de los sistemas, se encuentran la alta dependencia y sensibilidad de las fuentes de agua ante el comportamiento climático, las debilidades de los entes encargados del suministro en áreas como infraestructura y planificación en el mediano y largo plazo, además de otros factores como el incremento de la densidad poblacional y el aumento de la presión sobre áreas de recarga (Green et al, 2011)

En el Gran Área Metropolitana (GAM), más del 65 % de la población es abastecida con agua proveniente de fuentes subterráneas, principalmente de los acuíferos Barva y Colima (Reynolds 2002). Sin embargo, las implicaciones directas del cambio climático sobre el agua subterránea ha sido un tema rezagado a nivel global dentro de los posibles impactos por considerar, en donde Costa Rica no es la excepción (Bates et al. 2008).

En este sentido, las cuencas hidrográficas como unidad territorial de delimitación ofrecen un panorama amplio para el análisis de los factores naturales involucrados en la disponibilidad de agua para consumo humano y cómo estos pueden ser afectados por acciones antropogénicas. La cuenca hidrográfica del río Tárcoles cubre gran parte del área metropolitana del país, siendo a su vez la subcuenca del río Virrilla la más densamente poblada (Mora 2009). El abastecimiento de agua del que se nutre la población dentro de esta subcuenca, se ha visto comprometido por cantidad o calidad en el pasado reciente (Reynolds & Fraile 2009). A su vez, en las partes altas de esta subcuenca se hallan diversas microcuencas en las cuales ocurren los mayores volúmenes de recarga, según Ramírez (2007).

Dentro de estas, sobresale la microcuenca del río Porrosatí, encontrándose una gran cantidad de afloramientos naturales que abastecen de forma directa a cerca de 50 mil personas y probablemente a una cifra mayor de manera indirecta (Sibaja 2013). Esta microcuenca nace en las faldas del volcán Barva y se extiende por zonas que combinan una serie de características hidrogeológicas y ecológicas que la hacen poseedora de un alto potencial para la recarga acuífera, por tanto se seleccionó como indicadora de la respuesta de los sistemas acuíferos locales a la variabilidad climática y de usos de la tierra por concepto de cambios en producción

de manantiales. Esta condición hace que la microcuenca tenga una alta importancia dentro del abastecimiento de las ASADAS, ESPH y acueductos municipales, por lo que el riesgo de afectación es mayor.

Muestra de la susceptibilidad a las condiciones meteorológicas de los sistemas hídricos pertenecientes a la microcuenca del río Porrosatí, son los constantes racionamientos que deben aplicar tanto las ASADAS como la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH) en las temporadas secas. Por ende, se plantea que no existe información científica que muestre el comportamiento de la recarga ante las variaciones climáticas que les permita a los encargados del suministro de agua tomar prevenciones y políticas de mediano o largo plazo.

La Contraloría General de la República en el informe Nro. DFOE-AE-IF-07-2012, del 28 de noviembre sobre la eficacia y eficiencia de la ESPH en garantizar la prestación del servicio de abastecimiento de agua potable, señala que la institución no cuenta con la capacidad de asegurar la sostenibilidad del suministro. Dentro del informe se muestran datos de suma relevancia en los cuales se indica una tendencia a la baja en la producción mensual de agua en las fuentes captadas desde el año 2008.

En el rubro de consumo de agua, los datos históricos de la ESPH muestran que desde 2004 el consumo de agua per cápita ha disminuido, no obstante, el consumo total ha aumentado debido principalmente al crecimiento demográfico y la progresión del sector industrial y comercial en las zonas cubiertas por la empresa (CGR 2012).

La disminución de la producción de agua en las fuentes y el aumento del consumo total han provocado momentos en los que la capacidad de abastecimiento es superada por la demanda, lo cual pone en riesgo la disponibilidad de agua para los sectores abastecidos por la ESPH, como se describe textualmente en el informe:

> El comportamiento descrito se explica por tres factores. El primero es que los cambios estacionales reducen los caudales en las zonas de captación. El segundo radica en que no se ha ampliado suficientemente la capacidad instalada de captación de fuentes superficiales y subterráneas. En tercer lugar, el crecimiento del número de hogares, industrias y comercios ha llevado a que las fuentes explotadas resulten insuficientes (CGR 2012: 5).

En cifras, el consumo mensual per cápita experimentó una disminución, al pasar de 6,42 m^3 en el año 2004 a 6,14 m^3 en el 2011 (CGR 2012).

La ESPH posee una amplia gama de fuentes captadas tanto subterráneas como superficiales, las cuales en su mayoría están ubicadas en las zonas altas de los

cantones de Barva, San Rafael y San Isidro; y específicamente dos de las captaciones de marcada importancia se localizan dentro del área de estudio.

La poca información disponible en cuanto a la cantidad de agua en el futuro causa incertidumbre en la adopción de políticas o medidas que permitan crear una adecuada planificación del recurso (UNESCO 2012). Teniendo en cuenta la dependencia de fuentes subterráneas para el abastecimiento de agua de la población en la microcuenca, existe una ausencia significativa de bases científicas que permitan tomar decisiones basadas en datos respecto a la planificación del recurso en la microcuenca.

En consideración a lo anterior, el presente estudio está dirigido a los diferentes actores involucrados en la gestión del agua para uso y consumo humano y pretende ofrecer un respaldo científico y proyecciones confiables de las distintas formas de protección del recurso hídrico para consumo humano y las posibles medidas de adaptación en la microcuenca del río Porrosatí.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Generar escenarios de disponibilidad de agua para consumo humano a corto y largo plazo en relación con la recarga de agua subterránea en la microcuenca del río Porrosatí.

3.2 Objetivos específicos

1. Elaborar un diagnóstico de las condiciones hidrológicas de la microcuenca del río Porrosatí.
2. Efectuar un balance hídrico histórico que permita establecer relaciones hidrológicas entre datos meteorológicos y el comportamiento hidrométrico de los manantiales en la microcuenca.
3. Generar escenarios de recarga hídrica en los tractos temporales 2025-2030, que representa el corto plazo, y 2050-2055, en referencia al largo plazo, considerando los cambios del uso de la tierra.
4. Elaborar recomendaciones apoyadas en el uso de tecnologías limpias para la gestión del recurso hídrico en la microcuenca, priorizando el consumo humano.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Ciclo hidrológico y agua para consumo humano

El ciclo hidrológico integra todos los procesos de circulación que el agua en sus diferentes estados lleva a cabo. En el caso de las zonas tropicales, la inexistencia de nevadas hace de la precipitación líquida el mayor aporte de humedad a los ecosistemas terrestres (Prieto 2004). En términos de consumo humano, la disponibilidad de agua comprende la cantidad a la que puede acceder una persona o población de manera práctica y apta para su consumo (Gavidia & Rueda 2006). Pese a que en general la región latinoamericana posee altos valores de precipitación, generando importantes cantidades del recurso, estos no son distribuidos regularmente en el espacio y el tiempo, lo que condiciona su accesibilidad (PNUMA 2003).

En los últimos años, se ha experimentado un crecimiento en la preocupación por la disponibilidad de agua para consumo humano a nivel mundial (PNUMA 2003). Aunque en la región latinoamericana aún se cuenta con un índice de disponibilidad por habitante alto en comparación con otras regiones del mundo, la cantidad ha venido decreciendo de forma significativa tanto por la alteración del ciclo hidrológico como por factores humanos y el incremento de la presión por el líquido (Gavidia & Rueda 2006). El país parece seguir la misma tendencia regional y mundial, al deteriorarse las zonas de recarga acuífera y aumentar la demanda de agua, sin embargo, se carece de programas de investigación al respecto (Mora 2009). Los principales agravantes en la disponibilidad del recurso definidos en el presente estudio, serán las fluctuaciones meteorológicas por causa del cambio climático y el cambio de uso de la tierra inducido por la dinámicas antropogénicas.

Las principales fuentes de agua pueden ser subterráneas, superficiales o directamente de la recolección de aguas llovidas. El agua subterránea incluye todos los reservorios de agua en el subsuelo (Dawes et al. 2011). Las fuentes subterráneas representan el 6 % de la proporción de masas del agua del planeta y constituyen una proporción de suma relevancia en el abastecimiento del líquido para consumo humano. La recarga de estos reservorios está dada por la combinación de factores, dentro de los que se encuentran la infiltración y percolación de precipitación meteórica, conexiones hidráulicas entre fuentes superficiales como ríos y lagos y la recarga por deshielo en zonas bajas (Glynn & Heinke 1999).

El agua de origen subterránea es la de mayor importancia en Costa Rica, específicamente en el Valle Central abastece a cerca del 65 % de la población (Reynolds 2002). En términos generales, para el almacenamiento de estos reservorios se sigue una circulación que comprende la infiltración en el suelo tras un evento de precipitación y el movimiento y percolación a través de las diferentes

capas del subsuelo. En este proceso suceden pérdidas por conceptos de escorrentía superficial y evapotranspiración de la vegetación (Fowler et al. 2007).

La velocidad de recarga puede variar enormemente y está determinada por las diferentes estructuras geológicas geomorfológicas de un lugar (Denyer & Kussmaul 2000). Esta velocidad determina la velocidad de regenerarse de una fuente subterránea y junto con el tamaño del reservorio da cuenta de la capacidad de aprovechamiento que es capaz de soportar sin comprometer el servicio ecosistémico en el futuro (Kurylyk & MacQuarrie 2013).

4.2 Modelado del efecto de la variabilidad climática en agua subterránea

A nivel mundial autores como Bates et al. (2008), Green et al. (2011) y Kurylyk et al. (2013), discuten como aún el tema del impacto del cambio climático sobre el agua subterránea ha sido rezagado. En el surgimiento de estudios recientes acerca del tema, salta una nueva incertidumbre: la veracidad de los datos obtenidos con las distintas metodologías.

En la actualidad está a disposición una variedad de herramientas para simular cómo los cambios climáticos futuros afectan los procesos de recarga de agua subterránea. El proceso generalmente comprende la modelación de precipitación y temperatura mediante modelos de circulación general, la reducción de escala por medio de modelos dinámicos o estadísticos para simular las condiciones locales de un área específica y, por último, la utilización de modelos hidrológicos para simular la recarga del agua subterránea (Loáiciga 2003).

El interés por conocer acerca de la respuesta hidrológica es cada vez más trascendental. Aunque en los últimos años se han llevado a cabo grandes esfuerzos por conocer más del tema, estos en su mayoría se concentran en el impacto a las fuentes de superficiales. Sin embargo, la dependencia de gran parte de la población mundial hace que el tema del agua subterránea en contextos de cambio climático cobre auge en el número de publicaciones y conferencias a nivel mundial (Green et al. 2011).

En este sentido, basados en necesidades actuales se han desarrollado modelos que intentan predecir diferentes variantes dentro de la dinámica del agua subterránea. Por ejemplo, se han elaborado métodos para el modelado de la concentración de nitratos y fósforo contaminantes frecuentemente hallados en cantidades significativas en el agua subterránea (Martinkova 2011; Stuart et al. 2011; Narula & Gosain 2013).

Sin duda el proceso más destacado de la modelación en agua subterránea y objeto de la presente investigación, es la recarga de acuíferos, ya sea incorporando escenarios de cambio climático o sin ellos. Dentro de esta se pueden integrar las variaciones en el cambio de los usos del suelo, cambio en la morfología vegetal por

la abundancia de CO_2 atmosférico, el aumento de la evapotranspiración y humedad del suelo, entre otros (Ali et al. 2012; Gunawardhana & Kazama 2012; Beck & Bernauer 2011); aspecto que se detalla en la fase metodológica.

En el país se utiliza con especial preferencia el agua de origen subterráneo por sus ventajas en cuanto a calidad (Mora 2009). Estos beneficios sanitarios se traducen en beneficios económicos, al requerirse para su potabilización solo los sistemas de cloración (OPS 2003).

Costa Rica sobresale a nivel centroamericano por poseer uno de los dos acuíferos de mayor importancia en todo Centroamérica a pesar de su reducido territorio continental (CEPAL 2010). Se trata de los sistemas acuíferos del Valle Central, dentro de los que resaltan el Barva y el Colima; específicamente en el Gran Área Metropolitana (GAM), más del 65 % de la población es abastecida con agua proveniente de fuentes subterráneas (Reynolds 2002). Según Ramírez (2007) y Castro (2011), los acuíferos del Valle Central y en específico el Barva tienen su principal área de recarga en las faldas del volcán del mismo nombre. Cabe destacar que también se da casi por un hecho la recarga vía conexión hidráulica con los abundantes cauces superficiales de la zona (Reynolds-Vargas & Fraile 2006).

Contextualizados con las variaciones climática previstas a futuro, la gestión del agua subterránea resulta un tema incierto y fundamental (UNESCO 2012). Se debe comprender que además de los factores climáticos, muchos procesos antropogénicos afectan de manera sensible el abastecimiento de agua como el cambio de uso de la tierra y el aumento en la demanda (Varela 2007).

Las zonas montañosas de la provincia de Heredia ya han sido calificadas como parte esencial de las zonas de recarga del acuífero Barva, de acuerdo con lo encontrado por Ramírez (2007), utilizando el modelo Losilla & Schosinsky (2000); así como Sibaja (2014) y Hernando (2012), empleando el modelo Thornthwaite.

El modelo utilizado para estimar el balance hídrico de suelos y su posterior recarga al acuífero con base en la precipitación mensual, será el propuesto por Schosinsky (2006). El mismo fue declarado como oficial en Costa Rica para la estimación de cálculos hidrogeológicos según el Acuerdo MINAET 60- 2012. Este modelo se basa en clasificar el comportamiento de las diferentes variables dentro de rangos con sus equivalentes porcentuales y su manejo como coeficientes.

La relación de variables es una combinación entre los métodos de precipitación que infiltra y balance de humedad de suelos. La determinación parte del volumen de agua precipitada y la cantidad que logra recargar un acuífero a partir de diferentes condicionantes como el tipo suelo, vegetación, pendiente y evapotranspiración (Schosinsky 2006).

4.3 Clima

La clasificación y entendimiento del comportamiento de las condiciones atmosféricas es denominado como clima, cuya determinación está dada por registros de al menos 30 años para regiones o zonas específicas (Marshall & Plumb 2013). Factores como la temperatura, radiación solar, precipitación, humedad y nubosidad son medidos con instrumentación especializados y su interpretación es de suma utilidad en aplicaciones que van desde la agricultura hasta la hidrología, entre muchas otras (IMN 2008).

A la vez, la fluctuación del tiempo atmosférico con respecto a la norma o promedio que es representado por el clima de una zona en específico es denominada variabilidad climática. Los eventos hidrometeorológicos extremos se contemplan dentro de esta variabilidad climática. Se presume que el cambio climático afectará el comportamiento de la variabilidad del clima, al aumentar la frecuencia de eventos fuera del promedio (Stocker 2013). También debe considerarse que según la noción de la población, puede percibirse un evento como extremo sin que este necesariamente represente una distancia estadística marcada en relación con los promedios de comportamiento en términos físicos, como se deja en claro en la investigación de Lavel (2009).

Pese a que existe una gran discusión en torno al término cambio climático, el IPCC (2014) lo ha definido como la alteración del comportamiento promedio o de sus propiedades que persisten en escalas largas de tiempo. Este mismo organismo encargado de recopilar información mundial y liderar la discusión en el tema mediante amplios grupos de expertos internacionales, ha aceptado la hipótesis que en la actualidad se han observado variaciones atribuibles al impacto antropogénico sobre los ciclos climáticos globales.

La explicación más aceptada del origen se basa en el acelerado aumento de la emisión y posterior concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera tras la Revolución Industrial a mediados del siglo XIX (IPCC 2007). Aunque aún persiste la incertidumbre y la negación en cuanto al tema, sendos informes en diversos lugares del planeta han identificado variaciones del comportamiento atmosférico en décadas recientes inusuales con lo observado en registros climáticos antiguos (NOAA 2015). El deshielo de zonas altas y polares, el incremento de las temperaturas de los océanos y la alteración de patrones climáticos son evidencias de posibles cambios en el comportamiento atmosférico a gran escala. Otra potencial evidencia es que la última década ha sido la más caliente desde que se tienen registros, es decir, 1850 y responde a una tendencia de larga duración en donde 2015 fue el año consecutivo número 39 (desde 1977) en el cual se sobrepasa el promedio de temperatura del siglo XX (Steffen & Fenwick 2016; NOAA 2015).

A nivel global, la tendencia histórica y las proyecciones a futuro muestran que la temperatura puede incrementarse de 1,4 a 5,8 °C al año 2100 (Sánchez et al. 2011). Se pronostican cambios en la temperatura y precipitación promedio, la estacionalidad y distribución espacial del clima y aumentos en la intensidad y frecuencia de eventos climáticos. De no darse una reducción drástica de la emisión de gases de efecto invernadero, tanto este factor como los elementos reforzantes del cambio climático tendrán el potencial de modificar el clima planetario severamente, comprometiendo la existencia de la vida como hoy se conoce (Stocker et al. 2013).

En Costa Rica se han realizado esfuerzos por conocer las implicaciones de los escenarios climáticos. Villalobos et al. (2007), en un estudio efectuado para la zona noroccidental del Valle Central, utilizando salida de modelos de circulación general con aplicación de técnicas de reducción de escala tipo estadística (SDSM), explican que sus escenarios climáticos indican una reducción en la precipitación cercana al 10 % en las zonas medias y bajas analizadas dentro del respectivo estudio, así como un aumento en la temperatura de 0,8 °C.

Alvarado et al. (2012), mediante el promedio de cinco modelos de circulación general y reescalameinto estadístico, pronostican para la zona del Valle Central una reducción de entre -15 a -35 % de la precipitación en las regiones donde se estima menos lluvia que en la actualidad. El comportamiento puede ser similar al presentado en épocas del fenómeno El Niño/ Oscilación del Sur (ENOS), en donde los eventos de sequía o precipitación ocurren de forma extrema. Por lo anterior, los sistemas de abastecimiento se verán potencialmente comprometidos.

4.4 Modelado de escenarios climáticos

En el caso específico del cambio climático, la principal herramienta para su investigación es la modelación numérica. En las últimas décadas se ha desarrollado una innumerable cantidad de modelos para la predicción del cambio climático y sus impactos. El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), organismo creado con el fin de aportar elementos para el entendimiento, mitigación y adaptación del CC, ha brindado diferentes alternativas de modelado. De igual manera, ha categorizado los escenarios climáticos según el volumen de emisiones contaminantes emitidas (Moss et al. 2008).

La complejidad en modelar el clima hace necesario el acoplamiento de los diferentes componentes del sistema climático: atmósfera, océano, superficie de la tierra o hielo marino. Para este fin, existen los modelos de circulación general (GCM por sus siglas en inglés), los cuales constan de una rejilla tridimensional (longitud-latitud-altura) y varían en su nivel de complejidad y alcance. Principalmente son utilizados para la predicción de precipitación y temperatura (Sánchez et al. 2011).

En los GCM por “complejidad” se entiende el nivel de detalle con que se trata cada uno de los componentes del modelo y por “alcance” el número de componentes incluidos. Así, se pueden desarrollar modelos globales con resoluciones espaciales muy bajas (poco nivel de detalle), los cuales posibilitan hacer estimaciones a nivel macro, con la limitante de no ofrecer datos precisos a escala local (IPCC 1997).

Por otro lado, se han desarrollado los modelos regionales de circulación general (RCM por sus siglas en inglés). Estos permiten obtener resultados a una menor escala, o sea, mayor resolución espacial. Son especialmente utilizados para la toma de políticas de mitigación y adaptación al cambio climático (Sánchez et al. 2011).

Pese a lo anterior, existen técnicas para obtener datos más detallados. El *downscaling* o reducción de escala son técnicas para obtener datos generados a partir de modelos de circulación general a una escala menor de la que arrojan sus resultados. Se basan en la relación de variables atmosféricas a gran escala con variables locales o regionales, permitiendo, por ejemplo, la aplicación de escenarios climáticos en modelos hidrológicos (Sánchez et al. 2011).

Existen varias técnicas para el reescalamiento clasificadas en dos grupos: los estadísticos, que se fundamentan en la corrección de relaciones numéricas mediante la observación empírica, por ejemplo, de datos históricos de clima y precipitación. Por otra parte, el reescalamiento dinámico consta de un nuevo modelo que redimensiona las variables originadas en modelos de circulación general (Fowler et al. 2007).

Los modelos dinámicos son más efectivos cuando los factores locales como cobertura de suelo, topografía, afectan en mayor medida el clima del lugar. Caso contrario sucede cuando las condiciones son homogéneas (Wang et al. 2004). Dentro de las principales limitantes de este método, se encuentran su complejidad en el requerimiento de datos de entrada y el costo de los paquetes informáticos (Fowler et al. 2007).

En tanto los modelos estadísticos establecen la diferencia entre los datos de control y los datos a futuro ajustando los datos generados mediante factores de cambio, pudiendo corregir los datos inclusive a escala diaria. Dentro de los métodos estadísticos comúnmente usados en el *downscaling*, están los coeficientes de correlación y distancia medida como raíz del error cuadrático medio (Busuioc et al. 2001). Sin embargo, Wilby et al. (2002) mencionan que a efectos de modelar el cambio climático, el método más efectivo es el que mejor reproduzca las variables de baja frecuencia atmosférica. Las limitantes más significativas son las que tienden a obviar las variaciones, haciendo constante los patrones de cambio (Fowler et al. 2007).

4.5 Cuenca y microcuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es definida como la conformación fisiográfica en la cual, por sus condiciones naturales de relieve, el agua de lluvia precipitada es conducida hacia un cauce principal de agua. En ella se interrelacionan factores biofísicos (agua, suelo), biológicos (flora y fauna) y humanos (socioeconómicos, culturales, institucionales) (Rodas 2008; Zury 2012).

La unidad de cuenca está conformada por un río principal y por todos los territorios comprendidos menores que aportan agua a ese río principal. El agua captada por la cuenca puede alimentar otro río, un lago, un pantano, una bahía, un acuífero subterráneo, o bien, a varios de estos elementos del paisaje (Aguilar & Iza 2006 en Zury 2012).

Así, la microcuenca es la unidad más pequeña de la cuenca hidrográfica, la cual cuenta con todas las características de una cuenca hidrográfica a pequeña escala. Los términos gran cuenca, subcuenca y microcuenca responden al sistema de nomenclatura utilizado a nivel nacional. En Costa Rica, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) clasificó la totalidad del territorio nacional en 34 grandes cuencas hidrográficas (ICE 1990). De ellas se derivan las subcuencas y estas, a su vez, están conformadas por microcuencas. Al ser la microcuenca la unidad más pequeña dentro de la clasificación, no implica que no pueda dividirse en unidades de cuencas aún más pequeñas.

4.6 Uso de la tierra

Según Dengo (2004), el término “uso del suelo” está mal empleado al momento de utilizarlo para describir la actividad humana o natural desarrollada sobre un espacio geográfico determinado, pues el término “suelo” es ampliamente utilizado en el ámbito agrícola, tendiendo a inducir a error ya que se pueden dar actividades poco relacionadas con el suelo como elemento. En tanto propone el término “uso de la tierra” como designio más general para el uso o actividad desarrollada en un espacio geográfico determinado. Por lo tanto, se empleará la denominación “uso de la tierra” para clasificar las actividades humanas o características naturales dentro del área de estudio.

Las proyecciones de cambio de uso de la tierra es un tema con poco desarrollo a nivel mundial. Autores como Henríquez et al. (2006) y Candela et al. (2015) han efectuado estudios para el análisis de escenarios de cambio de uso de la tierra, en donde recalcan la dificultad de realizar escenarios de cambio de uso por la poca predictibilidad que encierran los diferentes factores. Los mismos emplearon modelos y el análisis de comportamiento histórico reciente mediante cadenas de Markov en el primer caso y el Land Change Modeller en IDISRI.

4.7 Tecnologías limpias para la adaptación y resiliencia en el manejo de cuencas hidrográficas

En los últimos años, las tecnologías limpias han tomado un papel protagónico en el ámbito empresarial e institucional en cuanto se procura que el desarrollo tecnológico vaya de la mano con prácticas menos impactantes sobre el ambiente (Musmmani 2013). El manejo de cuencas en sus distintos enfoques ha incorporado las tecnologías limpias para lograr la armonización de los sistemas productivos con el uso y manejo dentro de las cuencas no contaminantes: ingeniería natural, tecnologías de descontaminación, manejo de desechos sólidos y líquidos, recuperación de suelos degradados, etc. son solo algunos ejemplos de componentes estratégicos que frecuentemente se incluyen en los planes de acción de manejo en microcuencas como lo destacan Jiménez & Faustino (sf).

Por tecnologías limpias no solo deben entenderse dispositivos complejos de avanzada, sino además toda práctica y conocimiento que puesto en práctica fomente la minimización de los impactos ambientales de un determinado proceso antropogénico. El fomento del uso de tecnologías limpias para la adaptación a los impactos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua para consumo humano es una estrategia contemplada dentro de la Estrategia Nacional de Cambio Climático (MINAET 2009).

Según la Estrategia Nacional de Cambio Climático (2009), la adaptación comprende la reducción de impactos y el aprovechamiento de oportunidades abarcando los sectores económico, social y político. También define que las acciones de adaptación son una importante herramienta para la toma de decisiones a todos los niveles jerárquicos.

En la ENCC (2009) se han definido criterios generales para la adaptación del sector hídrico al cambio climático, tales como:

> (…) calcular el balance hídrico por cuenca hidrográfica (oferta) lo cual es un instrumento básico para la asignación del agua (demanda) en la gestión integrada del recurso hídrico; mejorar la cobertura, alcances y confiabilidad de la red hidrometeorológica necesaria para el monitoreo de las variables meteorológicas requeridas para el balance hídrico; incentivar tecnologías que permitan aumentar la eficiencia en el uso del agua doméstica, industrial, agrícola, hidroeléctrica; mejoramiento de la infraestructura de los sistemas de agua potable para proveerla en mayor cantidad y calidad; implementación del Ajuste Ambiental del Canon de Aprovechamiento de Agua, así como el de Vertidos; otorgar seguridad jurídica en el marco del ordenamiento del Estado a las zonas de protección de los acuíferos destinados al abastecimiento humano; consolidación financiera del Sistema Nacional de Pagos de

Servicios Ambientales; desarrollar un programa de sensibilización pública sobre la adaptación del recurso hídrico al cambio climático; monitorear los impactos e incentivar la investigación para la reducción de la vulnerabilidad y la identificación de acciones de adaptación del sector hídrico al cambio climático.

5. MARCO METODOLÓGICO

Se utilizó una metodología de tipo cuantitativa. El alcance consistió en establecer la disponibilidad de agua a futuro en el área de estudio. La disponibilidad es entendida en este caso concreto por la relación de las condiciones hidrológicas naturales con especial énfasis en la recarga acuífera y las alteraciones que puede sufrir por dinámicas climáticas y uso de la tierra. Dentro de la disponibilidad no se incluirá la calidad del recurso. Además tendrá un componente cualitativo en la evaluación de las estrategias futuras de adaptación de los diferentes entes y sectores usuarios.

Las principales variantes por estudiar fueron la potencial incidencia de la variabilidad climática en el contexto de posibles cambios climáticos, al pronosticarse fluctuaciones importantes en los componentes de temperatura y precipitación; y los cambios en el uso de la tierra al existir una relación directa o indirecta en la alteración de áreas de recarga acuífera. Se tomaron tractos temporales de 20 años, con el fin de prever las variaciones a corto y largo plazo. Dichos tractos serán respectivamente de 2015 a 2035 y de 2050 a 2070. Los datos se procesaron mediante el uso de *software* estadístico como Excel y sistemas de información geográfica como ArcGis y Surfer.

5.1.1 Área de estudio

La zona en estudio corresponde a la microcuenca del río Porrosatí, la cual se toma como cuenca modelo por la relevancia que sus características revisten para el abastecimiento de agua de consumo humano en una significativa cantidad de población de la provincia Heredia. La misma es parte de un complejo sistema hídrico que comprende en su parte superficial una densa red de ríos pertenecientes a la cuenca del río Virilla. En cuanto al agua en el subsuelo, se encuentra dentro de los límites del acuífero Barva (Reynolds & Fraile 2003) (fig. 1).

Los manantiales en la microcuenca tienen la particularidad de mostrar una marcada disminución de su caudal tiempo después de la ausencia de lluvias por el comportamiento estacional de la región[1], lo que muestra la susceptibilidad a las variaciones climáticas de dichas fuentes; datos que serán objeto de análisis en etapas posteriores de este documento. En el desarrollo del objetivo 1, se profundizará sobre las características biofísicas de la cuenca.

[1] Córdoba, 2013. Administrador de la Asada San Pedro de Barva. Rendimiento de manantiales en microcuenca del Porrosatí (entrevista abierta)

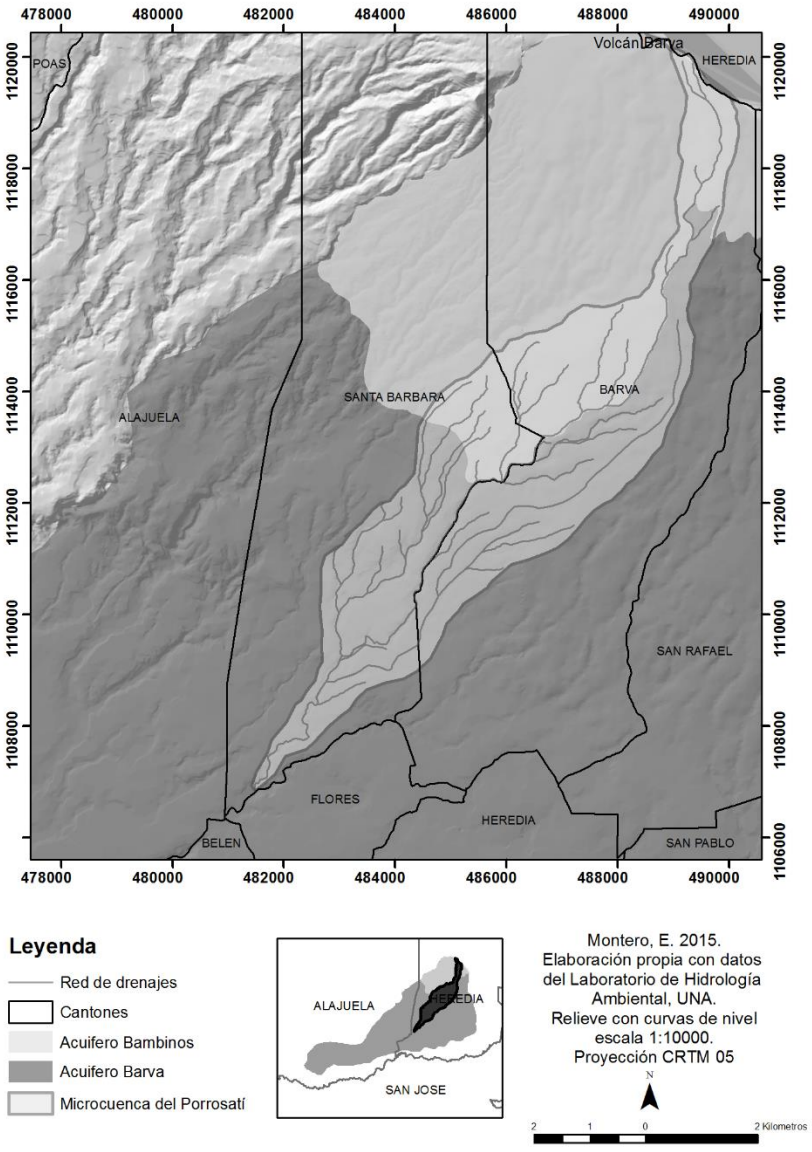

Fig. 1. Ubicación de la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Fase I: Diagnóstico de las condiciones hidrológicas de la microcuenca del río Porrosatí

Con base en el trabajo de campo y la revisión bibliográfica, se establecieron las condiciones actuales dentro de las que se encuentran los usos de la tierra, y un inventario del número de captaciones de manantiales y pozos con su respectiva georeferenciacion. Además, en este inventario se especificó el tipo de uso que se le da al agua. La clasificación según uso será:

1. Consumo humano
2. Agrícola

3. Industria

Para un análisis integral del comportamiento hidrológico de la microcuenca, se investigaron y elaboraron mapas de pendiente, dimensiones longitudinales y área, perfil del cauce principal, modelos de elevación digital, curva hipsométrica, índice de humedad topográfico, geología, hidrogeología, usos de la tierra y áreas de conservación. Se utilizarán herramientas de información geográfica (SIG) y datos existentes recopilados por diferentes fuentes, incluyendo el Instituto Geográfico Nacional (IGN), la academia, instituciones, publicaciones en revistas y relacionadas.

En esta fase se realizó una compilación de información de distintas fuentes, incluyendo entrevistas abiertas, bibliografía y trabajo de campo. Se trabajó con los entes encargados del abastecimiento de agua de manera individual, respetando la confidencialidad de los datos obtenidos.

5.2.1 Información de los entes encargados del suministro de agua en la microcuenca

Inicialmente se planteó el trabajo con la totalidad de entes con fuentes de abastecimiento dentro de la microcuenca. Entre estos se encuentran: las Asadas de San Pedro de Barva, Puente Salas de San Pedro de Barva y San José de la Montaña; los acueductos municipales de Barva, Santo Domingo y San Joaquín de Flores y la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH). Sin embargo, la ausencia de registros y falta de disposición a colaborar con la presente investigación hizo descartar la totalidad de los acueductos municipales en posteriores análisis.

Referente a las Asadas y ESPH, se trabajó en conjunto para obtener información de contexto referente a la disponibilidad y patrones de consumo de la población abastecida. Se clasificó a los usuarios del agua entre usuarios domiciliares, agropecuarios e industriales para un análisis generalizado. A la vez, las fuentes de abastecimiento dentro de la microcuenca fueron visitadas y georreferenciadas debidamente.

5.2.2 Depuración de la base de datos de concesiones de agua en la microcuenca del río Porrosatí

Ante la evidente desorganización de la base de datos oficial de concesiones de agua a nivel nacional, fue necesario un trabajo para su depuración. Primeramente, se procedió a completar las coordenadas geográficas de la totalidad de los datos para poder despegarlos en el sistema de información geográfica y seleccionar los datos respectivos de la microcuenca en análisis.

Seleccionadas todas las concesiones, se trabajó con aquellas dentro de la microcuenca, encontrando el problema de la duplicidad de información, por ejemplo, una misma concesión puede estar hasta 7 veces, lo que sesga los datos. En la mayoría de los casos, esta situación se debe a que se ingresaba el punto nuevamente cada vez que se realizaba una renovación de la concesión o una inspección de campo. Se revisaron las concesiones una por una, conservando

únicamente el valor más actualizado. Se aclara que debido a la gran cantidad de concesiones, en donde una gran proporción es de origen privado, se imposibilitó la verificación de campo de estas. Existe una probabilidad significativa de que el dato total de concesiones no sea real al tratarse de una base de datos desactualizada y descuidada por parte del ente encargado de su manejo.

5.2.3 Corrección y rellenado de información meteorológica

Estaciones procesadas

Se identificó un total de cuatro estaciones meteorológicas en las inmediaciones de la microcuenca. Considerando las pocas estaciones, se tomó el número como representativo. También se contó con dos estaciones más para poder llevar a cabo el proceso de corrección y rellenado de datos faltantes. Las estaciones con influencia directa fueron: Santa Bárbara, Aeropuerto Juan Santa María, Santa Lucía y Monte de la Cruz. Mientras que las estaciones Alajuela y Fraijanes fueron apoyo para la corrección de datos. Este proceso fue realizado mediante la utilización de polígonos de Thiessen para la interpolación de los datos de las estaciones consiste en delimitar áreas de influencia a partir de un conjunto de puntos. El tamaño y la configuración de los polígonos dependen de la distribución de los puntos originales (Busuioc et al, 2011).

Se contó con 15 años de información meteorológica a escala diaria, la cual fue ordenada para identificar cualquier error o ausencia en los datos. Tomando en cuenta que las bases de datos meteorológicas obtenidas del Instituto Meteorológico Nacional presentaban datos faltantes que varían de un día a meses completos, se procedió a realizar la identificación de vacíos en los datos para su rellenado y corrección. Finalmente, por la mínima área con influencia de la estación Juan Santamaría, se descartó, utilizándose finalmente las estaciones Monte de la Cruz, Santa Lucía y Santa Barbará para los balances hídricos.

Método para la estimación y corrección de datos meteorológicos

Razón de valores normales

Este método es muy utilizado, principalmente para la estimación de datos faltantes en series anuales o mensuales (Alfaro & Pacheco, 2000). Emplea el promedio de al menos 3 estaciones con condiciones fisiográficas y climáticas que se consideren representativas de la estación por estimar. Cada valor es corregido por un factor basado en la relación de comportamiento entre la estación por estimar y la estación de referencia.

$$X = \frac{1}{3}\left[\left(\frac{Xp}{Ap}A\right) + \left(\frac{Xp}{Bp}B\right) + \left(\frac{Xp}{Cp}C\right)\right] \qquad \text{Ec. 1}$$

X = Sumatoria mensual inexistente o con registro de días incompleto.
Xp = Promedio de sumatorias anual en de la estación con dato ausente o incompleto.
Ap, Bp, Cp = Promedio de sumatorias anual en estaciones seleccionadas con criterios de homogeneidad establecidos.
A, B, C = Valor del mes por estimar o corregir en estaciones seleccionadas con criterios de homogeneidad establecidos.

Los criterios de elegibilidad para la aplicación del método de las razones normales para la estimación de registros inexistentes o incompletos, fueron los siguientes:

Tabla 1**.** Criterios para la escogencia de estaciones para interpolaciones de datos meteorológicos

Criterio	Justificación	Método utilizado
Distancia	La menor cercanía entre estaciones representa la condición deseable, pues se asume que las variables que afectan el comportamiento climático tendrán mayor similitud y, por ende, un comportamiento más homogéneo entre las estaciones.	Se desplegaron las estaciones en un SIG para visualizar las distancias entre cada una de ellas.
Altitud	La altitud es una variable determinante, principalmente asociada a la conformación orográfica.	Mediante el SIG, se despliegan los datos de altitud de las estaciones. Se realizó un modelo de elevación digital, en donde se obtienen rangos de distribución de la información climática sobre el área de estudio.
Comportamiento promedio	Cuando no se cumplieron los criterios anteriores, se procedió a tomar en cuenta variables basadas en la observación y análisis del comportamiento entre estaciones.	Además del cálculo de promedios de las sumatorias, se efectuaron análisis por mínimos cuadrados para conocer la relación de comportamiento entre las estaciones.

Fuente: Elaboración propia

5.3 Fase II: Balance y comportamiento hídrico en el periodo 2000-2014

Con base en los datos históricos sobre climatología y uso de la tierra, se llevó a cabo un balance hídrico del suelo. Se abarcó un periodo de 5 años para la validación y establecimiento de tendencias en el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Con esto se determinan los parámetros de comparación sobre los escenarios por realizar (fase III).

5.3.1 Balance hídrico

Para el cálculo de la recarga potencial de acuíferos, se utilizó el modelo propuesto por Schosinsky (2006), el cual fue declarado como oficial para la estimación de cálculos hidrogeológicos según el Acuerdo MINAET 60- 2012. Este modelo es una combinación entre los métodos de precipitación que infiltra y balance de humedad de suelos. A continuación se desagregarán brevemente los principales componentes del modelo para una mejor compresión.

5.3.2 Fracción de lluvia interceptada por el follaje

Schosinsky & Losilla (2000) estiman que durante cada aguacero, el follaje intercepta alrededor del 12 % de la precipitación total, es decir, este porcentaje de lluvia no llega al suelo. A efectos del balance hídrico del suelo, en cuanto a la fracción de precipitación que infiltra, se considera para bosques una intercepción de un 20 % y para otros usos como pastos y cultivos, un 12 %. Estos valores además coinciden con lo encontrado por Bruijnzeel (1990), en diferentes estudios de ecohidrología en climas tropicales (ecuación 7) (tabla 3).

En los estudios realizados por estos autores (Schosinsky & Losilla 2000), los resultados indicaron que las precipitaciones menores a 5 mm no se consideran en los cálculos de infiltración o escurrimiento por ser interceptadas en su totalidad por el follaje de la vegetación representando valores insignificantes. El balance a su vez desestima la evaporación de la lluvia interceptada por el follaje durante el evento de precipitación, por considerarse que durante este la atmósfera se encuentra con una humedad relativa saturada.

5.3.3 Coeficientes de infiltración

El valor de precipitación que infiltra está dado por la diferencia entre la precipitación total mensual y el porcentaje retenido, multiplicado por el coeficiente de infiltración. El resultado será la precipitación que infiltra en el mes determinado. Schosinsky & Losilla (2000) mencionan que la ecuación para el análisis del coeficiente de infiltración aparente (Ci) responde a la fracción de lluvia que se infiltra, calculándose según la ecuación 8 (tabla 4). Este cálculo contempla dentro de sus variables los coeficientes de infiltración por efecto de uso de la tierra (kv), por efecto de la pendiente (kp) y por efecto del suelo (kfc).

Para los valores de Kp, infiltración por efecto de la pendiente, se realizó un modelo de pendientes mediante el uso de sistemas de información geográfica con una capa base de curvas de elevación escala 1:10000. El modelo de pendiente se generó en

porcentajes y se reclasifico con base en los valores propuestos por Schosinsky (2006) (tabla 2).

Tabla 2. Componentes del coeficiente de infiltración Kp y Kv

Por pendiente	**Rango (%)**	**Kp**
Muy plana	0 – 0.06	0.35
Plana	0.06 – 0.4	0.25
Algo plana	0.4 - 2	0.15
Promedio	2 - 7	0.10
Fuerte	Mayor a 7	0.06
Por cobertura vegetal		**Kv**
Zacate menos del 50 %		0.09
Cultivos		0.1
Pastizal		0.18
Bosques		0.2
Zacate más del 75%		0.21

Fuente: Schosinsky 2006

El valor de kv está dado por el efecto del uso de la tierra en la infiltración. Para obtener estos valores se realizó una clasificación del uso de la tierra mediante la fotointerpretación en sistemas de información geográfica. Para obtener datos de alta precisión y poder evidenciar en los resultados el efecto de los cambios de uso, principalmente la impermeabilización por efecto de la urbanización, se utilizaron imágenes áreas de los años 1998, 2005 y 2015. La categoría urbano se consideró con un valor de recarga de cero, calificándose como un proceso totalmente impermeabilizante. En ningún caso el coeficiente de infiltración (Ci) ha de ser mayor que 1, si así fuese, se le asigna a Ci el valor de 1.

5.3.4 Infiltración por efecto del suelo

La fracción que infiltra por efecto del suelo depende de los valores de infiltración básica (fc). Con el fin de establecer los valores de fc específicos para el área de estudio, se realizaron pruebas de laboratorio para conocer las características del suelo. Se llevaron a cabo las pruebas de conductividad hidráulica, densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez.

El valor de infiltración básica del suelo fue obtenido mediante la determinación de la conductividad hidráulica por el método del permeámetro de carga constante y el cálculo respectivo por medio de la ecuación de Darcy.

$$K\left(\frac{cm}{min}\right) = \frac{Q}{a*t} X \frac{L}{min} \quad \text{Ec. 2}$$

A = área de la muestra (cm^2)
L = longitud de la muestra (cm)
H = carga hidráulica (cm)
T = intervalo de tiempo (min)
Q = promedio de los volúmenes recogidos en dicho intervalo (cm^3)
K= conductividad hidráulica (L/T)

Una vez obtenido el valor de conductividad hidráulica, el cual será igual al valor de fc, se debe aplicar la ecuación 9. Con esta ecuación se estima el coeficiente de infiltración por efecto del suelo. Esta ecuación fue derivada de los estudios de Schosinsky y Losilla (2000), los cuales relacionan las lecturas de bandas pluviográficas con valores de infiltración básica. Para la aplicación de esta ecuación, el rango de fc ha de encontrarse entre 16 a 1568 mm/día (Schosinsky, 2006). Para valores de fc menores a 16 mm/día, Kfc = 0.0148 · fc / 16. Para valores de fc mayores a 1568 mm/día, Kfc = 1. Una vez mencionados estos aspectos, se procede al cálculo del coeficiente de infiltración (Kfc) mediante la ecuación 9 (tabla 3).

La determinación de la densidad aparente se realizó por el método del cilindro, en el cual se toma una muestra de suelo con un cilindro en los primeros 30 cm de suelo. Se transportó al laboratorio en donde se secó la muestra en estufa a 105 ºC hasta peso constante. Se calculó el volumen del cilindro mediante las medidas de largo y ancho. El cálculo de la densidad aparente de la muestra se efectúa de la siguiente manera:

$$DA = \frac{Ps}{V} \quad \text{Ec. 3}$$

DA = densidad aparente (g/cm^3)
Ps = peso suelo seco (g)
V = volumen del cilindro (cm^3)

La capacidad de campo y punto de marchitez se determinaron mediante la aplicación de presiones a 0.33 y 15 atmósferas respectivamente durante 72 horas, en donde se calculó la diferencia del peso saturado y el peso seco tras la extracción de humedad en las ollas.

5.3.5 Muestreo de suelo

Respecto al análisis de suelo, se tomaron muestras a lo largo de la microcuenca, para cada uno de los diferentes usos del suelo encontrados. En cuanto a los análisis físicos, se tomaron muestras en cilindros para obtener una muestra del perfil. Algunos de las pruebas serán realizadas en el Laboratorio de Suelos e Hidrogeología de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional.

Se tomaron 6 puntos de muestreo debidamente georreferenciados y escogidos según su representatividad e idoneidad para la toma de la muestra. La principal característica tomada en cuenta fue el tipo de uso de la tierra, obteniendo un punto por cada uno de los usos en la microcuenca según lo establecido en el punto 5.2. Los parámetros del suelo evaluados fueron: conductividad hidráulica, capacidad de campo, punto de marchitez y granulometría, como se describe en la tabla 3.

Tabla 3**.** Parámetros y métodos empleados para la determinación de condiciones hidráulicas del suelo

Parámetro	**Método**	**Ecuación**	**Referencia bibliográfica**
Conductividad hidráulica	Determinación en laboratorio mediante la construcción de permeámetro de flujo constante con cilindro de muestra.	$Ks = \left(\frac{Q}{At}\right)\left(\frac{L}{H}\right)$ Ec. 4	Henríquez y Cabalceta 1999
Capacidad de campo	Determinación en laboratorio. Saturación de cilindros para su posterior extracción de agua mediante aplicación de presión a 0.33 atm durante 72 horas.	$\%CC = \frac{(Pi - Pf)}{Pf} x100$ Ec. 5	Henríquez y Cabalceta 1999
Punto de marchitez	Determinación en laboratorio. Saturación de cilindros para su posterior extracción de agua mediante aplicación de presión a 15 atm durante 72 horas.	$\%PM = \frac{(Pi - Pf)}{Pf} x100$ Ec. 6	Henríquez y Cabalceta 1999

Ks: conductividad hidráulica saturada; Q: velocidad; A: área del cilindro; t: tiempo; L: longitud de la carga de agua; H: altura del cilindro de muestra; CC: capacidad de campo; Pi: peso inicial; Pf: peso final. Fuente: Elaboración propia.

5.3.6 Precipitación que infiltra en el suelo

El volumen de agua que infiltra en el suelo es el resultado de la resta de la fracción de agua retenido por el follaje de la vegetación, multiplicado por el coeficiente de infiltración anteriormente descrito. En este cálculo resulta importante contar con datos meteorológicos precisos para el área de estudio, tomándose la sumatoria de

precipitación mensual y se establece mediante la aplicación de la ecuación 10 (tabla 4).

Tabla 4. Ecuaciones para la determinación de la precipitación que infiltra

Ret = retención de lluvia en el follaje [mm/mes]	*Ret = (P)(Cfo)* Ec. 7. *Si P es menor o igual a 5 mm/mes, Ret = P.* *Si el producto (P)(Cfo) es mayor o igual de 5* *mm/mes,.* *Si P es mayor de 5mm/mes y el producto* *(P)(Cfo) menor de 5, Ret = 5.*	P = precipitación mensual del mes [mm/mes] Cfo = coeficiente de retención del follaje Bosques muy densos Cfo = 0,20 Otros Cfo = 0,12 [adimensional]
Ci = coeficiente de infiltración adimensional	*Ci = Kv + Kp + Kfc* Ec 8.	***Kv*** = fracción que infiltra por efecto del uso de la tierra (adimensional) ***Kp*** = fracción que infiltra por efecto del terreno (adimensional) ***Kfc*** = fracción que infiltra por efecto del suelo (adimensional)
Kfc = fracción que infiltra por efecto del suelo (adimensional)	*Si 16 ≤ fc ≤ 1568 mm/día, Kfc = 0,267·ln fc – 0,000154·fc – 0,723* *Si fc < 16 mm/día, Kfc = 0.0148 · fc / 16*	***fc*** *= infiltración básica del suelo (mm/día)*

	Si fc > de 1568 mm/día, Kfc = 1 Ec. 9	
Pi = precipitación que infiltra mensualmente al suelo (mm/mes)	*Pi = (Ci)·(P – Ret)* *Si P ≤ 5 mm, Ret = P* *Si el producto P·Cfo ≥ 5 mm, Ret = P·Cfo* *Si P > 5 mm y el producto P·Cfo < 5, Ret = 5* Ec. 10	***Ci** = coeficiente de infiltración (adimensional)* ***P** = precipitación mensual (mm/mes) (dato de estación meteorológica)* ***Ret** = retención de lluvia mensual por el follaje (mm/mes)* ***Cfo** = coeficiente de retención del follaje (adimensional)*

Fuente: Elaboración propia

5.3.7 Balance del agua en el suelo

A partir del volumen de agua infiltrado en el suelo, se deben calcular las dinámicas de humedad a las que es sometido este volumen. El principal factor que modifica los contenidos de humedad en el suelo es la evapotranspiración de las plantas, la cual es llevada a cabo por las raíces. La extracción de agua se calculó en una franja de suelo cuya profundidad está dada por la profundidad de las raíces de la vegetación. Este dato fue anotado en campo mediante observación y referencias bibliográficas. Se deduce que un suelo, a profundidades mayores que la profundidad de raíces, se encuentra a capacidad de campo (Schosinsky 2006).

5.3.8 Evapotranspiración

La evapotranspiración de una zona con cobertura vegetal se define como la traspiración de la planta cuando el suelo está a capacidad de campo, más la evaporación del suelo. El punto máximo de evapotranspiración sucede cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo. Cuando el contenido de agua en el suelo es menor, la evapotranspiración de las plantas se reduce, la cual a su vez está determinada por la cantidad de humedad disponible en el suelo en un mes específico.

Ante la dificultad de tomar en cuenta los valores de evapotranspiración de los distintos tipos de plantas que se pueden hallar en una cuenca, se realizó el cálculo de la evapotranspiración promedio para el área de estudio, la cual se denomina evapotranspiración potencial (ETP).

Determinación de la evapotranspiración mensual

El cálculo de la evapotranspiración potencial se llevó a cabo mediante el método Thornthwaite. Los datos necesarios para efectuar la determinación son la temperatura promedio mensual y la cantidad promedio de horas luz durante cada mes. Los faltantes de datos hizo necesario realizar estimaciones de temperatura. La principal variante que modifica la temperatura en estos casos es la variación altitudinal. Para esto, se aplica un factor de corrección en consideración a los metros de altitud, siendo los datos de la estación del Aeropuerto Juan Santamaría los de referencia, por su buena cobertura de datos. Los cálculos necesarios para obtener la evapotranspiración por el método Thornthwaite se describen a continuación:

$$ETP = 16\left(\frac{10T}{l}\right) x\ a$$

$$a = 6{,}75.10 - 7\ I3\ - 7{,}71.10 - 5\ I\ 2\ +\ 1{,}79.10 - 2\ I\ +\ 0{,}49239$$

$$i = \frac{t}{5}\ x\ 1{,}514$$

$$l = \Sigma i(12\ meses) \qquad \text{Ec. 11.}$$

ETP: evapotranspiración en mm.
I: índice calórico anual
i: índice calórico mensual
T: temperatura media mensual en ºC
a: exponente empírico, función de I.

Para el balance hídrico de suelos, se asume que la evapotranspiración potencial real será proporcional a la humedad disponible del suelo. Respecto al cálculo de la evapotranspiración potencial real (*ETPR*) de la planta, se utiliza la ecuación 12. A su vez es necesario calcular la evapotranspiración según el coeficiente de evapotranspiración real al inicio del mes (ETR1), el cual se describe en la ecuación 16 (tabla 5). Los datos mensuales resultantes se muestran en el anexo 3.

Para convertir la humedad del suelo, el punto de marchitez y la capacidad de campo a milímetros, se hizo la conversión de porcentaje por peso de suelo seco a porcentaje por volumen, en donde se utiliza la densidad aparente del suelo por el dato obtenido en el laboratorio en el caso de la capacidad de campo y el punto de marchitez. El resultado de esta opresión se multiplica por el valor de profundidad de

raíces, con lo que se obtuvo la lámina de agua correspondiente a cada estado de humedad (Ec. 13; tabla 5).

5.3.9 Recarga al acuífero

Cuando ocurren los eventos de precipitación, el agua que se infiltra en el suelo se acumula en los poros, hasta llevarlo a capacidad de campo. Pasado el evento de lluvia, se lleva a cabo el proceso de evapotranspiración, en donde las raíces toman el agua disponible. Si la cantidad de infiltración de agua es suficiente para llevar el suelo a capacidad de campo y llenar la necesidad de evapotranspiración, el sobrante de agua que infiltra percola para recargar al acuífero (Schosinsky 2006). Para establecer estos balances de humedad en el suelo entre las condiciones de los diferentes meses, se debe efectuar la estimación de los procesos que se describen a continuación:

5.3.10 Estimación de la humedad inicial en un mes seleccionado

Se debe partir de una humedad conocida para establecer el balance de humedad anual. El autor del modelo recomienda iniciar con el balance anual en un mes en el cual el suelo esté a capacidad de campo, siendo los meses en los que la precipitación que infiltra es mayor a la evapotranspiración. Para Costa Rica típicamente esta condición se cumple en los meses al final de la época lluviosa. Una vez escogido el mes inicial, se calcularon las Hsi con las consideraciones expuestas en la ecuación 18 (tabla 5). Una vez conocida la humedad inicial, se procedió a calcular la humedad final del suelo en el mes. Este valor final de humedad *Hsf* corresponderá a su vez con la humedad inicial del mes siguiente y así continuamente en el balance anual (Ec. 20).

El valor de *C1* corresponde al coeficiente de humedad del suelo al inicio del mes, más la infiltración de la lluvia, sin ocurrir la evapotranspiración. El valor de *C2* se refiere al coeficiente de humedad mínimo, ya que está calculado considerando la humedad del suelo anterior, restándole la evapotranspiración mensual, estimada con el coeficiente de humedad máxima, *C1*. Por lo tanto, el coeficiente *C2* se aproxima al coeficiente de humedad final del mes. Ninguno de los coeficientes de humedad *C1* y *C2*, pueden ser superiores a 1 ni menores a cero; si se da el caso, se tomarán los valores de 1 y 0 según corresponda (Schosinsky 2006).

Al ocurrir la infiltración y la evapotranspiración durante el mes, se estima que el coeficiente de humedad corresponde al promedio de *C1* y *C2*, esto quiere decir que la evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes específico está dada por la ecuaciones 14 y 15 (tabla 5).

La humedad disponible refiere al volumen de agua contenido en el suelo que puede ser utilizado por las plantas y se calcula con la ecuación 19 (tabla 5). Si la humedad disponible es menor que la evapotranspiración real, la planta no podrá evapotranspirar dicha cantidad. En este caso, la evapotranspiración estará limitada al valor de humedad disponible.

Tabla 5. Ecuaciones para el balance de humedad en el suelo

ETPR = evapotranspiración potencial real (mm/mes)	*ETPR = (HS – PM)·(ET) / (CC – PM)* Ec.12	*HS = humedad del suelo (%)* *ET = evapotranspiración de la planta a capacidad de campo (mm/día)* *CC = capacidad de campo (%)* *PM = punto de marchitez (%)*
HSv = humedad del suelo (% por volumen)	*HSv = HSp · DA / Den.Agua* Ec. 13	*HS = HSv · PR* *Hs = humedad del suelo como lámina de agua (mm)* *HSp = humedad del suelo (% por peso)* *DA = densidad aparente (g/cm3)* *Den.Agua = densidad del agua (g/cm3)* *PR = profundidad de raíces (mm)*
C1 = coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración	*C1 = (HSi – PM + Pi) / (CC – PM)* Ec. 14	*HSi = humedad del suelo al inicio del mes (mm)* *Pi = precipitación que infiltra (mm)* *CC = capacidad de campo (mm)*

		PM = punto de marchitez (mm)
C2 = coeficiente de humedad al final del mes después de que ocurra la evapotranspiración	*C2 = (HSi – PM + Pi – ETR1) / (CC – PM)* Ec. 15	*ETP = evapotranspiración potencial (mm/mes)* *HSi = humedad del suelo al inicio del mes (mm)* *Pi = precipitación que infiltra (mm)* *CC = capacidad de campo (mm)* *PM = punto de marchitez (mm)*
ETR1= evapotranspiración potencial real (mm/mes), considera la humedad correspondiente al coeficiente de infiltración	*ETR1 = C1·ETP* Ec. 16	*C1 = coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración* *ETP = evapotranspiración potencial (mm/mes)*
ETPR = evapotranspiración real tentativa promedio en una zona ocurrida durante el mes (mm/mes)	*ETPR = ((C1 + C2) / 2)·ETP* Ec. 17	*C1 = coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración* *C2 = coeficiente de humedad al final del mes después de que ocurra la evapotranspiración* *ETP = evapotranspiración potencial (mm/mes)*
HSi = humedad del suelo inicial (inicio de mes)	*HSi = es igual a la humedad de suelo final del mes anterior (HSf de ecuación 20)*	*HSi = humedad del suelo inicial (inicio de mes) [mm].* *HSf = humedad del suelo final (final de mes) [mm].*

	Ec. 18	
HD = humedad disponible (mm)	*HD = His + Pi - PM* Ec. 19	*HSi = humedad del suelo al inicio del mes (mm)* *Pi = precipitación que infiltra (mm)* *PM = punto de marchitez (mm)*
	Si ((C1 + C2) / 2)·ETP ≤ HD, ETR = ((C1 + C2) / 2)·ETP *Si ((C1 + C2) / 2)·ETP > HD, ETR = HD*	*ETR = evapotranspiración real promedio de la zona (mm/mes)* *ETP = evapotranspiración potencial (mm/mes)* *HD = humedad disponible (mm)*
HSf = humedad del suelo final, al final del mes (mm)	*Si (HD + PM – ETR) < CC, HSf = (HD + PM – ETR)* *Si (HD + PM – ETR) ≥ CC, HSf = CC* *La HSf no puede ser mayor a la CC.* Ec. 20	*HD = humedad disponible (mm)* *PM = punto de marchitez (mm)* *ETR = evapotranspiración real promedio de la zona (mm/mes)* *CC = capacidad de campo (mm)* *HSi = humedad inicial del suelo al inicio del mes (mm/mes)*

Fuente: Elaboración propia con base en Schosinsky (2006)

5.3.11 Cálculo de recarga potencial al acuífero

La recarga al acuífero se realiza si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, es la que recarga el acuífero y se calcula con la ecuación 21 (tabla 6). El volumen final de agua recargada se determina mediante la multiplicación de la Rp con el área del polígono respectivo (Ec. 22).

Tabla 6. Ecuación para la determinación de la recarga potencial

Rp = recarga potencial mensual (mm/mes)	*Rp = Pi + HSi – HSf – ETR* Ec. 21	*Pi = precipitación que infiltra (mm)* *HSi = humedad inicial del suelo al inicio del mes (mm/mes)* *HSf = humedad del suelo final, al final del mes (mm)* *ETR = evapotranspiración real promedio de la zona (mm/mes)*
Volumen de recarga	*V= Rp x A* Ec. 22	*V = volumen de recarga [m3/mes o m3/año].* *Rp = recarga potencial al acuífero [m/mes o m/año].* *A = área donde se genera la recarga potencial [m2].*

5.3.12 Zonas de balance hídrico

Para la construcción de las zonas de balance hídrico, se analizó la información contenida en los mapas de pendientes reclasificadas según los valores determinados por el modelo; el uso de la tierra de los años 1998, 2005 y 2015 y la distribución de la precipitación en el área de estudio. Con estos mapas se procedió a trazar un mapa de polígonos en donde se establecieron 6 zonas de balance, las cuales se delimitaron por la similitud de las propiedades analizadas. En el caso de encontrarse áreas de similar extensión dentro de un mismo polígono, se calcularon puntos medios en cuanto a los valores de kv y kfc. Las características de cada polígono que formaría cada zona de balance, se describen en la tabla 7:

Tabla 7. Características hidrológicas en las zonas de balance para la microcuenca del río Porrosatí

Zona de balance	**Características**
Zona 1	Zona alta de la cuenca. Uso: bosque. Pendiente: mayor a 7 %. Estación meteorológica: Monte de la Cruz.
Zona 2	Zona alta de la cuenca. Uso: plantaciones de ciprés y pasto. Pendiente: mayor a 7 %. Estación meteorológica: Monte de la Cruz.
Zona 3	Zona media de la cuenca. Uso: pasto y bosque. Pendiente: menor a 7 %. Estación meteorológica: Santa Lucía.
Zona 4	Zona media de la cuenca. Uso: cultivo. Pendiente: menor a 7%. Estación meteorológica: Santa Lucía.
Zona 5	Zona media y baja de la cuenca. Uso: cultivo. Pendiente: menor a 7 %. Estación meteorológica: Santa Bárbara.
Zona 6	Zona media y baja de la cuenca. Uso: cultivo y bosque. Pendiente: mayor a 7 %. Estación meteorológica: Santa Bárbara.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 2, se visualiza la distribución espacial de las zonas de recarga en la microcuenca del río Porrosatí.

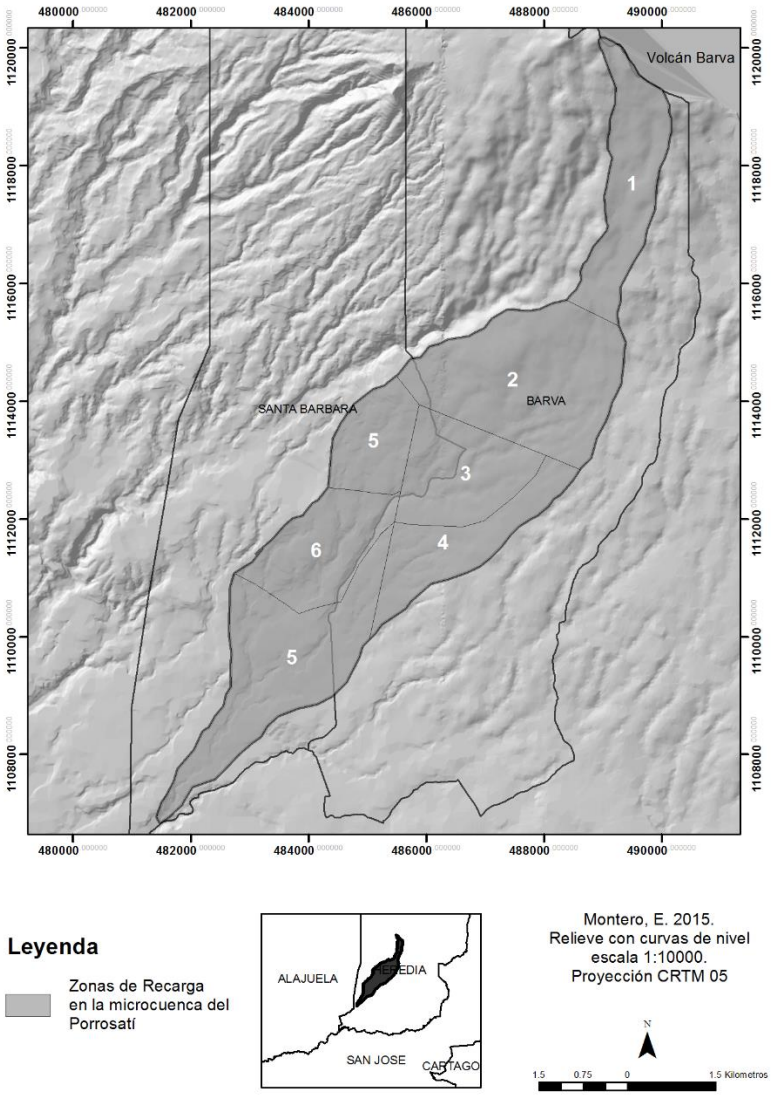

Fig. 2. Zonas de recarga establecidas para los balances hídricos dentro de la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia

5.3.13 Dinámicas de cambio de uso de la tierra periodo 2000-2014

Para obtener estos valores, se realizó una clasificación del uso del suelo mediante la fotointerpretación en sistemas de información geográfica. Con el fin de obtener datos de alta precisión y poder evidenciar en los resultados el efecto de los cambios de uso, principalmente la impermeabilización por efecto de la urbanización, se utilizó imágenes áreas de los años 1998, 2005 y 2015.

La metodología empleada se basó en la realización de mapas de polígonos vectoriales en donde se utilizó una generalización que permitiera diferenciar en función de valores de infiltración, pero que fueran lo suficientemente generales para no sobrecargar el trabajo en esta fase ya de por sí laboriosa. Por ejemplo, se empleó una clase llamada “cultivo”, la cual integra áreas con cobertura de café, tomate, cebolla, ornamentales, entre otros, siendo que en la literatura se pueden encontrar valores específicos para cada cultivo y las diferencias entre estos son muy poco sensibles en términos de los cálculos de recarga por realizar en esta tesis.

Las categorías establecidas para el levantamiento del uso de la tierra fueron:

1. Bosque
2. Plantación de ciprés
3. Pastos
4. Cultivos
5. Urbano

En el caso de las plantaciones de Ciprés, se decidió distinguirlas del uso de bosques, por encontrarse en la literatura datos con diferencias importantes con respecto a los bosques nativos (Buijnzeel 1990). El uso urbano se detalló con el propósito de apreciar los efectos que tiene la impermeabilización del suelo sobre los valores de recarga al agua subterránea en la microcuenca. Al mismo se le asignó un valor de cero en términos de recarga por su efecto impermeabilizante. La determinación de las áreas de uso para cada polígono se puede encontrar en el Anexo 1.

5.3.14 Coeficiente de impermeabilización

Tras la determinación de uso de la tierra y el cálculo de sus respectivas áreas en cada zona de balance, se calculó un coeficiente de impermeabilización por cambio de uso en la microcuenca del río Porrosatí. Dicho coeficiente se determinó a partir del área de uso urbano en donde se establecieron tres años base para el cálculo, los cuales fueron 1998, 2005 y 2015. La escogencia de los años base estuvo limitada a la disponibilidad de imágenes áreas, las cuales se consideraron aceptables, pese a que siempre es preferible una distancia menor.

Específicamente se calcularon dos coeficientes, el de 2000 a 2005 y de 2005 a 2015. La expresión de cálculo se da mediante la resta del área de uso urbano al área de cada polígono en los años base respectivos. Esta diferencia es dividida entre los años de cambio de 1998 a 2005 y de 2005 a 2015 respectivamente. A continuación se muestra la ecuación realizada.

$$Cimp: (Xa - Xb)/Xc$$

Ec. 23

Cimp: coeficiente de impermeabilización (m^2)
Xa: área de recarga en el año base inicial (m^2)
Xb: área de recarga en el año base final (m^2)
Xc: número de años entre Xa y Xb (años)

Se debe tener la precaución de no incluir el año base inicial (Xa) dentro del número de años de cambio (Xc). Así, el cálculo del área de recarga mediante el coeficiente de impermeabilización para el año base final (Xb) debe coincidir con el valor determinado mediante el análisis de las imágenes aéreas. Este cálculo se realizó de manera anual para cada uno de los polígonos de recarga previamente mencionados y puede verse en el Anexo 2.

5.4 Fase III: Escenarios de recarga y demanda hídrica en los tractos temporales 2025-2030 y 2050-2055

Para determinar los escenarios de recarga hídrica, se utilizó el método detallado en la fase II, variando únicamente los parámetros de uso de la tierra y empleando los escenarios de temperatura y precipitación elaborados por Alvarado et al. (2012).

Las principales propiedades del suelo como la textura, capacidad de campo, punto de marchitez y conductividad hidráulica son constituidas a través de complejos procesos pedogénicos durante prolongados periodos de tiempo, por lo que se tomaron como constantes para su utilización dentro de las modelaciones (Pritchett 1986; Núñez 1981).

Con los datos de climatología se incorporó la incidencia del cambio climático, tomando como base las proyecciones de temperatura y precipitación modeladas por el IMN (Alvarado et al. 2012) en el escenario de emisiones A2. El método utilizado en dicho estudio cuenta con una robustez metodológica. Además de mostrar un nivel de detalle aceptable considerando que el escalamiento de fenómenos globales a escala local es un tema aún en desarrollo a nivel mundial por cuanto no se han definido metodologías estandarizadas ante la complejidad que comprende cada caso individual. Teniendo esto en cuenta, a continuación se describen con detalle los métodos seguidos en Alvarado et al. (2012) para su corroboración.

5.4.1 Datos climáticos

La base de la dimensión climatológica dentro del proyecto está basada en las predicciones climatológicas realizadas por Alvarado et al. (2012) para el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. Se estableció de esta manera al considerar que tanto los datos de entrada como los modelos utilizados poseen una buena calidad y, en consecuencia, sus resultados fueron tomados como robustos.

En dicho estudio se utilizaron 5 modelos de circulación general (MCG), que generaron datos de temperatura y precipitación máxima, mínima y promedio. Los MCG empleados fueron uno regional (PRECIS) y cuatro globales: UKMO-HadCM3, UKMO-HadGEM1, CGCM3.1 (T47) y CSIRO-Mk3.0. Los autores promediaron los resultados de los modelos para obtener un único resultado que contemplara las variaciones que cada uno de estos modelos puede generar. Los datos de entrada de estos modelos fueron tomados de la base de datos climatológicos monitoreados por el IMN. Los datos proyectados contemplaron escenarios de temperatura y precipitación hasta el año 2100.

Una vez obtenidos los datos de precipitación y temperatura, los autores procedieron a efectuar un proceso de reducción de escala (*downscaling*). Según Alvarado et al. (2012), para la generación de los datos climatológicos a futuro, la resolución horizontal fue de 30 segundos de arco en latitud y longitud (0,01°, equivalente a 1 km aproximadamente), la cual fue obtenida mediante el método delta y una climatología de muy baja resolución espacial propuesta por Hijmans et al. (2005).

En el informe antes mencionado, los resultados son presentados en escalas de tiempo que varían de la mensual a la climática. Mensualmente están incluidos los 12 meses del año; trimestralmente se seleccionaron los siguientes meses: febrero-abril, mayo-julio, agosto-octubre y noviembre-enero; estacionalmente se definieron dos períodos: mayo-octubre y noviembre-abril; climáticamente (períodos de 30 años), el horizonte de tiempo 2011-2100 fue dividido en tres subperíodos de 30 años cada uno: 2011-2040 denotado como 2020, 2041-2070 representado por 2050 y 2071-2100 denotado por 2080. Las resoluciones espaciales varían desde 1,25° (138 km) del modelo HadGEM1 hasta los 5.6° (622 km) del SCIRO-Mk3.

La regionalización climática se presenta en la forma correspondiente a la del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) que consta de 7 zonas: Pacífico Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Valle Central, Zona Norte, Caribe Norte y Caribe Sur. Y la propuesta del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) clasificadas en 34 cuencas hidrográficas (Alvarado et al. 2012).

5.4.2 Determinación de los escenarios de temperatura y precipitación 2020-2015 y 2050-2055

Teniendo en cuenta que los balances hídricos históricos se realizaron con base en los registros climáticos de 3 estaciones meteorológicas, los datos de los escenarios debieron ajustarse lo más posible a la ubicación geográfica de las estaciones. Al tener datos en cuadrículas de 1 kilómetro por 1 kilómetro de la climatología base 1950 al 2000, se escogieron los valores de pixel en los cuales encajaran los puntos de ubicación de las estaciones. La razón de esta determinación y no trabajar con promedio de todos los pixeles del área de estudio, fue la intención de homologar los datos de los registros con los de la climatología base, según Hijmans et al. (2005), y los eventuales cálculos de los escenarios de precipitación y temperatura promedio para la cuenca.

De esta manera, una vez seleccionado el valor de pixel correspondiente a cada una de las tres estaciones (Monte de la Cruz, Santa Lucía, Santa Bárbara), se utilizaron los datos con la misma lógica de interpolación aplicada para los registros históricos utilizando interpolación por polígonos de Thiessen. A estos valores promedio mensuales de la climatología base se les sumó el valor de anomalía generado con el modelo PRECIS, en donde únicamente se pudieron utilizar los valores de un pixel, pues la escala de los datos era muy alta (50x50 km). Una vez obtenidos los escenarios de temperatura, se calcularon los escenarios de evapotranspiración por el método Thornthwaite, explicado en el punto 5.3.8. Junto a los valores de precipitación se introdujeron como datos de entrada en el modelo de recarga Schosinsky (2006), detallado en la sección 5.3.1. Con esto se obtuvieron los valores de recarga potencial de agua subterránea.

Para generar el dato de volumen de agua recargado, se multiplicó el valor de recarga potencial de cada polígono por el área de recarga respectiva. Para obtener los escenarios de uso de la tierra, se calculó un coeficiente de cambio anual explicado a continuación.

5.4.3 Escenario de uso de la tierra 2020-2025 y 2050-2055

Para la determinación de los escenarios de cambio de uso de la tierra, se procedió de manera similar a lo explicado en el punto 5.3.13. Se calculó un coeficiente de cambio de área de uso, el cual es multiplicado por la cantidad de años que se desea conocer. El coeficiente puede ser negativo o positivo según el tipo de uso gane o pierda área en los años de referencia analizados (1998-2015). Similar a lo encontrado en el análisis de las imágenes aéreas, el principal cambio de uso se da en la variación de terrenos de uso de pastos o agrícolas hacia usos urbanos. Esto por cuanto las principales áreas con coberturas boscosas se ubican en categorías de protección como el Parque Nacional, áreas de protección de nacientes y ríos, además de los programas de Pagos por Servicios Ambientales. En tanto, el cambio de uso 98-15 no registró un incremento de áreas de cultivo o pastos, siendo la única tendencia positiva el aumento del área urbanizada.

Si bien es cierto, la aplicación del coeficiente de cambio de uso puede resultar una generalización muy gruesa, la cantidad de variables en juego como el aumento demográfico, el contexto socioeconómico, la modificación de reglamentos de leyes y reglamentos en áreas de protección, incluido de manera particular la modificación del Anillo de Contención Urbana del Gran Área Metropolitana, el cual restringe la planificación del uso de la tierra de las municipalidades concernientes en áreas de protección, entre otra serie de factores, pueden afectar la modificación del uso de la tierra en el mediano plazo (2020-2025) y en mayor caso el horizonte de largo plazo (2050-2055). En tanto, la herramienta de cálculo utilizada si bien guarda mucha incertidumbre por factores externos, permite hacer una aproximación válida con respecto al estudio del cambio de uso histórico reciente, siendo ventajas la poca extensión de la cuenca, la delimitación clara de límites de reserva y las fronteras de uso modificadas en las últimas dos décadas.

5.5 Fase IV: Recomendaciones a la gestión integral del recurso hídrico en la microcuenca, apoyadas en el uso de tecnologías limpias

En esta etapa fueron fundamentales los resultados obtenidos en las fases anteriores pues las recomendaciones estarán en función de la mitigación de los impactos negativos o estrategias de adaptación. Se establece cuál es la principal determinante en la presión por el abastecimiento del recurso hídrico, ya sean las condiciones climáticas, el crecimiento demográfico o los cambios de uso de la tierra. Con base en los resultados obtenidos, se realiza la propuesta de gestión del recurso hídrico con énfasis en la priorización de agua para consumo humano apoyada por el uso de tecnologías limpias.

Pese a que no se pretende elaborar un plan de manejo de recurso hídrico, el potencial aumento de la demanda como tendencia global aunada a una eventual reducción de los suministros ya sea en tiempo o espacio, obligan a priorizar usos y prácticas en eventuales planes de manejo (UNEP 2012). En tanto, la propuesta podrá ser utilizada como un insumo de planificación dirigida a los entes encargados del suministro de agua en la microcuenca, en donde se integren tecnologías limpias para la adaptación a los cambios y prácticas que permitan aumentar la resiliencia de los sistemas de acueductos ante las principales limitantes a la disponibilidad del agua para consumo humano.

Se aplicaron criterios de priorización de zonas de recarga para la obtención de agua para consumo humano (Rodas 2008) y el uso de tecnologías limpias que permitan asegurar el suministro mediante mecanismos de disminución del consumo o adaptación a los cambios en el comportamiento hidrológico (García & Campos 2005). Para la priorización de áreas de la conservación de áreas de recarga, se efectuó una descripción de los factores analizados con base en los resultados obtenidos, respaldado por un mapa que muestra el nivel de prioridad establecido para la microcuenca en una escala de 1 a 3, siendo 1 la máxima prioridad.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Fase I: Diagnóstico de las condiciones hidrológicas en la microcuenca del río Porrosatí

6.1.1 Caracterización biofísica de la microcuenca

La microcuenca del río Porrosatí destaca con una gran cantidad de afloramientos de agua subterránea y un cauce superficial permanente en todas las épocas del año. Pese a su relativa poca extensión, permite el abastecimiento de una cantidad importante de actividades humanas de la provincia de Heredia, en donde se encuentran gran cantidad de concesiones de manantiales, pozos y captaciones superficiales.

Los entes encargados del suministro de agua potable son las Asadas de San Pedro, Puente Salas y San José de la Montaña; los acueductos municipales de Santa Bárbara y Santo Domingo; así como la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (tabla 8). A la vez, múltiples usuarios de carácter privado ostentan concesiones subterráneas y superficiales dentro de la microcuenca.

Tabla 8. Ubicación de manantiales georeferenciados pertenecientes a los diferentes acueductos en la microcuenca del río Porrosatí, 2013

Número	Manantial	Latitud	Longitud	Acueducto
1	Minas 1	1113896,39	487974,09	San José de la Montaña
2	Minas 2	1113896,39	487974,09	
3	Minas 3	1113896,39	487974,09	
4	Braely	1113644,24	488144,81	
5	San Miguel	1113669,03	488339,82	
6	Pérez 1	1114099,46	487889,30	
7	Pérez 2	1114068,45	487904,27	
8	Pérez 3	1114056,46	487892,26	
9	Steinvorth	1113492,64	487206,36	San Pedro
10	Segura	1113457,74	487355,28	
11	Naranjo	1113459,70	487191,97	
12	Centro	1113457,66	487185,21	
13	Bosque	1113458,13	487142,92	
14	Tina 1	1112318,88	485399,27	Puente Salas
15	Tina 2	1112324,08	485402,78	
16	Tina 3	1112307,38	485402,11	
17	Acron	1112474,64	485924,81	Municipalidad Santa Bárbara
18	Chayotera	1112575,10	485474,96	
19	Roble Alto	1113124,27	486225,45	
20	Flores 1	1116987,39	489491,02	ESPH
21	Flores 2	1116946,94	489366,26	

22	Perez	1114146,12	488000,00	Municipalidad Santo Domingo

Fuente: Elaboración propia con datos de campo

Los caudales asignados a los diferentes entes según concesiones, van desde los 6 hasta los 30 L/s, siendo lo más común encontrar múltiples concesiones de bajo caudal para un mismo ente operador (DAM 2009). Como se evidencia en la figura 3, las fuentes de agua de los entes operadores normalmente están agrupadas en sectores, como resultado del hallazgo empírico y la eventual solicitud de concesión por los miembros de los entes. Muestra esto último de la poca planificación del recurso a nivel gubernamental.

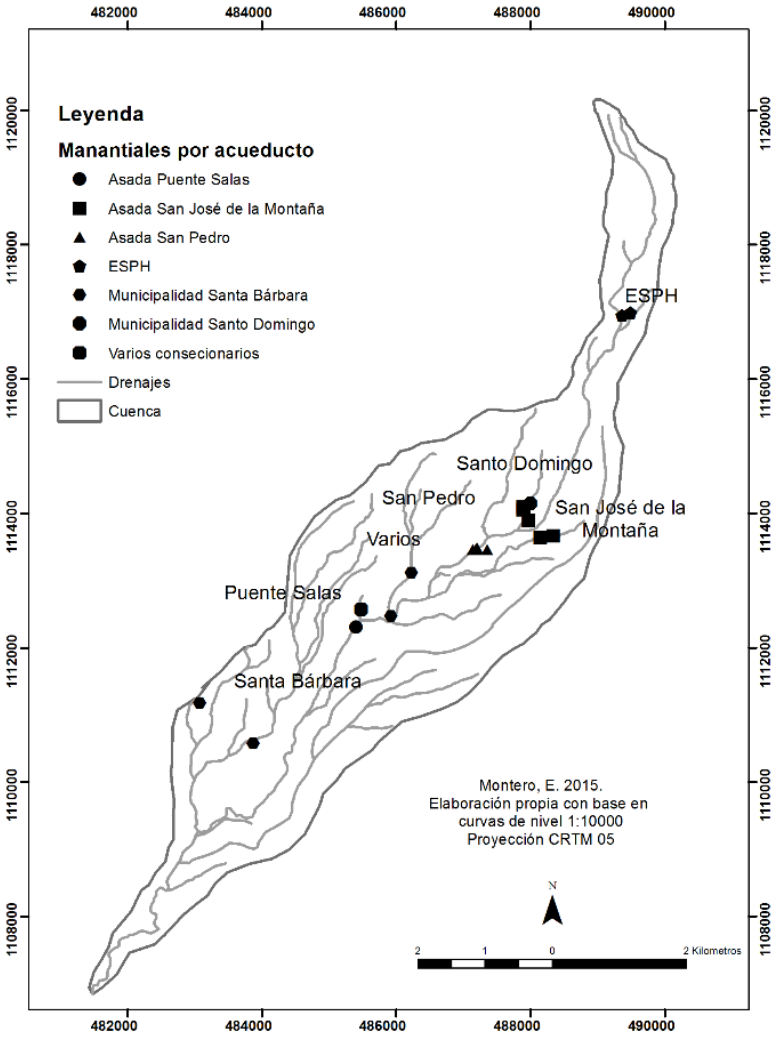

Fig. 3. Ubicación de las fuentes de agua de los entes operadores en la microcuenca

Para los entes operadores que cubren mayor cantidad de población, las fuentes en la microcuenca del río Porrosatí representan una parte de sistemas más amplios como el caso de la ESPH y las municipalidades de Santa Bárbara y Santo Domingo.

Las Asadas de San José de la Montaña y Puente Salas obtienen la mayor proporción de fuentes en la microcuenca, sin embargo poseen fuentes en otras microcuencas. En el caso de la Asada de San Pedro, la totalidad de la producción de agua para abastecimiento se toma de manantiales de la microcuenca.

6.1.2 Clasificación en tipo de usuario

Se encontró una similitud en la clasificación de los usuarios de la presente propuesta con lo utilizado por la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP) en el tipo de tarifas asignadas a las Asadas. En números totales los entes encargados del suministro de agua para consumo humano en la microcuenca ascienden a los 7 423 abonados, siendo la mayor proporción de origen domiciliar (ver tabla 9).

Tabla 9. Distribución de abonados según el uso del agua de la población abastecida con fuentes dentro de la microcuenca

Clasificación según tipo de usuario	**Acueducto**			
	San Pedro	Puente Salas	San José de la Montaña	ESPH
Domiciliar	1953	1087	1234	2654
Comercial-Industrial	74	43	102	261
Agropecuario	6	4	5	0
Total	2033	1134	1341	2915

Fuente: Elaboración propia

La Asada de San Pedro cuenta con un total de 2033 abonados, lo que significa más de diez mil habitantes abastecidos; la Asada de Puente Salas brinda servicios a un total de 1098 abonados, representando una población de más de 4700 habitantes; mientras la Asada de San José de la Montaña abastece a 1341, lo que significa cerca de 5500 habitantes. La ESPH suministra agua a un amplio sector de la provincia de Heredia y cuenta con una amplia gama de manantiales y pozos, dentro de los cuales se encuentran específicamente dos manantiales ubicados dentro de la microcuenca del Porrosatí, como se nota en la tabla 10, de los cuales se estimó la población abastecida con estas fuentes y se presenta en la tabla 9.

Como se observa en la figura 4, el tipo de usuario predominante es el domiciliar. Una pequeña porción que en ninguno de sistemas de acueducto analizados sobrepasa el 10 %, está registrado como comercial–industrial, siendo la ESPH la que cuenta con mayor proporción en esta clasificación. De manera casi insignificante se encuentra el uso agropecuario; aunque en el área de estudio existen áreas estimables dedicadas a labores agropecuarias, estas abastecen sus labores con concesiones propias de origen superficial, pozos o nacientes.

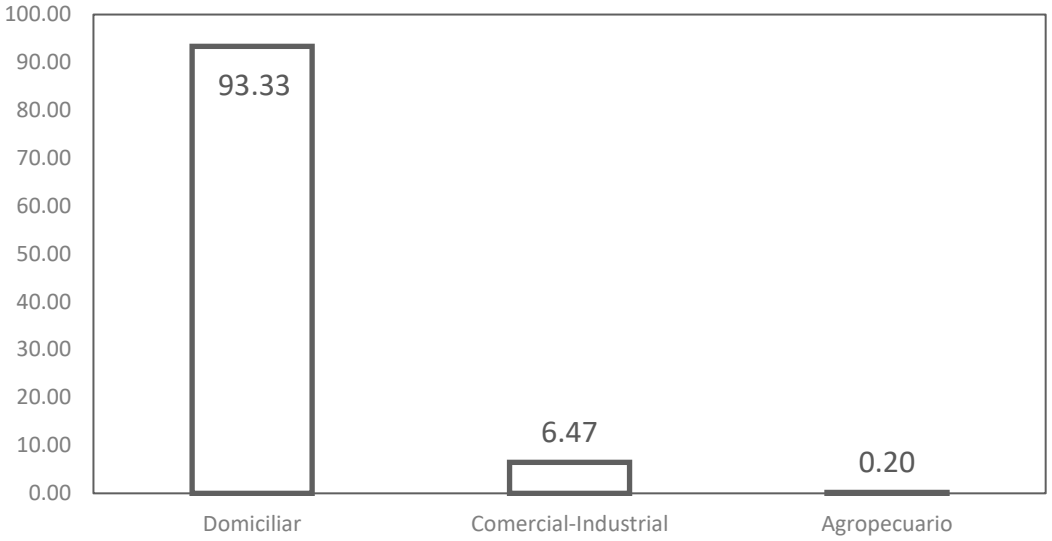

Fig. 4. Proporción de usuarios según clasificación por tipo de uso del agua. Fuente: Elaboración propia.

Seguido de la ESPH, la Asada con mayor número de abonados es la de San Pedro, y la de Puente Salas es la de menor cantidad de pajas de agua otorgadas. Las tres Asadas cuentan un bajo número de concesiones de uso agropecuario, mientras que la ESPH no cuenta con ninguna concesión en esta condición. Este último es el acueducto que posee mayor número de pajas otorgadas a usuarios clasificados como uso comercial-industrial. La Asada de San Pedro cuenta con un elevado número de usuarios domiciliares, lo cual está en concordancia con la densidad poblacional de los distritos a los que abastecen los acueductos. Los usuarios agropecuarios representan únicamente el 0,2 % de los usuarios registrados en los acueductos. Este dato destaca pues como se analizará en este documento, el uso de la tierra de la microcuenca tiene una fuerte presencia agrícola.

6.1.3 Principales características biofísicas en relación con el comportamiento hidrológico en la microcuenca del río Porrosatí

El comportamiento hidrológico de una microcuenca integra una gran cantidad de factores que interactúan entre sí y a la vez son dependientes de otros. El resultado de estas interacciones desencadena en un determinado comportamiento, razón por la cual a continuación se describirán algunos de los aspectos conocidos más relevantes en el análisis hidrológico de cuencas con énfasis en los factores que intervienen en el balance hídrico para la estimación de la recarga de agua subterránea.

Variación altitudinal: La microcuenca tiene su punto de origen en las faldas del volcán Barva, siendo los 2870 m sobre el nivel del mar el punto de mayor altitud. Como es habitual, conforme se visualizan las partes medias y bajas, la altitud desciende hasta cerca de los 500 m sobre el nivel del mar. De acuerdo con la figura 5, las partes altas presentan un relieve más accidentado, dando paso a terrenos más planos en donde se asientan importantes centros de población.

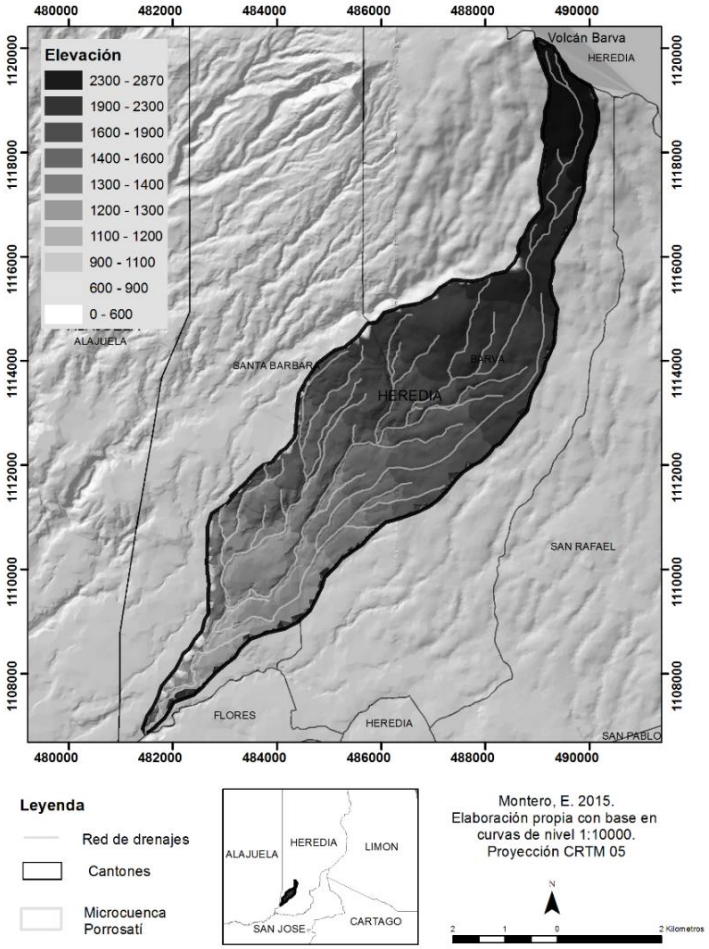

Fig. 5. Modelos de elevación digital de la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia.

Pendientes: El mapa de pendientes muestra valores de altas a moderadas en la parte asociada a su relieve de origen volcánico. En las partes media y baja se presentan pendientes de moderadas a suaves.

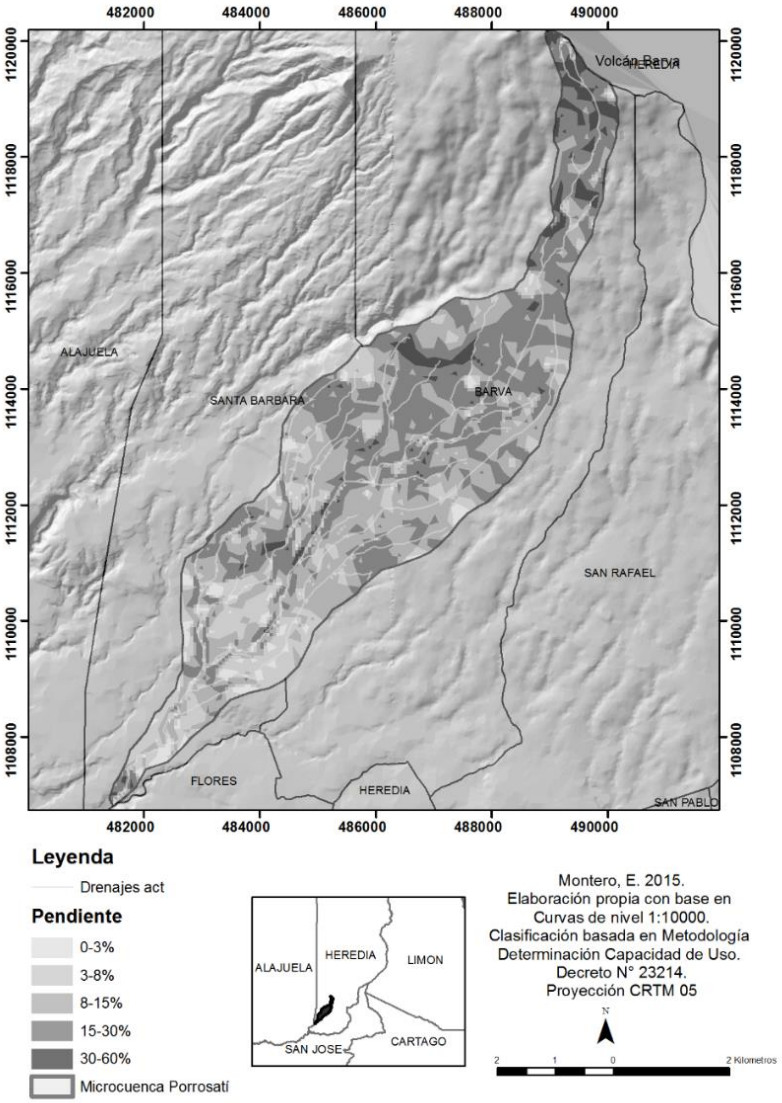

Fig. 6. Escala de pendientes en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia.

La mayor área de la microcuenca, cerca del 80 %, se encuentra en un rango de 8 a 30 % de pendiente, lo que da cuenta de un terreno escarpado, principalmente en las partes altas y medias junto a las zonas de cañón del cauce principal. Un 15 % se encuentra dentro del rango de 3 a 8 %, lo que da cuenta de terrenos plano ondulados hacía las partes media y bajas (ver tabla 10).

Tabla 10. Distribución de la pendiente según rangos

Categoría	Rango %	Sumatoria área (m^2)	Porcentaje	Pendiente Promedio (%)
1	0-3	884276	3,2	
2	3-8	4427302	15,8	
3	8-15	10389045	37,1	14,4
4	15-30	10952196	39,2	
5	30-60	1316498	4,7	

Fuente: Elaboración propia

Geología: Resultante del análisis espacial mediante herramientas SIG, se muestra que la totalidad de la microcuenca deriva del mismo material geológico. La influencia del volcán Barva en la conformación geológica presente en la microcuenca es notable. La edad del material rocoso data del Cuaternario, caracterizados por facies proximales de rocas volcánicas recientes, compuestas por coladas de lava, aglomerados, lahar y ceniza volcánica (USGS 1987).

Dentro de la cuenca se encuentran formaciones hidrogeológicas del miembro Porrosatí-Carbonal, los cuales están formados por arenas volcánicas gruesas y tobas arcillosas meteorizadas, formando acuitardos de gran extensión, donde subyacen los acuíferos locales Barva Superior (Mapa Hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica). Estas pertenecen a la formación geológica Barva, constituida por coladas de lavas andesiticas y andesito basalticas, los cuales en general por fracturación de la roca, favorecen los procesos de infiltración y percolación de agua hacia los acuíferos (Denyer & Kussmaul 2000).

Geomorfología: La mayor parte de la microcuenca en estudio presenta geomorfologías asociadas al volcán Barva con topografías de suave pendiente y se le clasifica como un escudo andesíticas o estratovolcán. En el sector montañoso el cono volcánico del Barva determina en gran medida una topografía escarpada de origen volcánico que da origen a una importante densidad de ríos que drenan hacia el Valle Central y la Cuenca del río Virrilla específicamente (fig. 6). En cuanto las partes medias y bajas de la microcuenca, se caracterizan por un piemonte de relieve ondulado a plano-ondulado, conformado por depósitos de lavas andesíticas del Cuaternario con capas de cenizas y piroclástos de origen lahárico (Mata & Ramírez 1999; Bergoeing 2007).

Suelos: La totalidad de la microcuenca está compuesta por suelos de tipo andisoles. En estos suelos el contenido de arcilla es más elevado, siendo las texturas dominantes franco arcilloso, franco arcillo arenosa y arcillosa. Se caracterizan por tener una densidad aparente baja, lo que los hace presentar buenas características cuando se encuentran con cobertura vegetal, pero suceptible

a la compactación por actividades como la ganadería y agricultura intensiva (Alvarado et al. 2000) (fig. 7).

La derivación volcánica de estos suelos les confieren una buena estructura y velocidad de infiltración, lo que aunado a las características geológicas, de vegetación y de regímenes climáticos han permitido la conformación de los principales acuíferos del Valle Central, los cuales abastecen a cerca la cuarta parte de la población del país (Reynolds 2002; Alvarado et al. 2000).

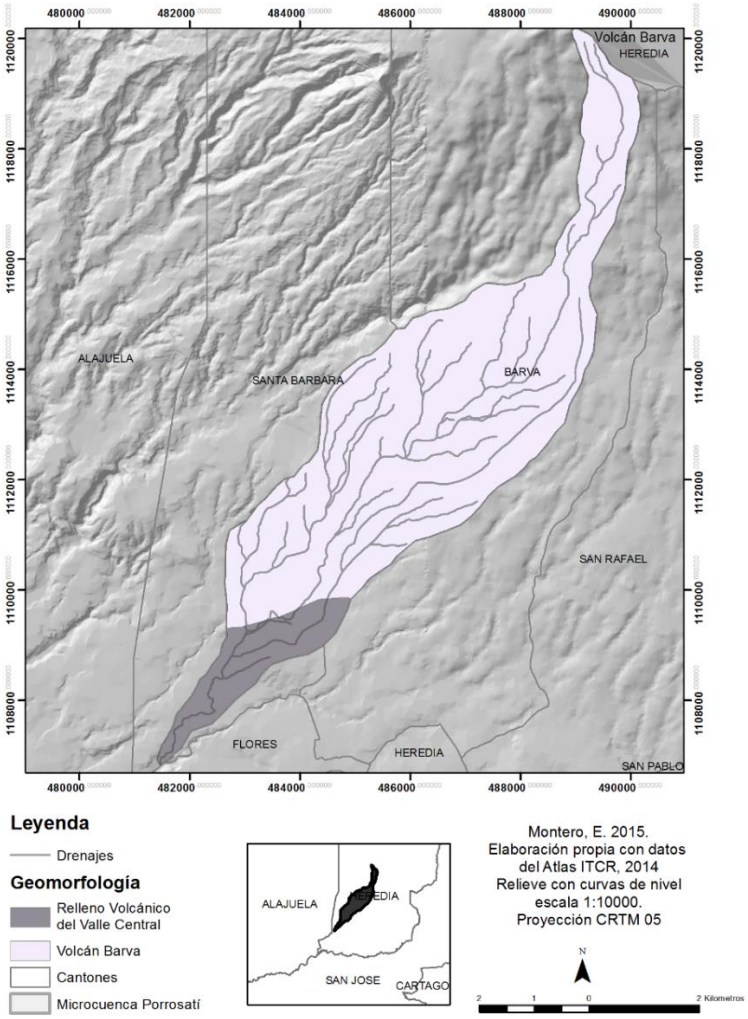

Fig. 7. Conformación geomorfológica de la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia

6.1.4 Uso de la tierra

En relación con el comportamiento hidrológico de la microcuenca, el uso de la tierra es fundamental, tanto o más que los suelos, geomorfología, geología y topografías,

pues como se analizará de manera detallada en capítulos posteriores, los cambios de uso tienen el potencial de modificar radicalmente los sistemas subterráneos. Tal es el caso del efecto impermeabilizante de las áreas urbanas sobre la recarga de acuíferos.

En la tabla 11 se sintetizan los principales resultados de la clasificación del uso de la tierra en la microcuenca del río Porrosatí para el año 2015. Esta clasificación responde al interés de generalizar un poco los usos y evidenciar de forma más drástica los cambios ocurridos en el tiempo de análisis histórico 2000–2014.

Tabla 11. Proporción en usos del suelo en la microcuenca del río Porrosatí, 2015

Uso de la tierra	**Área (Km^2)**	**Porcentaje (%)**
Bosque	6,7	24,0
Plantación	3,8	13,7
Pasto	3,6	12,7
Cultivo	10,1	36,1
Urbano	3,8	13,5
Total	**28**	**100**

Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos para el 2015 indican que la mayor área de uso está dedicada a cultivos. Dentro de esta categoría se encuentran diversos cultivos como tomate, cebolla, ornamentales y algunas otras hortalizas con áreas de cultivo pequeñas, siendo el área cultivada de café la que genera la distinción. La clasificación de bosques es la segunda en importancia, en donde se incluyen bosques primarios, secundarios y riparios. En este sentido se decidió fragmentar las plantaciones forestales (tercera en importancia) de los bosques pues al hallarse evidencias suficientes de diferencias en el comportamiento hidrológico por evaluar en el balance hídrico.

El área urbana cubre un 10,4 %, con focos dispersos en las zonas media y baja. La cuenca está situada en una dinámica rural con tendencias a la urbanización, similar a lo encontrado por Ureña (2005) para la microcuenca del río Ciruelas, la cual comparte la divisoria de aguas del margen oeste del Porrosatí. Los pastos representan el 12,7 % del área de la microcuenca en donde aún persisten terrenos pequeños para la producción de leche y queso.

En la figura 8 se muestra la distribución espacial de los usos de las tierras actuales a lo largo de la microcuenca. En la parte alta se ubica un parche grande de bosque, el cual pertenece a un sector sur del Parque Nacional Braulio Carrillo sector volcán Barva. En la parte alta se combinan paisajes escarpados con bosques riparios y secundarios, además de plantaciones forestales de ciprés (*Cupressus lusitánica*) principalmente, bajo el Programa de Servicios Ambientales (PSA). En la zona media se da la mayor presencia de cultivos y algunos focos urbanos como el caso de los

distritos de San José de la Montaña y Birrí. Los pastos con árboles dispersos son más frecuentes hacia la zona media y baja, en donde hay algunos poblados importantes como San Pedro y Puente Salas de Barva, así como Barrio Jesús de Santa Bárbara en la zona más baja de la microcuenca.

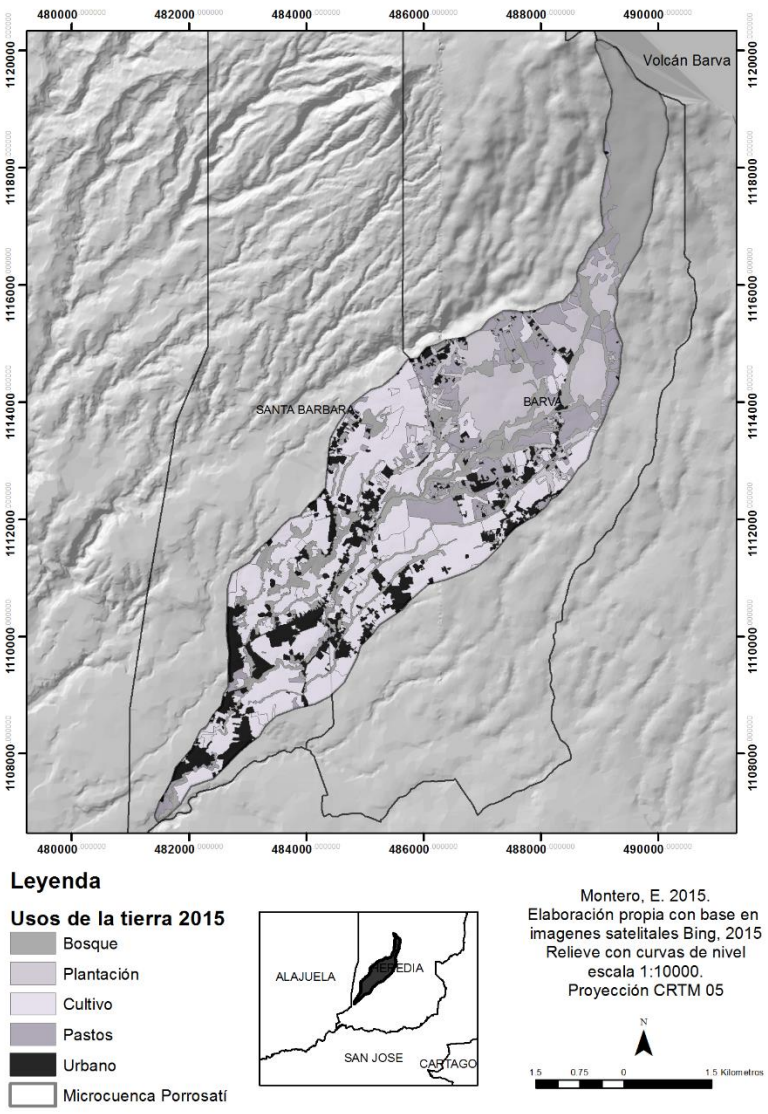

Fig. 8. Uso de la tierra en la microcuenca del río Porrosatí, 2015. Fuente: Elaboración propia.

6.1.5 Concesiones de agua dentro de la microcuenca del río Porrosatí

La densidad de concesiones da cuenta de la relevancia y dependencia de las fuentes originadas dentro de las microcuencas en estudio para el abastecimiento de agua potable de una zona del Valle Central.

Por la naturaleza de la microcuenca, como se ha mencionado anteriormente, en donde confluyen una serie de factores que la hacen tener una producción de agua

de suma relevancia para un sector de la provincia de Heredia, el número de concesiones es estimable como se nota en la tabla 12. La mayoría de las concesiones son de manantiales, seguidos por pozos y fuentes superficiales. En lo que respecta a abastecimiento de consumo humano, es poco común la utilización de fuentes superficiales, siendo estas empleadas con unas pocas excepciones para abastecimiento de proyectos agropecuarios.

La considerable cantidad de concesiones de manantiales y de fuente superficial en una microcuenca tan pequeña, podría también indicar posibles sobreexplotaciones con respecto a los caudales ecológicos requeridos. El caudal concesionado asciende a los 3 500 litros por segundo, siendo el caudal de concesión un promedio del comportamiento de las fuente. El promedio de caudal concesionado muestra que las fuentes superficiales son ampliamente superiores, lo que aunado a la posible existencia de explotaciones ilegales, pueden estar influyendo negativamente en el comportamiento del cauce principal y sus afluentes con los agravantes que esto trae.

Tabla 12. Concesiones de agua registradas en la microcuenca del río Porrosatí

	Número de concesiones	**Caudal concesionado (l/s)**	**Promedio por concesión (l/s)**
Manantial	92	2420,4	26,3
Pozo	50	159,1	3,2
Superficial	19	959,2	50,5
Total	**161**	**3539**	

Fuente: Elaboración propia con datos de la Dirección de Aguas, MINAE

En las partes media y baja de las microcuencas se encuentra una concentración importante de pozos, aspecto que merece un análisis detenido en relación con el impacto que la extracción podría tener sobre el nivel freático de los acuíferos subyacentes.

En el caso de las concesiones de pozos, las restricciones de perforación en partes altas de las microcuencas y la abundancia de manantiales hacen que se observen pocas concesiones en esta zona. Relacionado a la ubicación de los manantiales en la parte alta y la poca presencia de los mismos en partes media y baja, se observa una densidad de perforaciones principalmente ubicada en la parte media, en donde se concentra la mayor zona poblada en ambas microcuencas (ver fig. 9).

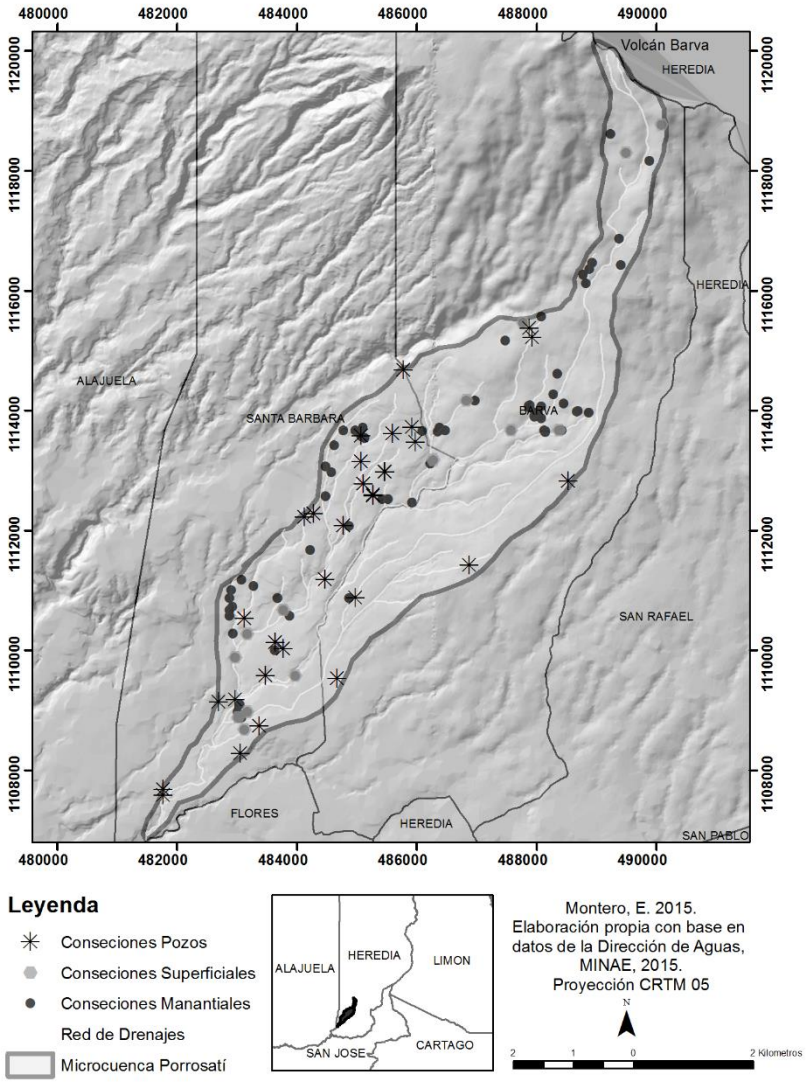

Fig. 9. Concesiones de agua según origen dentro de la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia.

Por último, las concesiones de fuente superficial son utilizadas principalmente como reserva de emergencia en caso de acueductos y fuente para labores agropecuarias. La mayor densidad se encuentra hacia las partes altas en donde se concentran actividades agrícolas y pecuarias. También, hacia la parte baja existen canales de riego, los cuales han dejado de tener importancia al disminuirse en área destinada a labores agropecuarias.

6.1.6 Comportamiento de la precipitación en la microcuenca del Porrosatí de 2000 a 2014

El análisis de las sumatorias de precipitación mensual para las estaciones con influencia sobre la microcuenca del Porrosatí, a saber Monte de la Cruz, Santa Bárbara, Santa Lucía y Aeropuerto Juan Santamaría, muestran comportamientos temporales similares. Esto tiene explicación pues al ser una cuenca pequeña las estaciones se encuentran de un mismo régimen climático con variaciones en los volúmenes totales, aducible a la ubicación topográfica de las estaciones. A continuación se describirá el comportamiento general de las cuatro estaciones:

Monte de la Cruz

Ubicada a 1700 msnm, es la de mayor altitud. Su posición topográfica le permite estar influenciada en mayor medida por las lluvias orográficas, teniendo una estación seca con frecuentes precipitaciones de mayor o menor volumen. Lo anterior hace que se el registro con mayor índice de precipitación alcanzando los 1100 m^3 en un mes. Se encuentra en la parte alta de la microcuenca.

Santa Bárbara

Se ubica a 1070 metros de altitud, en una zona de transición de ecosistema de montaña a planicie urbana, caracterizado por su topografía ondulada. Muestra un comportamiento bastante más regular que las otras estaciones, siendo notoria la disminución de la precipitación con respecto a las estaciones Monte de la Cruz y Santa Lucía. Es notable una estación seca definida con una disminución pronunciada de la precipitación. Se encuentra en la parte media de la microcuenca.

Santa Lucía

Localizada en el distrito del mismo nombre perteneciente al cantón de Barva, es la segunda en altitud (1200 m sobre el nivel del mar). Se encuentra en un relieve ondulado, contando con los mayores volúmenes acumulados de lluvia después de la estación Monte de la Cruz. Se ubica en la parte media de la microcuenca.

Juan Santa María

Se encuentra en las inmediaciones del aeropuerto Juan Santamaría a 913 m sobre el nivel del mar. En un entorno urbano, presenta los valores de precipitación más bajos, llegando a un máximo en los quince años de análisis de 550 m^3. El comportamiento coincide con la lejanía de la zona montañosa de la microcuenca, ubicándose en la parte baja de la cuenca.

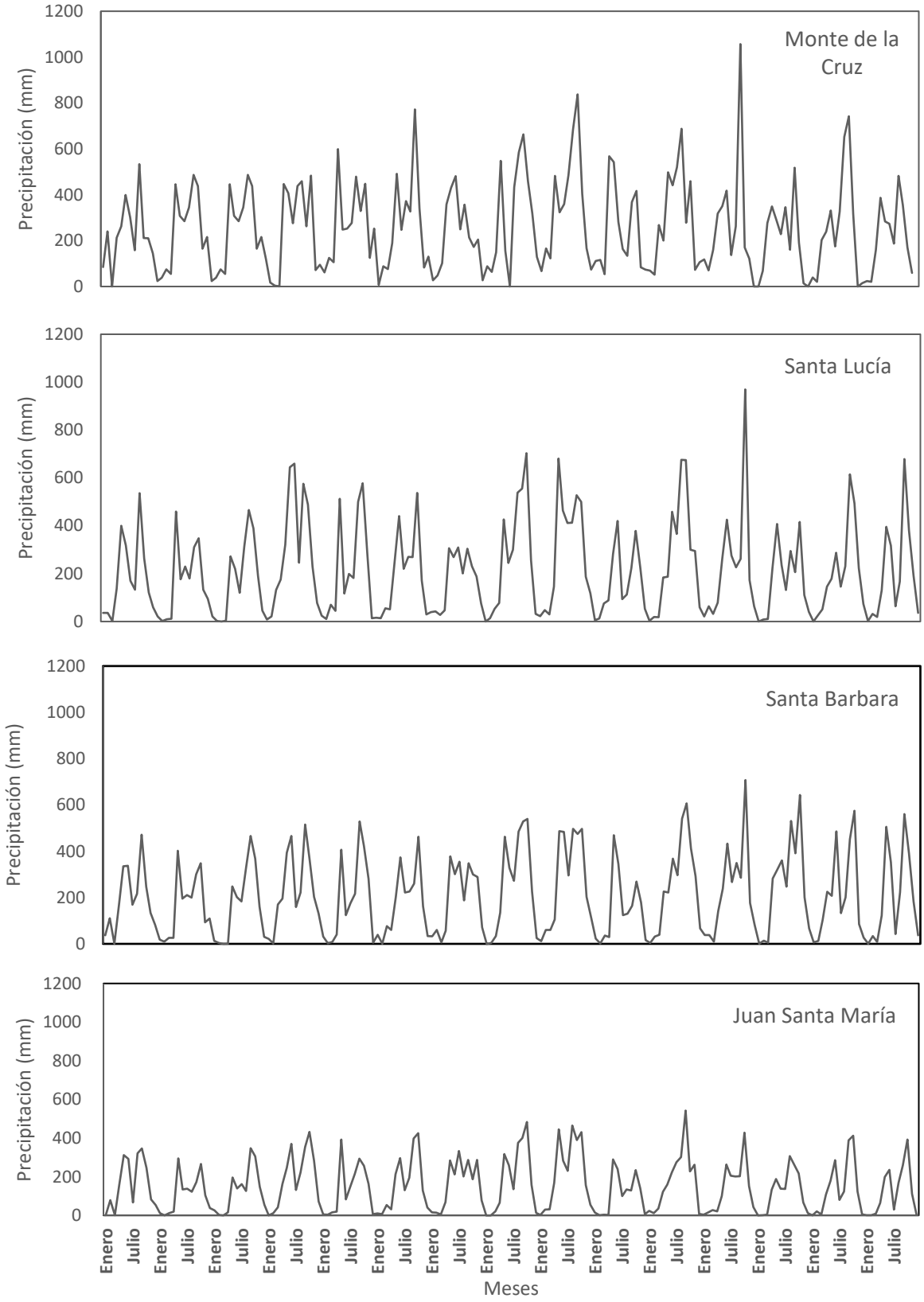

Fig. 10. Comportamiento de la precipitación mensual en las estaciones con influencia en la microcuenca del río Porrosatí, 2000-2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN corregidos.

De las gráficas anteriores mostradas como conjunto en la figura 10, se sintetiza la información en la tabla 13. En esta se muestra claramente un volumen mayor en la estación Monte de la Cruz, obteniendo una precipitación promedio de 256 m^3 y una precipitación anual promedio de 2000 a 2014 de 46108 m^3. Las estaciones que cubren la parte media de la cuenca tienen un comportamiento similar en cuanto a lluvia mensual y total en el periodo 2000–2014. Por otra parte, la estación Juan Santamaría, ubicada en la parte baja de la cuenca, tiene un comportamiento notoriamente menor inferior con un promedio de 152 m^3 y un volumen mensual de 27356 m^3.

Tabla 13. Características de los datos de precipitación de las estaciones con influencia del área de estudio (mm)

Estación	Promedio mensual	Desviación estándar	Total de meses	Máximo mensual	Precipitación total 2000 - 2014
Monde de la Cruz	256,1	194,4	180	1056,7	46107,8
Santa Lucía	213,7	193,6	180	969,4	38471,8
Santa Bárbara	210,4	175,5	180	707,5	37879,8
Juan Santamaría	151,9	135,2	180	542,3	27355,7

Fuente: Elaboración propia con datos del IMN

Es visible la homogeneidad estacional con variaciones de volumen total de precipitación. Lo anterior es señal de la uniformidad de las estaciones del clima en la cuenta y la respuesta a las diferentes alteraciones climáticas como el Fenómeno del Niño-Oscilación del Sur (fig. 11).

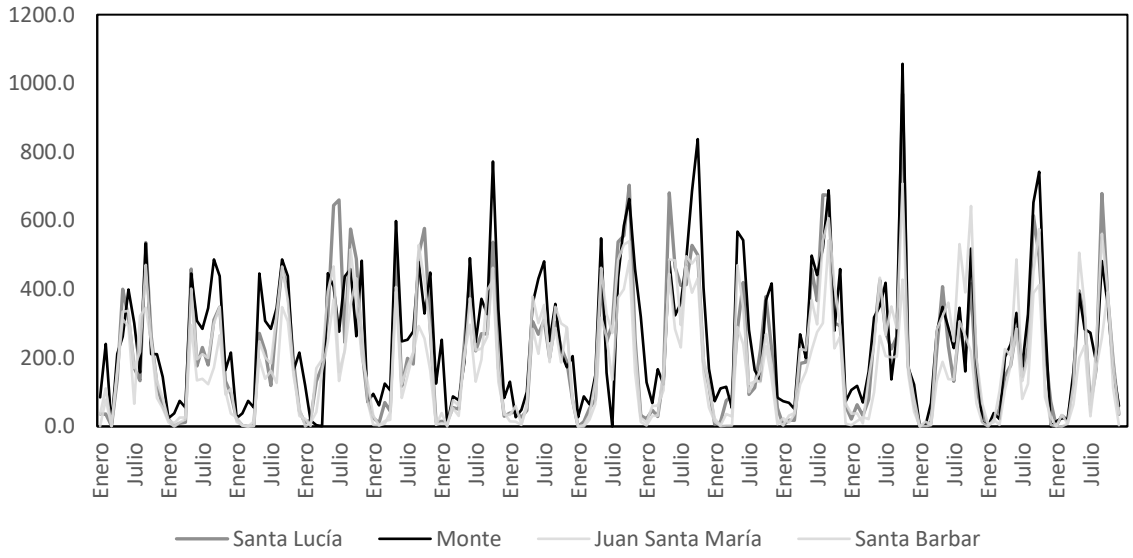

Fig. 11. Comparación del comportamiento mensual de las estaciones en el periodo 2001-2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN.

6.1.7 Comportamiento hidrométrico de manantiales

Como se ha mencionado anteriormente, los acueductos presentes en la microcuenca dependen en gran medida de la producción de agua de los manantiales situados en las partes altas. Los mismos son muy susceptibles al comportamiento climatológico teniendo una respuesta relativamente rápida a los incrementos o disminuciones de la precipitación. Lo anterior se analizará más a detalle en el siguiente capítulo.

Como parte del trabajo conjunto con la Asada de San Pedro de Barva en años anteriores, se contó con una base de datos pormenorizada del caudal de seis de sus principales manantiales captados, los cuales han sido aforados cada quince días con muy pocos datos faltantes desde el año 2010 hasta diciembre del 2014, fecha final del análisis.

Como se muestra en las figuras 12, 13, 14, 15 y 16, los manantiales muestran variaciones importantes y con algún grado de ciclicidad en el tiempo con respecto a la respuesta del comportamiento climático.

En la figura 12, correspondiente al manantial Chagos, se aprecia un comportamiento bastante regular con un pico positivo en año 2011 y pico negativo hacia 2014. Su caudal oscila entre los 11 l/s, mostrándose descensos cíclicos en los meses de marzo a mayo y aumentos en los meses de setiembre a diciembre.

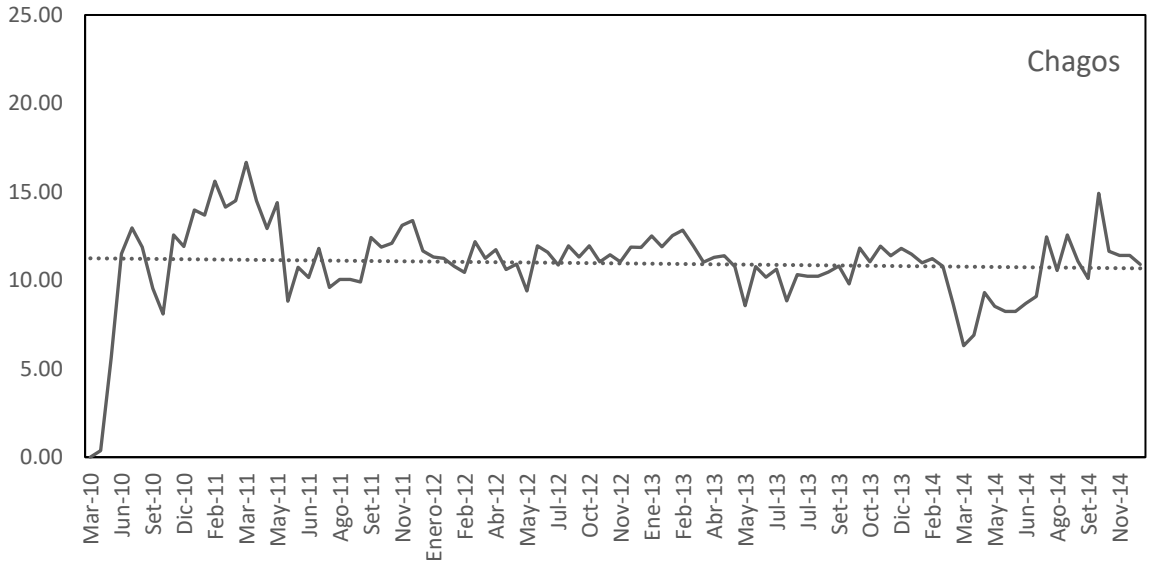

Fig. 12. Comportamiento hidrométrico de la naciente Chagos del año 2010 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN.

El manantial Calle Segura presenta un comportamiento más irregular observándose picos pronunciados, manteniendo un caudal mínimo cercano a los 5 l/s. Este

comportamiento es muestra evidente de la sensibilidad del manantial a la estacionalidad climática con un caudal base con relativa constancia. Llama la atención la volatilidad de los picos, los cuales indican un aumento y descenso abrupto. Este caudal base podría ser tomado como el aporte del nivel freático del acuífero local subyacente. La tendencia a la baja en el tiempo podría, a su vez, significar descensos del nivel freático (figura 13).

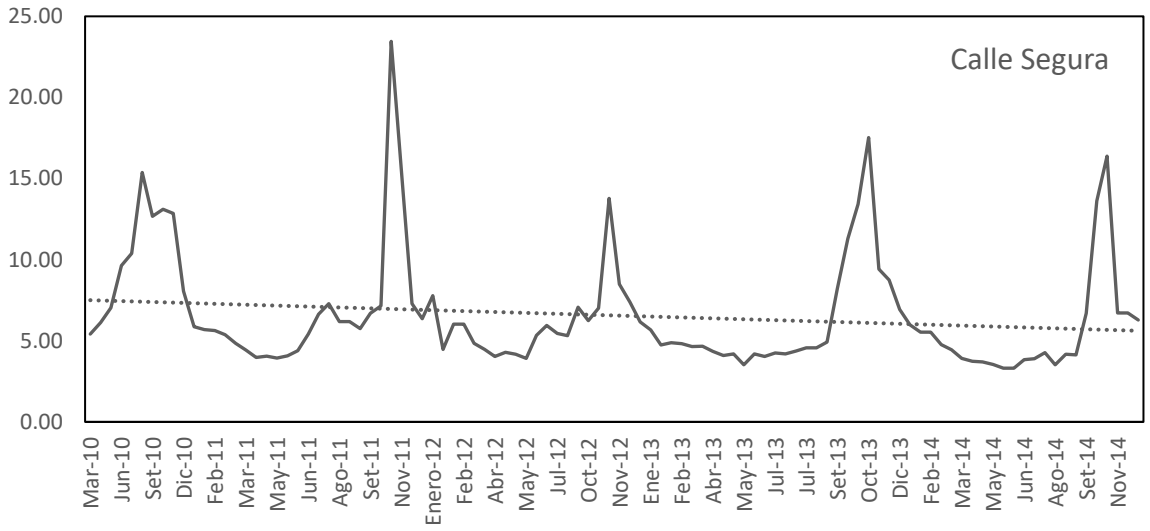

Fig. 13. Comportamiento hidrométrico de la naciente Calle Segura del año 2010 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN.

La fuente Steinvorth recibe su nombre en reconocimiento a las facilidades que el dueño del terreno (plantación forestal de ciprés de cerca de 200 ha) concede a la Asada de San Pedro y otras con fuentes situadas dentro de esta finca. Su respuesta a la estacionalidad climática es marcada por fuertes picos y descensos que en el año 2014 llegó a cero por primera vez en el registro de 5 años por un intervalo de un mes aproximadamente (figura 14).

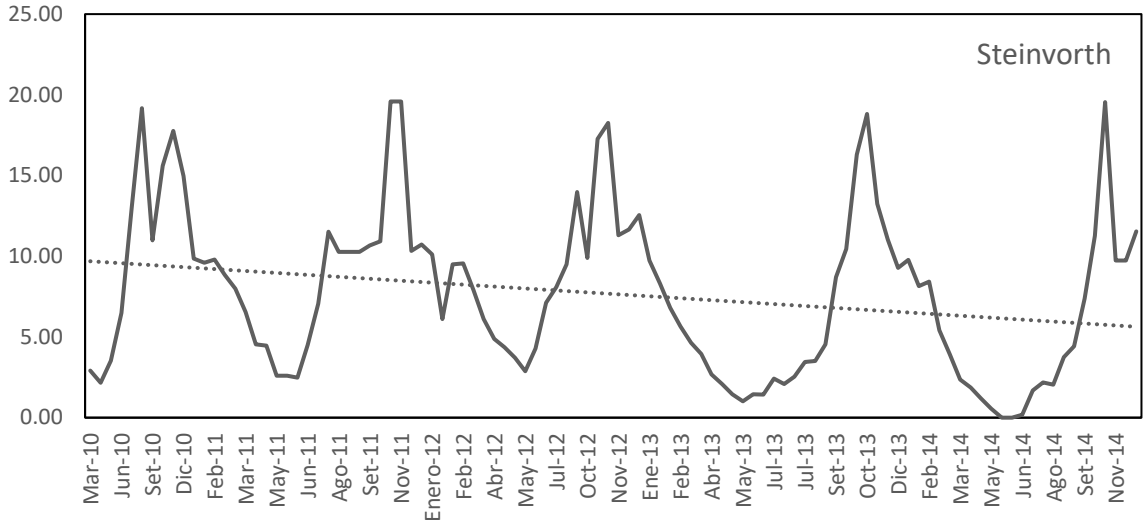

Fig. 14. Comportamiento hidrométrico de la naciente Steinvorth del año 2010 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN.

El manantial Naranjo se encuentra dentro de los que menos caudal total aporta, teniendo un flujo relativamente constante cercano a los 5 l/s. No son tan notorios los picos de respuesta sobre la media base. Su tendencia a lo largo de los años de medición (2010-2014) muestra un comportamiento muy estable en el tiempo en donde no es visible desviaciones positivas ni negativas.

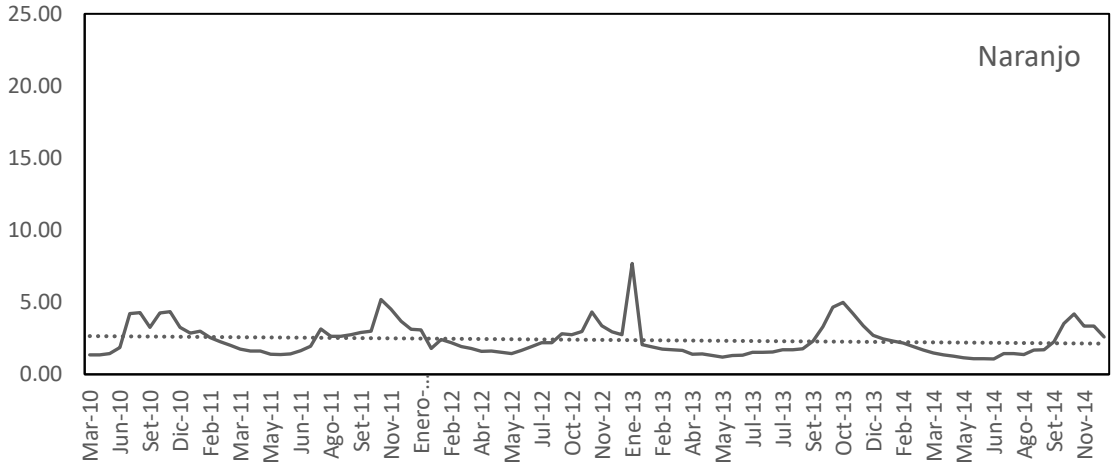

Fig. 15. Comportamiento hidrométrico de la naciente Naranjo del año 2010 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN.

La fuente Centro muestra variaciones importantes con respecto a su caudal base. Lo anterior indica la sensibilidad de respuesta del manantial, similar a lo que ocurre con las naciente Calle Segura y Steinvorth, con la diferencia de alcanzar valores por debajo de los alcanzados por los manantiales mencionados, llegándose a considerar una fuente de menor producción. Como se observa en el gráfico, ha sufrido una tendencia a la baja en el periodo de análisis (figura 16).

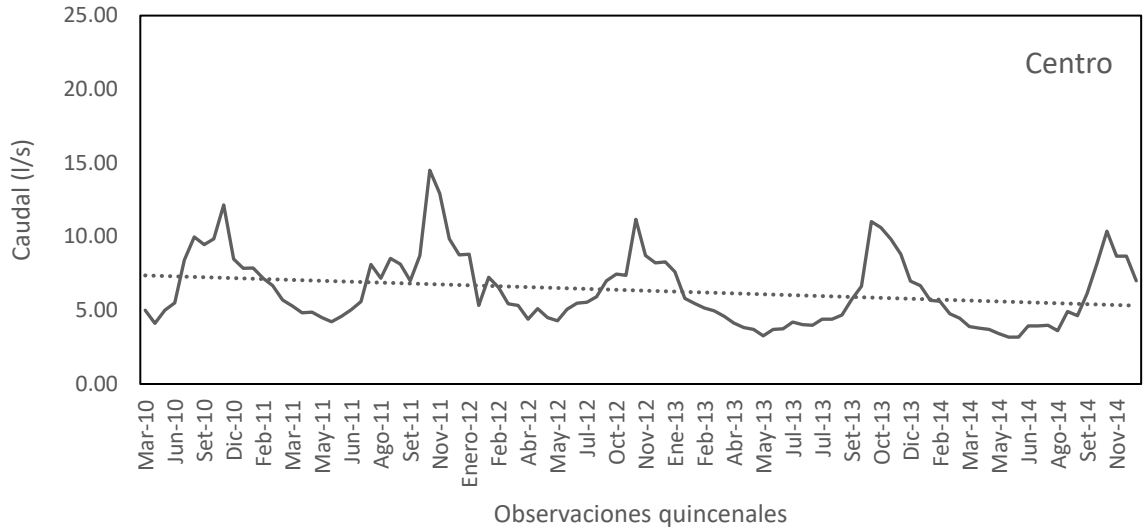

Fig. 16. Comportamiento hidrométrico de la naciente Centro del año 2010 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN.

El manantial Bosque posee un comportamiento similar al de Naranjo. Su caudal base se encuentra cercano los 4 l/s. Parece mostrar una respuesta discreta a la estacionalidad climática con picos que apenas superan levemente los 5 l/s. Lo anterior indica poco sensibilidad, sin embargo, hay una tendencia a la baja en el periodo de análisis (fig. 17).

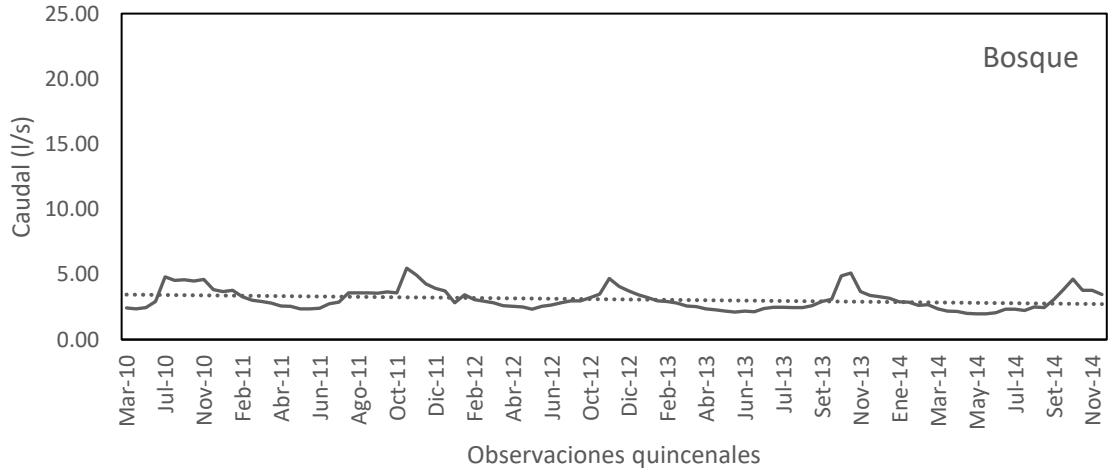

Fig. 17. Comportamiento hidrométrico de la naciente Bosque del año 2010 a 2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN.

En la figura 18 se observan las diferencias y similitudes del comportamiento de los manantiales dentro del lapso de observaciones en estudio. Las naciente Naranjo y Bosque son las de menor caudal y las de menor sensibilidad. Las nacientes Calle Segura, Steinvorth y Centro muestran la mayor variabilidad y, por ende, una mayor sensibilidad en la respuesta. El manantial Chagos presenta un comportamiento variado con un flujo base mayor a las demás fuentes. Pese a las diferencias en la

sensibilidad de la respuesta, todos los manantiales, excepto Chagos, tienen un periodo de réplica similar. Esto podría ser indició de la similitud en las estructuras acuíferas que subyacen cada manantial o la existencia de un mismo sistema subterráneo local al cual pertenecerían las nacientes con comportamientos equivalentes.

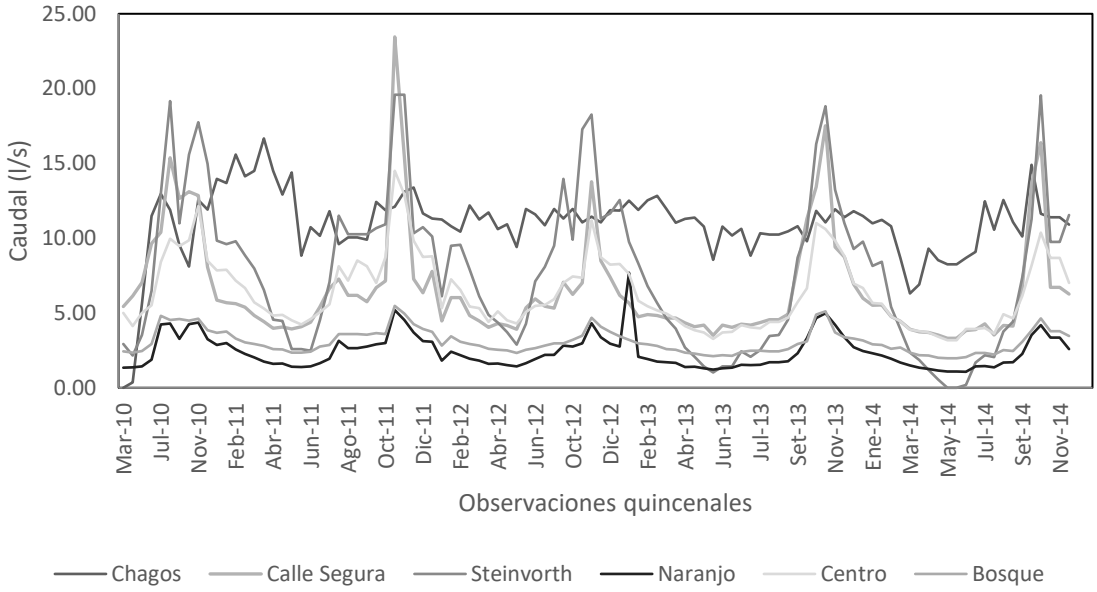

Fig. 18. Comparación del comportamiento hidrométrico de las seis naciente en el periodo 2010-2014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN.

La comparación del comportamiento hidrométrico de los manantiales muestra resultados significativos. Es notoria la sensibilidad de respuesta del caudal a las variaciones climáticas estacionales. Dicha respuesta no es inmediata, en la gráfica se nota un intervalo de respuesta de uno a dos meses (fig. 19). Esta información puede ser muy útil para realizar predicciones de los caudales de los manantiales según los registros meteorológicos.

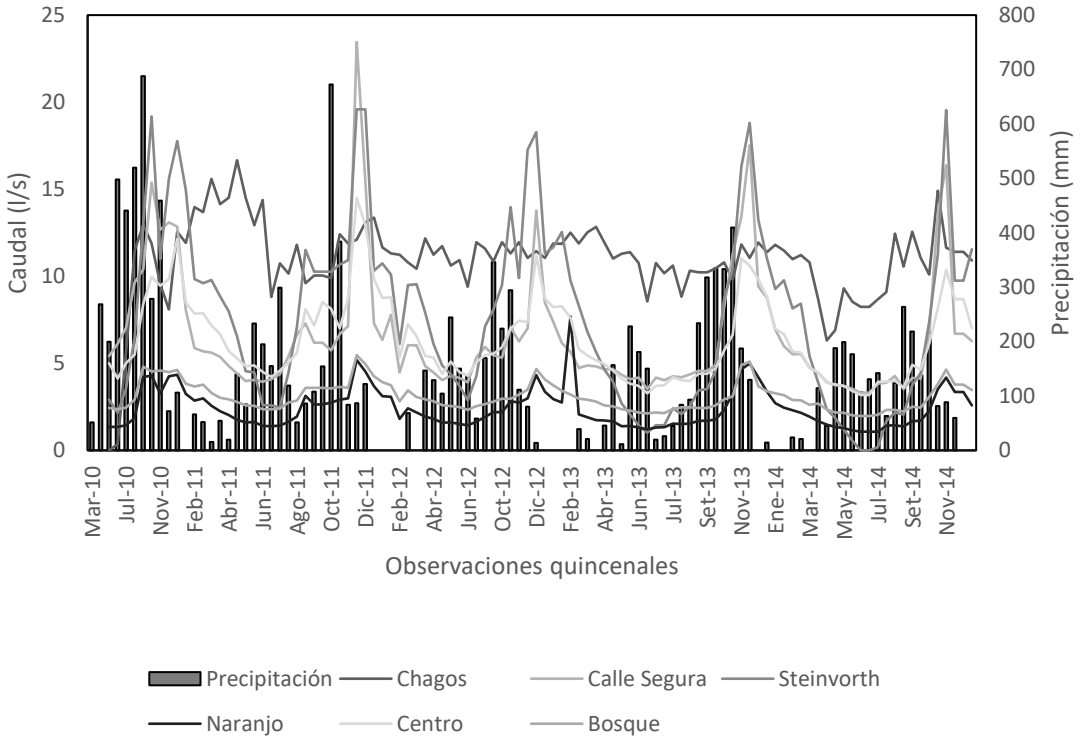

Fig. 19. Hidrograma de precipitación quincenal acumulada y variaciones de caudal en las nacientes de la Asada de San Pedro, 2010-1014. Fuente: Elaboración propia con datos del IMN y Asada San Pedro.

6.2 Fase II: Balance y comportamiento hidrológico en el periodo 2000-2014 en la microcuenca del río Porrosatí

6.2.1 Recarga potencial al agua subterránea en el periodo 2000-2015

Con base en los registros climáticos 2000-2014 de precipitación y temperatura de las estaciones con influencia en la cuenca, y las características hidrogeológicas de la cuenca, se realizó el balance hídrico del suelo para conocer la cantidad de agua que tiene el potencial de recargar las fuentes de agua subterránea en el área de estudio. En la figura 20 se muestra el comportamiento mensual de la recarga potencial.

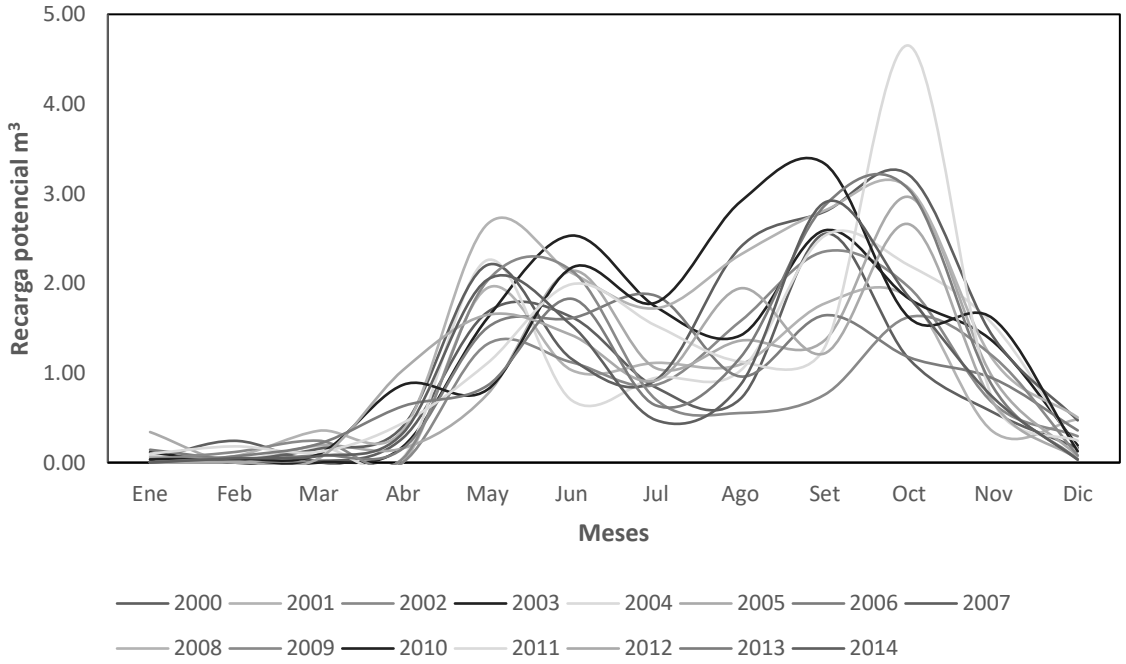

Fig. 20. Valores de recarga potencial mensual en el periodo 2000–2014 en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia.

Los valores de recarga potencial mensual indican la cantidad de agua que potencialmente puede recargar el acuífero en un metro cuadrado. Este quiere decir que hasta este punto solo se toman en cuenta las condiciones climáticas e hidrológicas de la cuenca para obtener dicho valor. La determinación del volumen de agua recargado es el resultado de la multiplicación de este valor con el área efectiva de recarga, lo cual se mostrará en la siguiente sección.

La recarga potencial mensual en el periodo analizado indica claramente el efecto de las época seca y época lluviosa en los valores de recarga. El periodo comprendido

entre los meses de diciembre y abril muestra valores de recarga potencial que no exceden los 10 m^3 en ninguno de los años del periodo 2000–2014. Por otro lado, los meses de mayo a noviembre aumentan considerablemente su recarga potencial conforme la época lluviosa. Los meses de setiembre a octubre presentan los valores más altos, lo cual se relaciona con mayores volúmenes de precipitación durante el año.

6.2.2 Dinámica de las áreas de recarga en el periodo 2000-2014 en la microcuenca del río Porrosatí

El análisis de la dinámica de cambio de uso de la tierra en el periodo en estudio, tuvo como principal variante el cambio de uso de terrenos con cultivos hacia áreas urbanas. El área urbanizada tiende a aumentar de manera más acelerada en las zonas de la 1 a la 5 en el periodo 2000–2005, mientras que en el polígono 6 el cambio en el intervalo de 2005 a 2014 fue bastante más elevado en relación con los demás valores de cambio. El incremento del área urbana repercute en la impermeabilización inmediata de la tierra, viéndose reducida el área efectiva de recarga como se muestra en la tabla 16.

Tabla 14. Área efectiva de recarga para cada zona de balance hídrico en la microcuenca del río Porrosatí (km^2)

	Zonas de recarga					
Año	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
2000	3,63	6,60	3,04	2,58	6,69	2,87
2001	3,63	6,59	3,03	2,56	6,68	2,87
2002	3,63	6,58	3,02	2,55	6,67	2,86
2003	3,63	6,57	3,02	2,53	6,66	2,86
2004	3,63	6,56	3,01	2,51	6,65	2,85
2005	3,63	6,54	3,00	2,50	6,64	2,85
2006	3,63	6,54	3,00	2,49	6,60	2,83
2007	3,63	6,54	3,00	2,48	6,57	2,82
2008	3,63	6,54	3,00	2,46	6,53	2,80
2009	3,63	6,54	3,00	2,45	6,50	2,79
2010	3,63	6,54	2,99	2,44	6,46	2,77
2011	3,63	6,54	2,99	2,43	6,43	2,76
2012	3,63	6,54	2,99	2,42	6,39	2,74
2013	3,63	6,54	2,99	2,41	6,35	2,73
2014	3,63	6,54	2,99	2,40	6,32	2,71

Fuente: Elaboración propia

El decrecimiento de las áreas de recarga se dio principalmente en las zonas medias y bajas de la microcuenca (zonas 2 a 6). El cambio de uso más común fue de pastos y cultivos a uso urbano. Por otro lado, el uso agrícola cuya mayor extensión la cubre el café, se ha estancado, por lo que el avance de la frontera agrícola no ocurre en

el período en análisis y no es analizado como una amenaza en la disminución de los valores de recarga.

6.2.3 Volumen anual de agua recargado al agua subterránea en la microcuenca del río Porrosatí, periodo 2000-2014

El volumen de recarga anual al agua subterránea en la microcuenca da cuenta del total de agua que pudo haberse recargado potencialmente al acuífero. El valor promedio fue de 3,04 km^3 con una desviación estándar de 0,58 km^3. La alta variabilidad de los valores es el reflejo de la variabilidad de las condiciones climáticas en los distintos años en análisis. La localización geográfica y las condiciones geofísicas de la microcuenca, la ubican en un área de alta recarga (Reynolds 2002; Ramírez 2007; Castro 2011), subyaciendo en uno de los reservorios de agua subterráneos más importantes de Centroamérica como el sistema acuífero Barva-Colima (fig. 21).

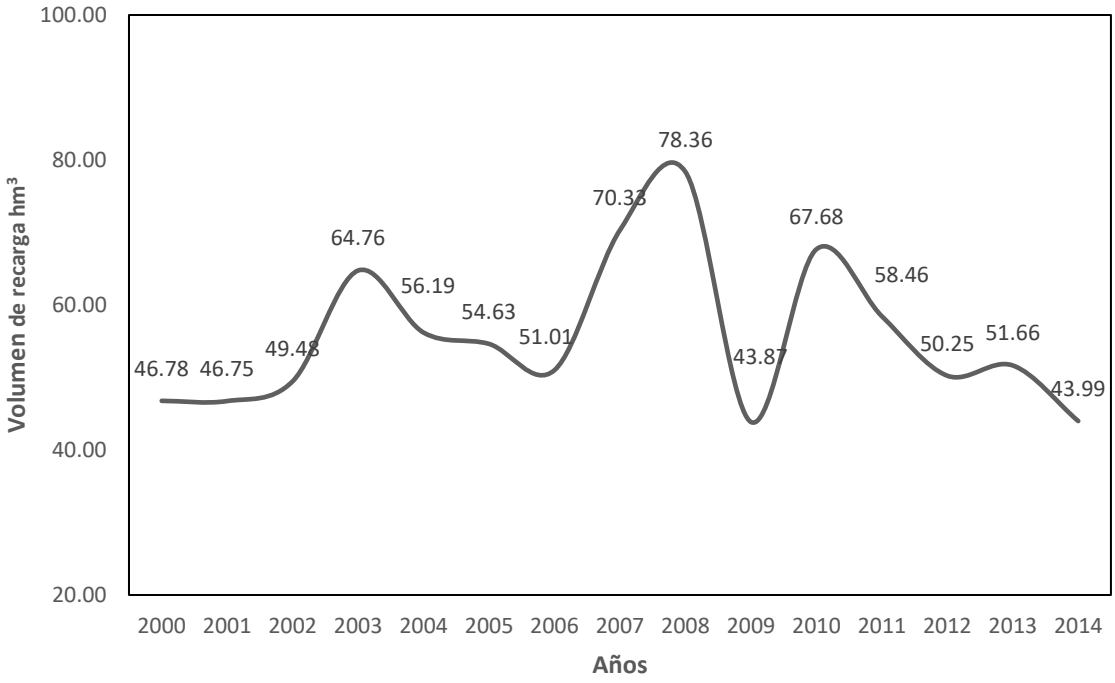

Fig. 21. Volúmen anual de agua recargado en la microcuenca del río Porrosatí en el periodo 2000-2014. Fuente: Elaboración propia.

Sobresalen los años 2007, 2008 y 2010 como los de mayor recarga anual, mientras que los años 2000, 2001 y 2009 fueron los de menor recarga. El año de máxima recarga fue el 2008 sobrepasando notablemente los valores de los demás años, mientras que el año 2009 representó el año de menor recarga.

6.2.4 Respuesta de los volúmenes de recarga ante fenómenos atmosféricos

Como es de esperar, los años de recarga alta o baja están en estricta dependencia de las condiciones climáticas dadas en el año específico. Por otro lado, no se nota un efecto en los valores de recarga con respecto al aumento al área impermeabilizada hacia los últimos años en análisis como podría ser esperable considerando las áreas. Por tanto, en la sensibilidad de la determinación de los volúmenes de recarga resultan de mayor peso las condiciones climáticas que las áreas efectivas de recarga. El efecto del aumento de la impermeabilización podría ser más evidente en tanto se tuvieran condiciones climáticas más homogéneas. Esto no indica que este proceso no tenga como resultado disminuciones importantes en los volúmenes de recarga al agua subterránea, sino que el método de determinación no es el más indicado para visualizar el efecto de esta variable.

Con el objetivo de analizar con mayor profundidad la variación entre años de recarga, se graficó el comportamiento del volumen de recarga con el Índice Oceánico del Niño (ONI por sus siglas en inglés) en el periodo 2000-2015. Este índice es un indicador estándar que la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) utiliza para identificar eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) en el océano Pacífico tropical. Se calcula como la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar para la región El Niño 3.4 (franja comprendida entre 5 °N-5 °S y 120°-170 °W).

Los valores negativos del ONI representan periodos cálidos, los cuales producen eventos El Niño, mientras que los valores positivos muestran condiciones frías, las cuales ocasionan los eventos de La Niña. Para que se dé la oficialización de un año Niño o Niña, el ONI debe sobrepasar una magnitud de 0.5 o -0.5 según sea el caso. En el periodo 2000-2014 se registraron un total de cuatro eventos El Niño y cuatro eventos La Niña. Se trata específicamente de los años El Niño 2004-2005 y 2006-2007 clasificados como débiles y los años 2002 y 2003 y 2009-2010 clasificados como moderados. A su vez, los periodos comprendidos entre 2000-2001 y 2011-2012 fueron clasificados como eventos La Niña débil, mientras que los años 2007-2008 y 2010-2011 fueron eventos de La Niña moderados.

Pese a que en el periodo en estudio no sucedió ningún evento de El Niño o La Niña fuertes o muy fuertes, los efectos de los eventos ocurridos sobre la recarga fueron notorios. Los picos de recarga y también los valores más bajos están relacionados con años La Niña y EL Niño respectivamente. Los eventos El Niño se caracterizan por traer condiciones secas en el Valle y Cordillera Volcánica Central en donde se ubica la microcuenca, mientras que en condiciones La Niña se dan aumentos significativos en los valores de precipitación.

La gráfica del comportamiento de la recarga y la magnitud de los eventos ENOS mediante el índice ONI, muestra una relación clara en donde los picos negativos producen picos positivos de recarga, y el efecto contrario con los picos positivos provoca picos negativos sobre la recarga (fig. 22).

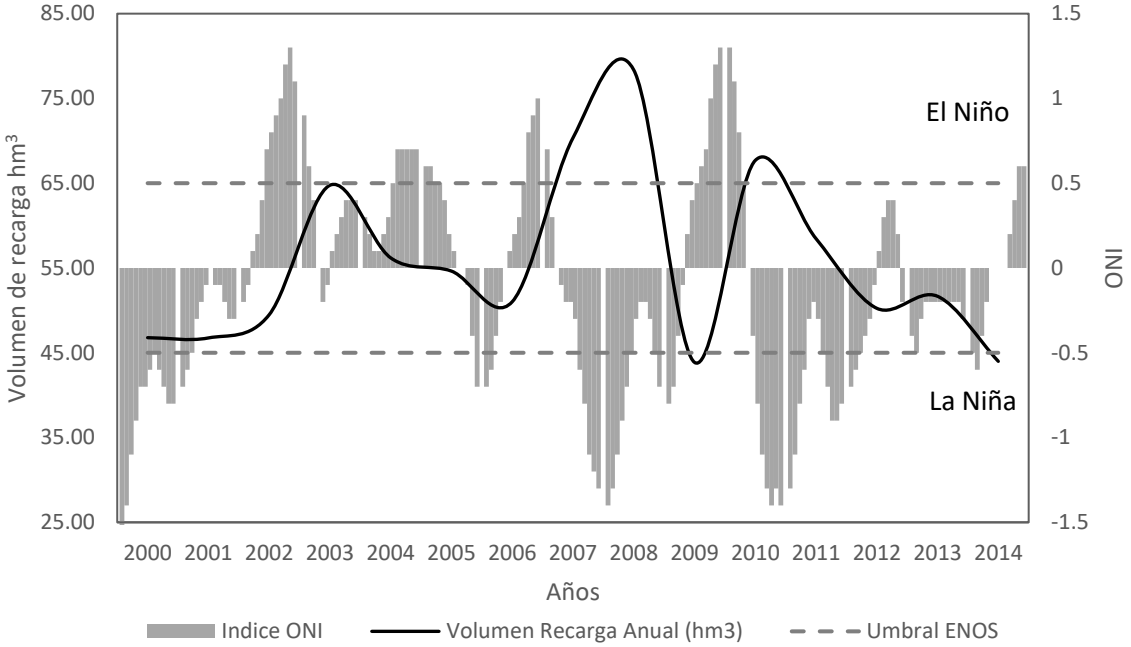

Fig. 22. Relación de volumen de recarga en la microcuenca del río Porrosatí y el Índice Oceánico del Niño en el período 2000-2015. Fuente: Elaboración propia y datos NOAA (2016).

6.2.5 Volumen de recarga potencial por zonas dentro de la microcuenca del río Porrosatí en el periodo 2000-2014

Las zonas de recarga tienen un comportamiento relativamente homogéneo, atribuible a la poca extensión de la cuenca, en donde no se encuentra heterogeneidad con respecto a influencias climáticas o geofísicas de importancia. La diferenciación de las zonas está dada principalmente con condiciones de suelo como usos agrícolas o pastos y cambios propios de la geomorfología de la zona. Las estaciones estudiadas presentan comportamientos similares, siendo diferenciados principalmente por la influencia orográfica y la altitud. Así, la estación ubicada en la zona de mayor altitud tiene los valores de precipitación más altos y la temperatura promedio más baja.

Los resultados de la recarga potencial respaldan lo esperable, siendo las zonas ubicadas en la parte alta de la cuenca, las zonas de mayor recarga. No obstante, variaciones leves en las condiciones climáticas propiciaron resultados variables, en donde zonas medias obtuvieron valores mayores que los de zonas altas (fig. 23).

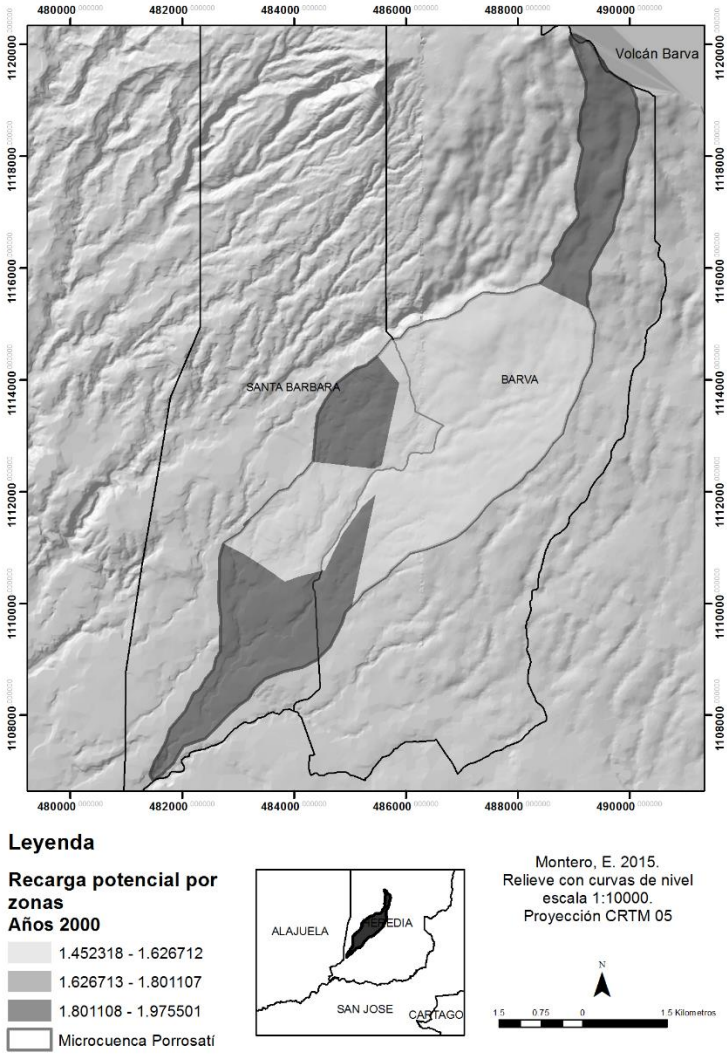

Fig. 23. Recarga potencial anual (m) por zonas para el año 2000. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los resultados de recarga potencial por zonas del año más lluvioso y el año más seco, por un lado, en el año 2008, el cual marcó los registros de mayor precipitación del periodo 2000-2014 en el área de análisis, la zona de recarga 2 tiene la mayor cuantía con una diferencia notable sobre las demás zonas. Esto incluso con la zona 1, con la cual comparte condiciones climáticas, sin embargo, la principal diferencia la establece las propiedades de retención de humedad como la capacidad de campo y punto de marchitez (fig. 23).

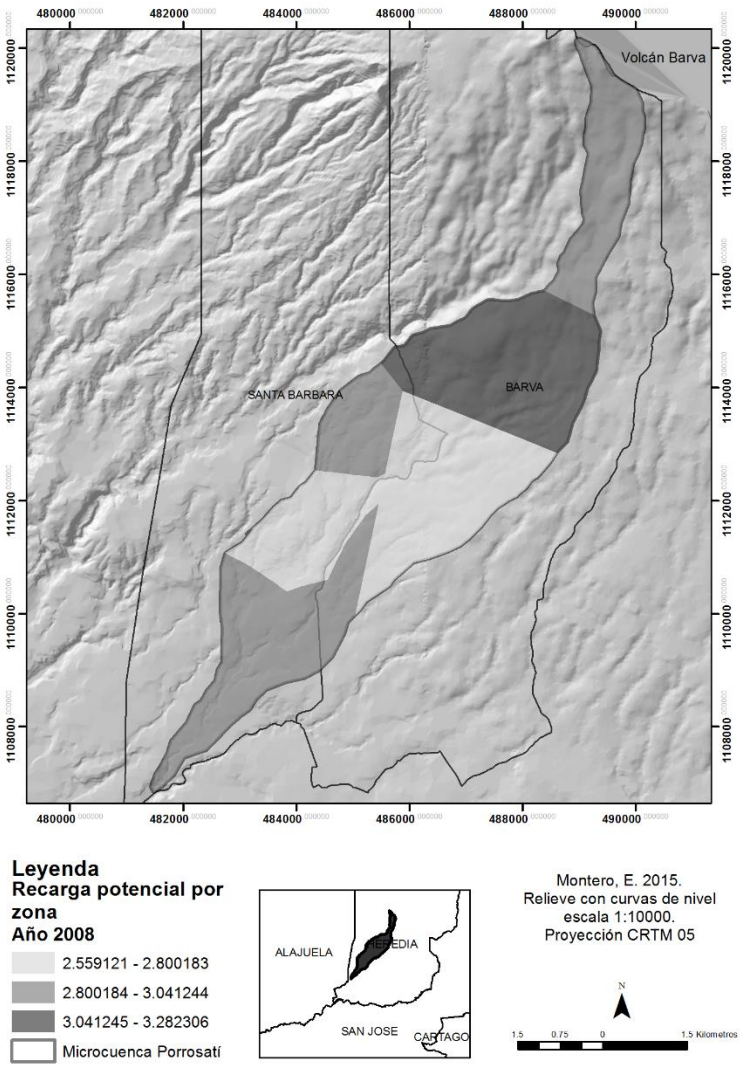

Fig. 24. Recarga potencial anual (m) por zonas para el año 2008. Fuente: Elaboración propia.

El año siguiente (2009) fue el más seco del lapso temporal analizado. La distribución de la recarga en este año fue mucho menos dinámica, pues el contenido de humedad genera mayores fluctuaciones en los resultados y permite visualizar de manera más evidente las propiedades del suelo en el balance hídrico. En este, se muestra que las zonas 1 y 2 obtienen los mayores valores, mientras las zonas 3, 4, 5 y 6 presentan recargas muy bajas (fig. 25).

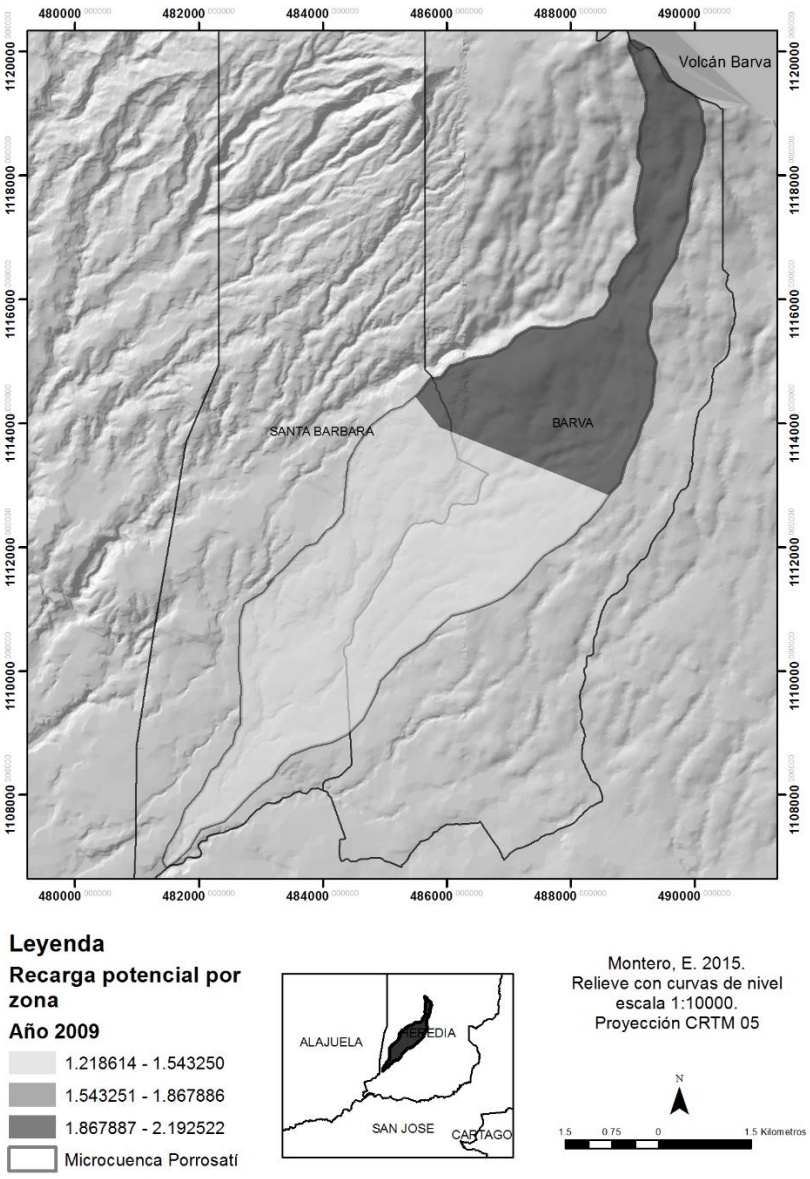

Fig. 25. Recarga potencial anual (m) por zonas para el año 2009. Fuente: Elaboración propia.

Una notable excepción al comportamiento mostrado en la mayoría de años con respecto a los valores de recarga potencial anual por zonas en la microcuenca, es el año 2012. En este periodo los valores de recarga más elevados los conforman los polígonos 5 y 6, los cuales se encuentran en la parte baja de la microcuenca. La singularidad es el resultado del único año en el cual la estación Santa Bárbara, ubicada en la parte baja, reporta valores de precipitación más altos que las estaciones Santa Lucía y Monte de la Cruz, localizadas en las partes media y alta de la microcuenca respectivamente. Además, los valores de temperatura si bien fueron más elevados que en las demás estaciones como fue la norma, se

mantuvieron bajas con respecto a su comportamiento usual, generando menos evapotranspiración. La humedad disponible jugó un papel relevante limitando el volumen de evapotranspiración. Estos factores dieron como resultado que en las zonas de recarga 5 y 6 se presentaran los mayores valores de recarga potencial para el año en mención como se muestra en la figura 26.

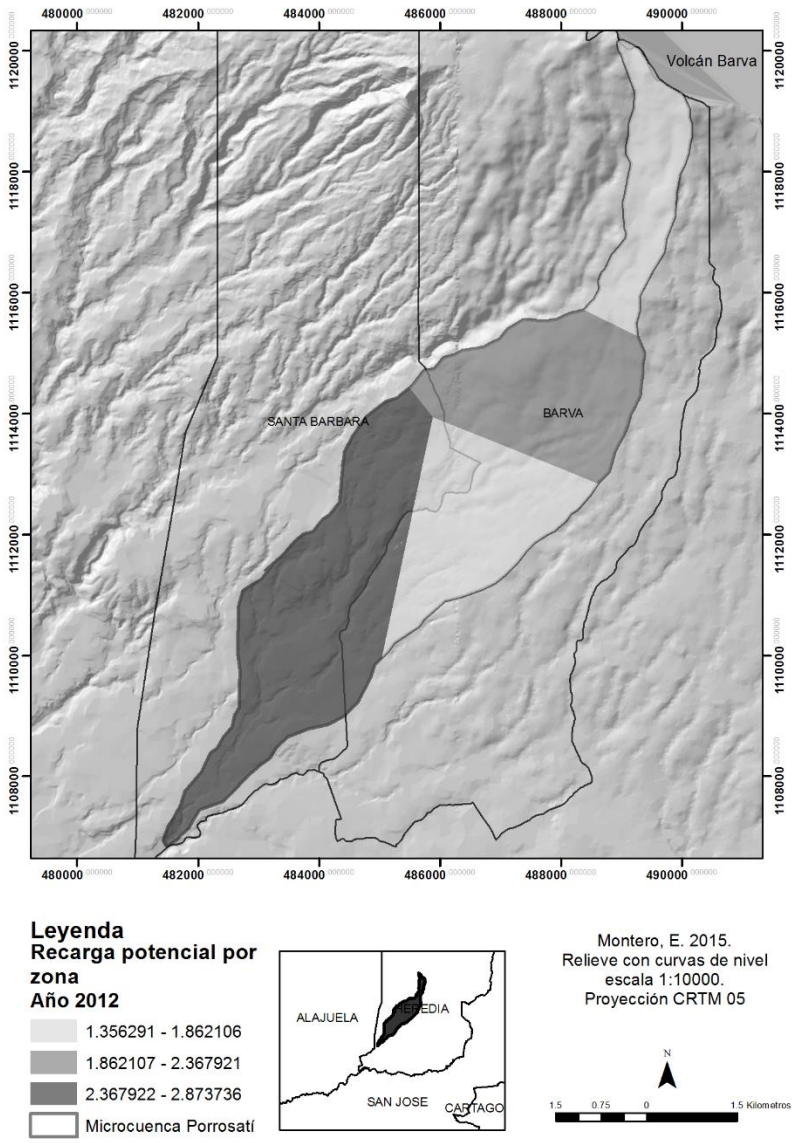

Fig. 26. Recarga potencial anual (m) por zonas para el año 2012. Fuente: Elaboración propia

6.3 Fase III: Escenarios de recarga hídrica en los periodos 2025-2035 y 2050-2055

6.3.1 Recarga potencial al agua subterránea en el periodo 2025-2030

Los escenarios de recarga hídrica se elaboraron en periodos de 6 años, para el mediano y largo plazo. Con esto se obtuvieron perspectivas del comportamiento de la recarga ante variables como el cambio de uso de la tierra y principalmente la afectaciones de variaciones en los patrones climáticos. Los periodos de tiempo escogidos fueron los meses comprendidos entre los años 2025 a 2030, los cuales representan el mediano plazo. Los meses comprendidos entre los años 2050 a 2055 fueron escogidos como indicadores de largo plazo.

Los resultados de la recarga potencial en la microcuenca del Porrosatí en el periodo 2025-2030 muestran un comportamiento bastante homogéneo. Como es típico en la microcuenca, la marcada estacionalidad provoca valores bajos cercanos a cero en los meses de la estación seca. En mayo la entrada de la época lluviosa aumenta considerablemente, hasta el mes de julio en el cual ocurre un descenso importante similar al que se da en el periodo 2000-2014, producto del periodo canicular, en el cual sucede una interrupción del periodo lluvioso y un aumento de la temperatura que tarda dos semanas por lo general y puede presentarse con menor o mayor intensidad (fig. 27).

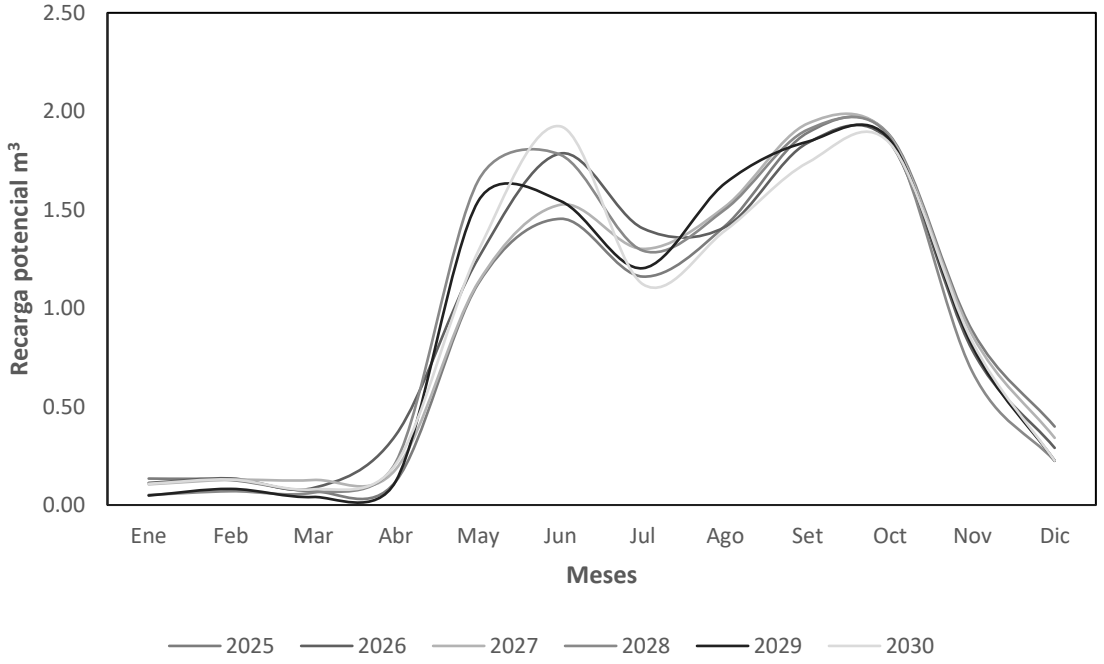

Fig. 27. Recarga potencial mensual en el periodo 2025-2030 en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia.

La época lluviosa está bien definida siendo setiembre el mes de mayor precipitación y, por ende, de mayor recarga. Esto varía de lo encontrado para el periodo 2000-2014, en el cual octubre es el mes con mayores valores de recarga. En el mes de noviembre inicia la transición hacia la época seca, en donde diciembre muestra un descenso significativo en volumen de recarga potencial. La humedad del suelo residual de la época lluviosa y precipitaciones aisladas permiten que la recarga del diciembre normalmente sea un poco mayor a los demás meses de la época seca.

6.3.2 Recarga potencial al agua subterránea en el periodo 2050-2055

Los resultados de la recarga potencial en la microcuenca del Porrosatí en el periodo 2025-2030 muestran un comportamiento muy variable con respecto al escenario de mediano plazo. La estacionalidad provoca valores bajos en los meses de la estación seca como es habitual, sin embargo, los meses de enero y febrero registran valores de recarga potencial mayores al mes de marzo, el cual en todos los años del periodo 2050-2055 fue el mes con menor recarga (fig. 28).

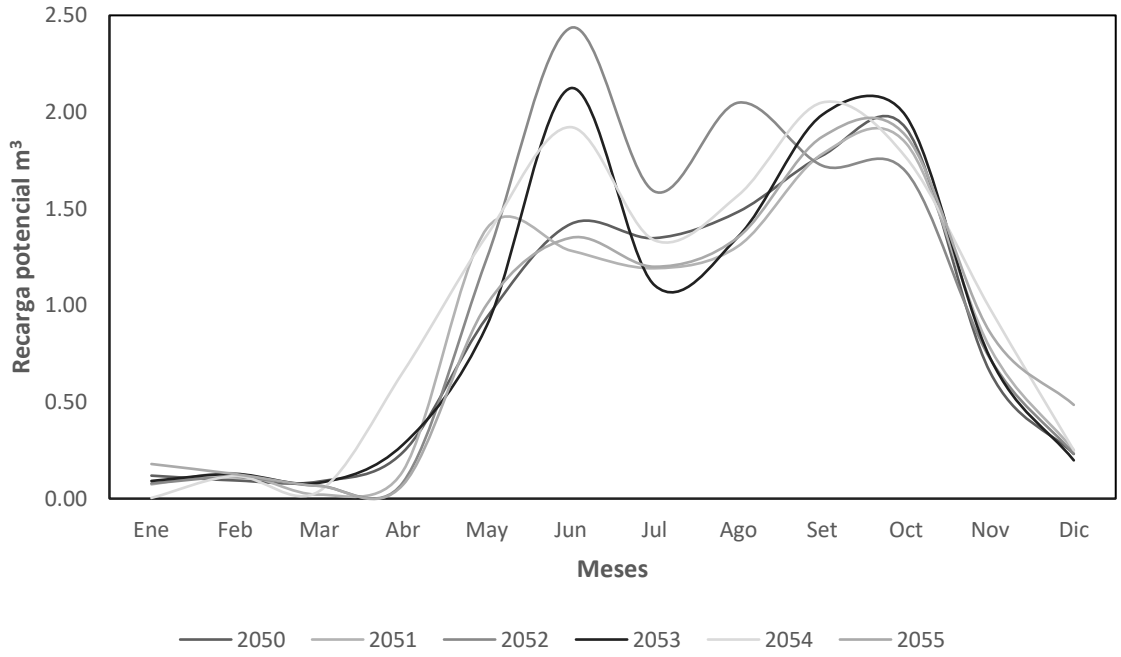

Fig. 28. Recarga potencial mensual en el periodo 2050-2055 en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia.

La entrada de la época lluviosa se muestra irregular. En el año 2052 el mes de abril exhibe un aumento importante en el volumen de recarga potencial, siendo este un comportamiento atípico tanto en el mediano plazo como en el registro 2000-2014. Los demás meses incrementan su volumen a partir del mes de mayo con mucha

variabilidad, existiendo diferencias mayores a 1 m^3, condición que no ocurre en el análisis de la recarga potencial en el periodo 2025-2030.

La canícula está presente en el mes de julio. De manera notoria, después de la canícula no sobrepasan los valores presentados en junio, por lo que parece no existir un pico de la época lluviosa en los meses de setiembre y octubre como es usual en el registro 2000-2014. Tras el pico moderado en el mes de setiembre, la recarga se mantiene o baja ligeramente en el mes de octubre. El comportamiento de la recarga como valor de respuesta a las condiciones climáticas, muestra la existencia de dos periodos lluviosos en el año, siendo de igual o mayor intensidad el mostrado en mayo-junio.

6.3.3 Escenarios de uso de la tierra para el mediano y largo plazo en la microcuenca del río Porrosatí

Como resulta predecible, la tendencia en cuanto al uso de la tierra indica aumentos relevantes en el área urbanizada. El mayor crecimiento del área impermeabilizada se da en las zonas 5 y 6, ubicadas en la parte baja de la microcuenca. El principal cambio de uso ocurre en el área de uso de pasto y agrícolas hacia uso urbano. El cambio de uso en las zonas 1 y 2 es bajo (tabla 15)

Tabla 15. Escenarios de área de recarga por zonas para el mediano plazo, periodo 2025-2030 (km^2)

	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Zona 1	3,62	3,62	3,62	3,62	3,62	3,62
Zona 2	6,74	6,74	6,73	6,73	6,72	6,72
Zona 3	3,22	3,22	3,21	3,21	3,21	3,20
Zona 4	2,55	2,54	2,52	2,51	2,50	2,49
Zona 5	6,78	6,73	6,68	6,63	6,59	6,54
Zona 6	2,92	2,91	2,90	2,89	2,88	2,87

Fuente: Elaboración propia

6.3.4 Escenarios de volumen de recarga en el mediano plazo

El volumen de recarga en el mediano plazo muestra un tendencia a la homogenización de los valores de recarga anuales. La poca fluctuación responde a la inexistencia de años sobresalientemente lluviosos o secos. El efecto del aumento del área impermeabilizada provocó grandes pérdidas de recarga, siendo una limitante para la disponibilidad de recurso subterráneo en la microcuenca (fig. 29).

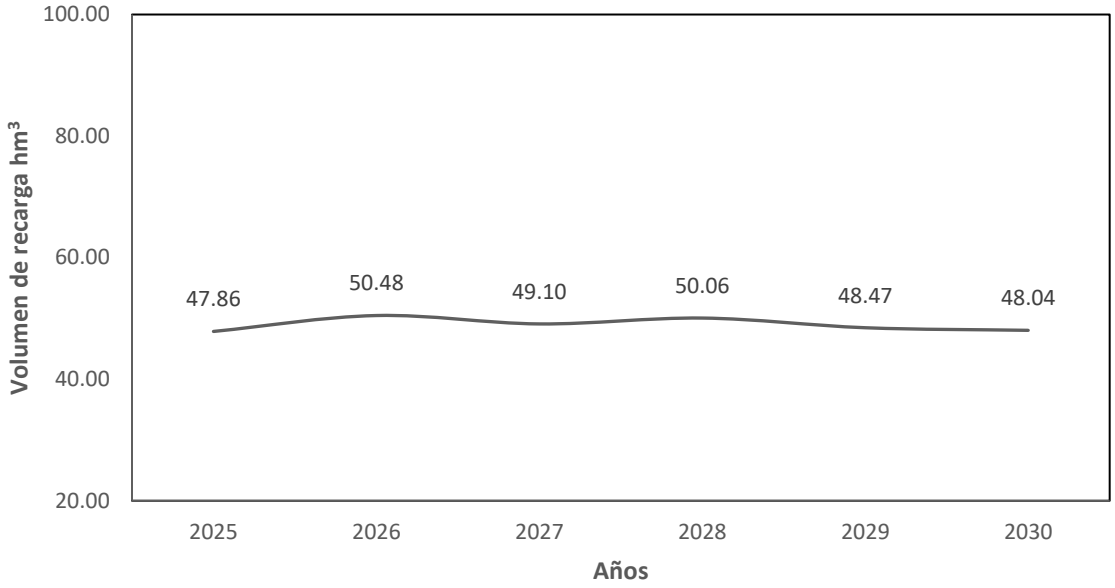

Fig. 29. Escenario de volumen de recarga (hm3) para el periodo 2025-2030 en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia.

6.3.5 Escenarios de uso de la tierra para el mediano y largo plazo en la microcuenca del río Porrosatí.

En el periodo 2050-2055 el área de recarga disminuye drásticamente en todas las zonas a excepción de las zonas 1. La existencia aún de importantes extensiones de pastos y agricultura en las zonas bajas hace este escenario posible. La ausencia de regulaciones para las áreas medias y bajas de la cuenca también es un factor que incide en este resultado. La incertidumbre de este cálculo puede llegar a ser alto pues muchos factores podrían influir en que la situación se modifique. Sin embargo, la tendencia histórica y la inexistencia de mecanismos de regulación en la actualidad o su poca efectivamente hacen que este escenario no parezca tan desatinado (tabla 16).

tabla 16. Escenarios de área de recarga por zonas para el largo plazo, periodo 2050-2055 (km^2)

	2050	2051	2052	2053	2054	2055
Zona 1	3,62	3,62	3,62	3,62	3,62	3,62
Zona 2	6,63	6,62	6,62	6,61	6,61	6,60
Zona 3	3,11	3,11	3,10	3,10	3,09	3,09
Zona 4	2,24	2,23	2,21	2,20	2,19	2,18
Zona 5	5,59	5,55	5,50	5,45	5,40	5,36
Zona 6	2,67	2,66	2,65	2,64	2,63	2,62

Fuente: Elaboración propia

6.3.6 Escenarios de volumen de recarga en el largo plazo

El comportamiento del volumen de recarga en el largo plazo es influenciado principalmente por el decrecimiento de las áreas de recarga y las variaciones climáticas proyectadas. En cuanto al clima, se da una reducción de los volúmenes anuales de precipitación, presentándose fluctuaciones que van de 42,0 como mínimo a 49,2 como máximo. Estas variaciones son pequeñas, lo que las hace mostrar un comportamiento bastante homogéneo durante los 6 años analizados pese a exhibir mayor variación que el periodo 2025-2030. Los volúmenes de recarga caen de manera drástica principalmente por el notorio efecto del incremento del área impermeabilizada (fig. 30).

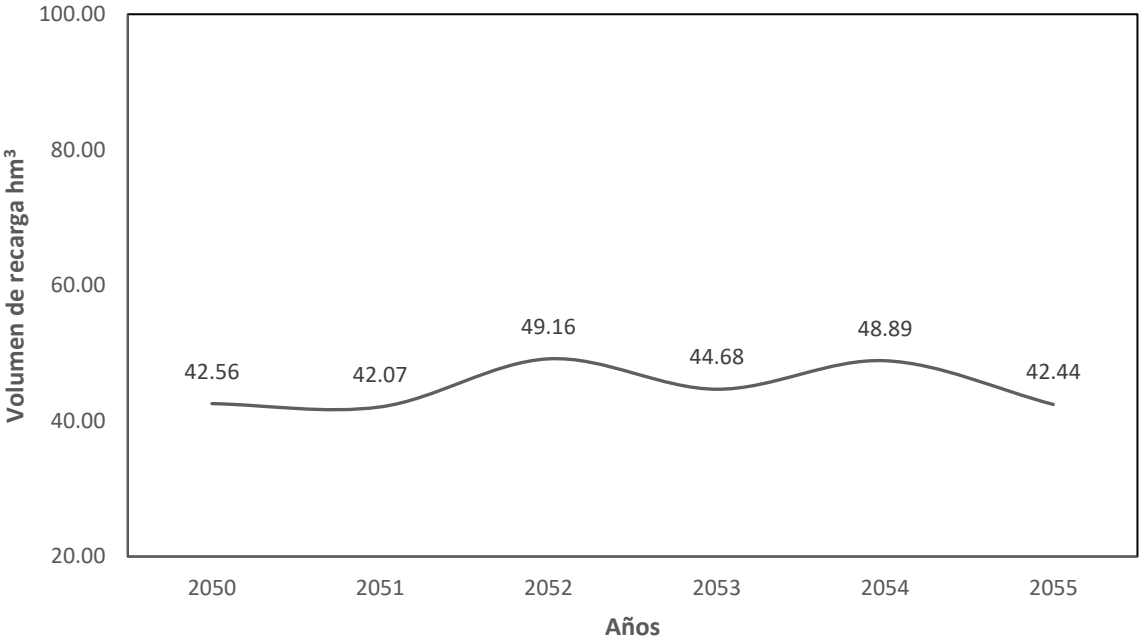

Fig. 30. Escenario de volumen de recarga (hm3) para el periodo 2025-2030 en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia.

6.3.7 Comparación entre la recarga potencial basada en registros y los escenarios a mediano y largo plazo

En términos comparativos, el análisis de los cálculos de la recarga potencial basada en los registros de 2000 a 2014 y los calculados mediante la utilización de escenarios climáticos en el mediano y largo plazo arrojan datos interesantes. El promedio de los 15 años de registros fue comparado con los escenarios de recarga en períodos de cinco años para facilitar la visualización de los datos. Esta visualización muestra un comportamiento similar en los tres periodos en comparación con respecto a la estacionalidad. Sin embargo, es notorio que el pico

iniciado en mayo con la entrada de la época lluviosa aumenta su intensidad en el mediano plazo y de forma más notoria en el escenario a largo plazo llegando a ser similar al pico de setiembre octubre (fig. 31).

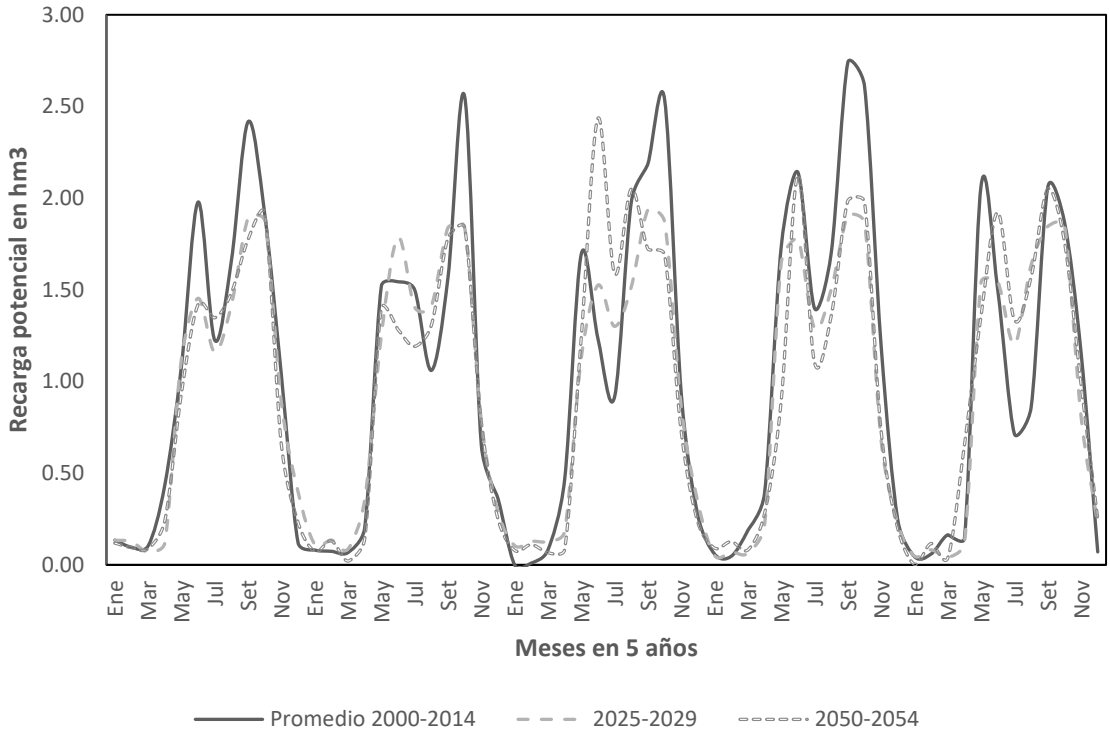

Fig. 31. Comportamiento mensual de la recarga potencial en periodos de 5 años. Fuente: Elaboración propia.

La existencia de dos picos de lluvia de similar intensidad durante el año interrumpidos por la canícula de julio, indica la existencia de dos épocas de mayor recarga en el año. Esto sin duda modificará la respuesta hidrológica de los manantiales dentro de la microcuenca y el nivel de la lámina de agua. Estos escenarios son valiosos para la planificación estratégica del recurso a largo plazo por parte de los entes encargados del abastecimiento.

La inexistencia de picos de recarga potencial similares a los encontrados en el periodo 2000-2014, podría significar respuestas hidrológicas que no satisfagan las necesidades mínimas para el abastecimiento de la población dentro y fuera de la cuenca. Para hacer esta aseveración, se deben realizar estudios más detallados.

La tendencia de la homogeneidad de los datos en el mediano y largo plazo puede deberse a distintas razonas. Por un lado, las posibilidades de los modelos climáticos para predecir la ocurrencia y sobre todo la magnitud de eventos atmosféricos como los de El Niño o La Niña se ven comprometidas al tratarse de anomalías oceánicas

y atmosféricas de difícil modelación. Otra de la razones de este comportamiento se encuentra en la variación estacional modelada, la cual podría incidir en la intensidad y frecuencia de los eventos extremos (Bindoff et al. 2013).

El promedio y desviación del periodo 2000-2014 seccionado en lustros, demuestra valores de recarga potencial bajos en el mediano y largo plazo, similares a los del lustro 2000-2004, el cual fue el más bajo en los registros. A pesar de la similitud en el valor promedio, los escenarios para los periodos 2025-2029 y 2050-2054 poseen una desviación estándar significativamente menor en comparación con los tres lustros de los registros y el promedio del periodo 2000-2014 (tabla 17).

Tabla 17. Promedio del volumen de recarga entre los períodos 2000-2014 y los escenarios de mediano y largo plazo

	Periodos de recarga (hm^3)					
	2000-2004	**2005-2009**	**2009-2014**	**2000-2014**	**2005-2029**	**2050-2054**
Promedio	0,9	1,1	1,1	1,0	0,9	0,9
Desv. Std.	0,9	0,9	1,0	0,9	0,7	0,8

Fuente: Elaboración propia

6.3.8 Comparación del comportamiento del volumen de recarga en el periodo 2000-2014 y los escenarios de volúmenes de recarga

Los volúmenes de recarga proyectados a futuro dan cuenta de importantes decrecimientos que en algunos casos superaron el 15 % como media y llegando hasta diferencias del 50 % con respecto al comportamiento promedio en los años 2000 a 2014. En general, las canículas en el mediano y largo plazo no parecen aumentar su intensidad en cuanto a lo observado en 2000-2014 (fig. 32).

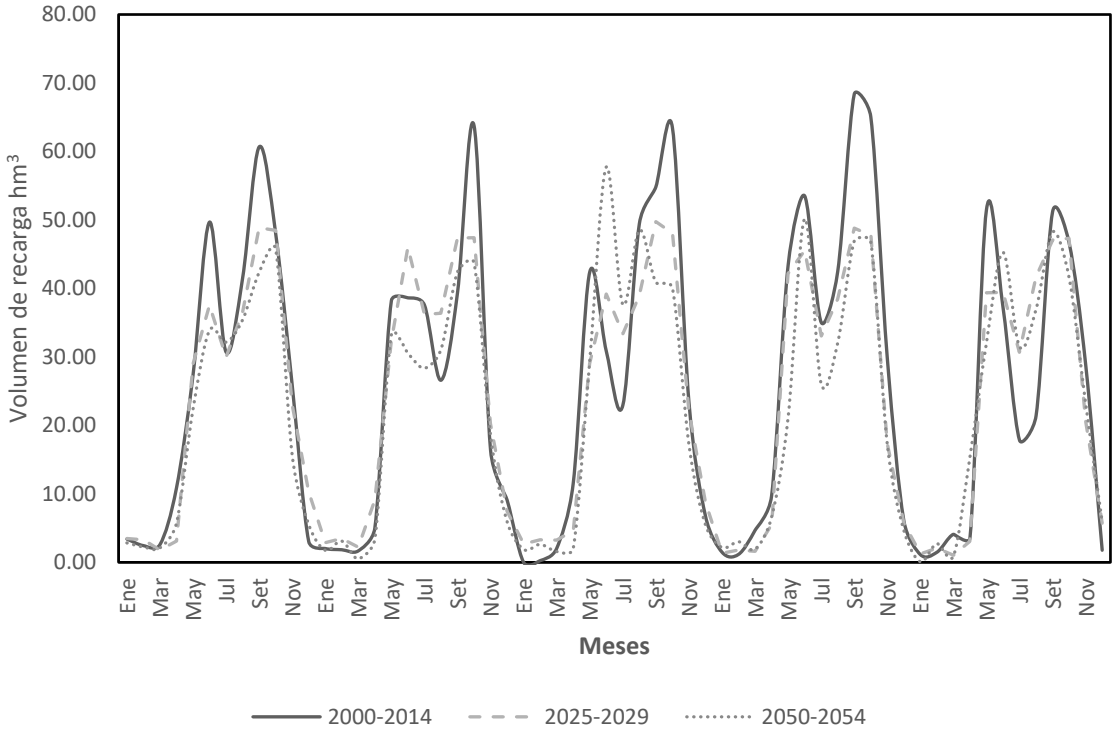

Fig. 32. Comportamiento mensual del volumen de recarga en periodos de 5 años. Fuente: Elaboración propia.

En primera instancia, se podría prever un comportamiento con anomalías de poca a media intensidad durante el año. La relativa homogeneidad de los escenarios dificulta el pronóstico de la respuesta de la producción de agua de los manantiales y la tabla de agua subterránea. El promedio baja de 25,4 hm3 en el promedio 2000-2014 a 23,6 y 21,9 en el mediano y largo plazo respectivamente. La desviación estándar, de manera similar a la variación mostrada en la comparación de la recarga potencial, tiende disminuir con el promedio (tabla 18).

Tabla 18. Promedio del volumen de recarga entre los períodos 2000-2014 y los escenarios de mediano y largo plazo

	Periodos de recarga (hm^3)					
	2000-2004	**2005-1009**	**2010-2014**	**2000-2014**	**2025-2029**	**2050-2054**
Promedio	23,3	26,6	26,2	25,4	23,6	21,9
Desv. Std.	21,4	23,7	25,5	21,3	18,3	17,7

Fuente: Elaboración propia

La incertidumbre de los modelos matemáticos siempre es un tema en discusión. No obstante, estos son herramientas de estimación que permiten analizar comportamientos, tendencia y aproximaciones valiosas para el análisis de cualquier

tipo de sistema (Loáiciga 2003). En el caso en estudio, el uso de diferentes herramientas de estimación produce incertidumbre difícil de calcular. La forma más eficiente para controlar los niveles de desconfianza es utilizar información primaria con altos niveles de detalle. Esto fue una premisa desde el inicio del trabajo y se trabajó con importantes escalas de detalle tanto espacial como temporalmente.

Investigaciones como las de Hernando (2012) y Sibaja (2013) enfocaron esfuerzos en resolver objetivos similares a los expuestos en esta investigación y en especial el trabajo de Sibaja (2013) compartió la misma microcuenca para los análisis correspondientes. Sin embargo, el modelo de estimación resulta grueso al no tomar en cuenta varios procesos ecohidrológicos fundamentales como la intercepción de la lluvia por el follaje de las plantas o el respectivo balance hídrico. Tampoco hacen mención del peso del agua subterránea en el abastecimiento de agua potable en la zona, factor relevante en el análisis de disponibilidad de agua para consumo humano.

Un comportamiento identificado en los resultados es la sensibilidad apreciada en los periodos prolongados ya sea secos o lluviosos. La relación de este comportamiento con los eventos de El Niño provoca anomalías de mayor ausencia de lluvias y con el evento de La Niña produce valores de precipitación mayores al promedio. La incidencia de los fenómenos ENOS sobre la recarga quedó demostrada pese a que en el periodo 2000-2014 solo se dieron eventos de intensidad moderada o débil según los registros del Índice Oceánico del Niño de la NOAA (2016). Resultaría enriquecedor analizar la incidencia de eventos ENOS de magnitud fuerte o muy fuerte ampliando el periodo de registros meteorológicos.

En los escenarios de los periodos 2025-2030 y 2050-2055, la incidencia de condiciones extremas no se visualiza con claridad, posiblemente por la dificultad que representa el modelado de fenómenos climáticos complejos como los ENOS. La comunidad científica internacional ha analizado el tema de los extremos climáticos en los escenarios mayormente aceptados, en donde principalmente el aumento de la temperatura atmosférica y con esto el aumento de la temperatura oceánica dé como resultado el sustento de eventos de mayor magnitud (Bindoff et al. 2013).

Los eventos extremos en el mediano y largo plazo representan todo un reto en cuanto su interpretación en la respuesta de la recarga. Por ejemplo, los eventos de precipitación de mucha intensidad durante periodos cortos de tiempo generan mayores volúmenes de escorrentía superficial al superar el tiempo de infiltración de los suelos. Esto conlleva a que en meses donde se pueden dar grandes volúmenes de lluvia total, esto no se traduzca en mayores volúmenes de recarga.

Los sistemas acuíferos del Valle Central sobresalen por ser uno de los dos sistemas acuíferos más relevantes en Centroamérica. Dentro de estos sobresalen los acuíferos Barva y Colima. En el Gran Área Metropolitana (GAM), más del 65 % de la población es abastecida con agua proveniente de fuentes subterráneas (Reynolds 2002; Reynolds-Vargas & Fraile 2009). En este sentido, lo encontrado en los resultados coincide con Ramírez (2007) y Castro (2011), en resaltar las partes altas del macizo del Barva como las zonas en donde ocurren los mayores volúmenes de recarga al agua subterránea. Cabe recalcar que la escogencia de la microcuenca de tesis fue dada por representar en buena medida las condiciones hidrológicas generales de otras cuencas aledañas en el Norte de Heredia, por lo que se podría inferir que el comportamiento analizado, según los registros y los escenarios generados, es similar en toda la región en mención.

Las principales limitantes metodológicas están asociadas a la incertidumbre asociada a los escenarios climáticos que alimentar el modelo hidrológico. Como se mencionó en las secciones respectivas, los datos regionalizados están proyectos bajo un escenario de emisiones A2, en el cual, continuaran el crecimiento poblacional a un ritmo similar al actual y habrá pocos avances en la disminución de emisiones, siendo el menos optimista. Similar a lo ocurrido en la proyección de datos de mediano y largo plazo para los cambios de uso de la tierra, la variable clima puede verse afectada en gran medida de las decisiones globales que se encuentran en este momento en discusión, por lo que, el trabajo con el escenario A2 permite prever las condiciones más drásticas y realizar ejercicios de planificación bajo este umbral. Los autores advierten que la generación de escenarios mostro sesgos que subestiman valores tanto positivos como negativos en precipitación como temperatura, lo que aducen a la puede ser el resultado de la baja densidad de datos (especialmente en zonas montañosas) y el método de interpolación de la climatología base en el caso de Hijmans et al. (2005), y en el caso del modelo PRECIS resulta de la subestimación de la temperatura de la superficie del mar del océano Atlántico tropical y de la resolución espacial (Alvarado et al. 2012).

7. Fase IV: Recomendaciones para la gestión del recurso hídrico en la microcuenca priorizando el consumo humano, apoyadas en el uso de tecnologías limpias

Generar sistemas de abastecimiento de agua potable más resilientes es un tema de máxima relevancia tanto para los entes encargados como para la población abastecida. Los ejercicios de creación de escenarios resultan de mucha utilidad al permitir explorar posibles escenarios de disponibilidad de agua en el mediano y largo plazo. La planificación eficiente y responsable del recurso es un tema que mezcla una serie de condiciones históricas, actuales y futuras del ente suministrador como de su población. Así, la planificación se convierte en un elemento dinámico que requiere de la actualización constante de datos en busca de caminos que posibiliten la toma de decisiones en donde resulta fundamental la calidad de los mismos.

Siendo una cuenca con un potencial de producción de agua muy importante, los esfuerzos deben concentrarse en la preservación de estas características. Los entes encargados del suministro de agua potable dentro de la cuenca y los que se abastecen de esta agua para uso de poblaciones fuera de la cuenca deben ser los principales impulsores de programas de conservación de las áreas definidas como prioritarias.

La primera acción para lograr la conservación efectiva de las zonas de donde se nutren los principales reservorios de agua subterránea de la microcuenca es el conocimiento detallado de estas zonas y las propiedades que hacen posible la recarga a los acuíferos. En este sentido, el presente trabajo brinda luces de cuáles son estos factores y cómo están distribuidos espacialmente.

7.1 Gobernanza climática: eje social y político en la gestión del recurso hídrico y las tecnologías limpias

La participación de actores sociales es un tema de suma relevancia en las estrategias de adaptación y resiliencia ante los distintos escenarios climáticos y la gestión del recurso hídrico. En este sentido, la transferencia la generación de conocimiento científico reviste un papel fundamental en el proceso de apropiación del conocimiento para la toma de decisiones a nivel social y político. Esta transferencia es un paso delicado que con frecuencia no se da de manera efectiva, provocando la no utilización de información que podría ser de mucha relevancia en los diferentes contextos de la participación ciudadana en las políticas públicas a nivel local y nacional.

Cabe destacar la importancia de la gestión política local en el tema en cuestión. Como quedó demostrado en los resultados de la sección 6, además de las

variaciones climáticas, el componente de cambio de uso de la tierra tiene un papel de mucho peso en la disponibilidad futura de agua en la microcuenca. Las municipalidades respectivas son quienes otorgan los permisos de construcción en las zonas bajo su administración, tienen una delicada responsabilidad que es necesario que conozcan a profundidad. El conocimiento en manos de los actores políticos debe ser una herramienta que sustente las decisiones que incidirán en la disponibilidad del recurso hídrico en el mediano y largo plazo en la microcuenca. Por tanto, se propone un proceso de transferencia del conocimiento basado en los resultados del presente proyecto que guíe la transferencia del conocimiento desde la producción de la información científica hasta la incidencia en la toma de decisiones políticas a nivel local (fig. 33).

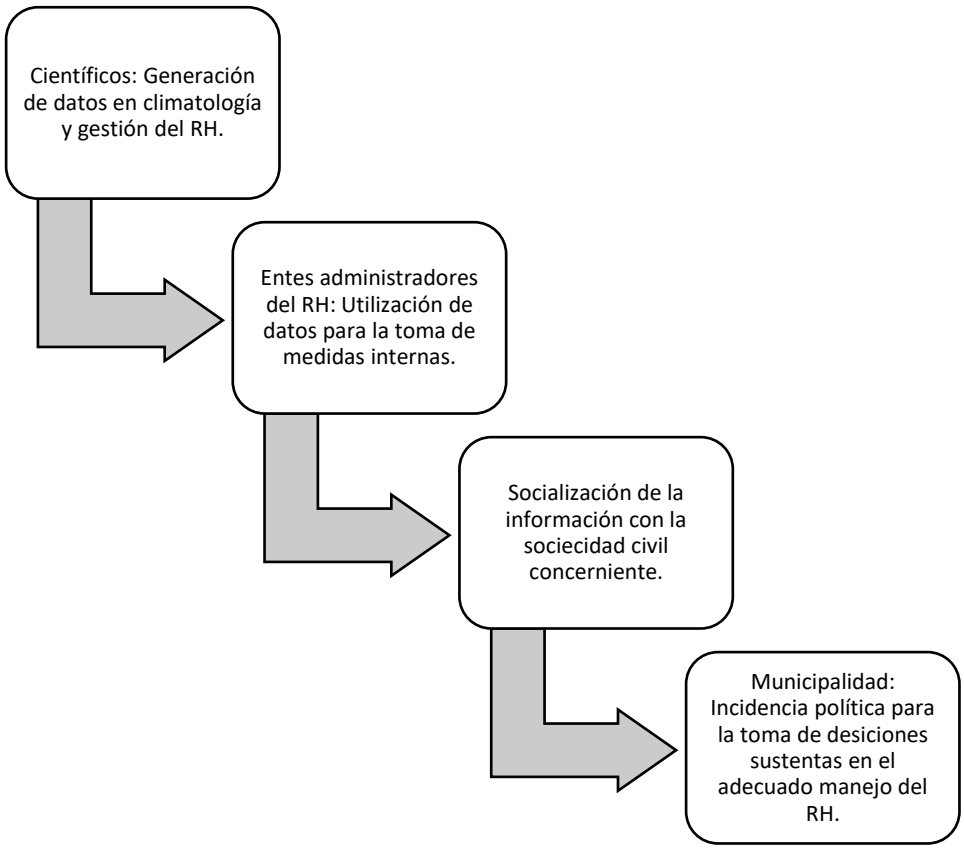

Fig. 33. Proceso para la transferencia del conocimiento científico en clima y gestión del Recurso Hídrico para el aumento de la resiliencia de la disponibilidad de agua. Fuente: Elaboración propia.

El proceso de toma de decisiones puede ser diferenciado en distintas etapas, las cuales, son etapas similares a las definidas para los procesos de adaptación al cambio climático según la guía PROVIA-UNDEP (2013). Esta comprende 4 ciclos generales como se muestra en la figura 33.

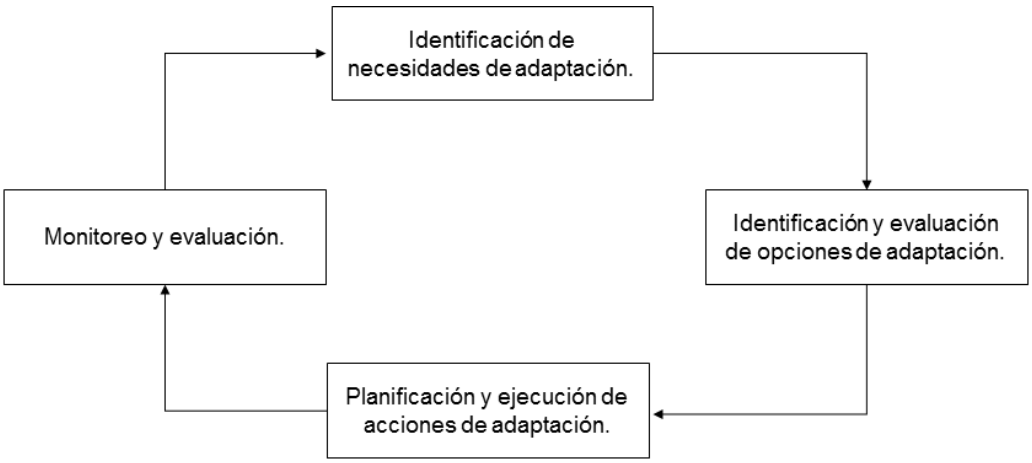

Fig. 34. Proceso iterativo para las acciones de adaptación. Fuente: Modificado de PROVIA-UNEP (2003).

Entre las principales limitantes para mantener activa la disposición de algunos actores sociales en asuntos de cambio climático se encuentran la falta de voluntad, la desinformación y la nula o mala educación sobre el tema (Feldmann y Biderman, 2001). Los mismos autores señalan que para que la sociedad con acceso a los mecanismos de toma de decisiones debe contar con información suficiente y veraz para mantener una conciencia clara de lo que significa el fenómeno de cambio climático y sus implicaciones en el recurso hídrico. El análisis de la problemática hídrica en torno a la gobernabilidad, revela que las medidas de adaptación exitosas, deben estar asociadas a la capacidad de diseñar políticas hídricas socialmente aceptadas, lo cual depende del grado de participación y acuerdo social y su efectiva implementación (Postigo et al 2013)

En cuanto a la gestión del recurso hídrico en escenarios climáticos riesgosos, autores como Ureña (2004) y Villalobos et al (2007), mencionan la importancia de la contemplación de tecnologías limpias en los planes de adaptación. Las tecnologías limpias proporcionan una herramienta para el uso eficiente del recurso hídrico y la minimización de la contaminación. En este sentido, los escenarios de menor disponibilidad obligan a repensar la manera en que se utiliza el agua según cada tipo de usuario, sea domiciliar, agropecuario o comercial-industrial según sea el caso. Como se desarrolló en la sección 6.1, el uso agropecuario pese a contar con pocos registros de uso en los distintos entes operadores, proporcionalmente representa una cantidad importante de agua. Sumado a esto, los usuarios agropecuarios cuentan con gran cantidad de concesiones de origen privado, haciendo relevante la puesta en discusión de medidas para hacer un uso eficiente en el sector productivo.

Al mismo tiempo, los usuarios comerciales-industriales dentro de la cuenca deben ser sujetos de ajustes aunque el aporte al consumo sea el de menor cuantía en términos proporcionales. Así, el desafío de usar el recurso de una manera más

eficiente y con una menor generación de residuos, puede resultar en una oportunidad de mejorar los procesos y obtener una buena imagen en términos de sostenibilidad. Dentro de algunas acciones concretas basadas en tecnologías limpias en los sectores domiciliar, agropecuario y comercial industrial, que pueden ser implementadas en el caso específico de los usuarios de la microcuenca del río Porrosatí, se encuentran:

Fig. 35. Acciones basadas en tecnologías limpias en los sectores domiciliar, agropecuario y comercial industrial para el uso eficiente del agua en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia.

7.1 Zonificación para la conservación de áreas de importancia hídrica dentro de la microcuenca del río Porrosatí en el mediano y largo plazo

Los valores promedio en el periodo 2000-2014 mostraron que las áreas de mayor volumen de recarga se encuentran en las zonas 1 y 2, ubicadas en la parte alta de la microcuenca. Los aspectos que más influyen en esta determinación se basaron en los resultados obtenidos de los balances hídricos históricos (2000-2014) y los escenarios de mediano y largo plazo. Además se tomaron en cuenta las posibilidades de cambio de uso, en los cuales las zonas con pastos y cultivos muestran tendencia a convertirse en usos urbanos. También, en el uso de bosque está regulado el cambio de uso según la legislación vigente, factor que brinda mayor seguridad en términos de planificación a mediano y largo plazo, como en el caso de las zonas altas de la microcuenca del río Porrosatí y la propuesta de priorización (fig. 33).

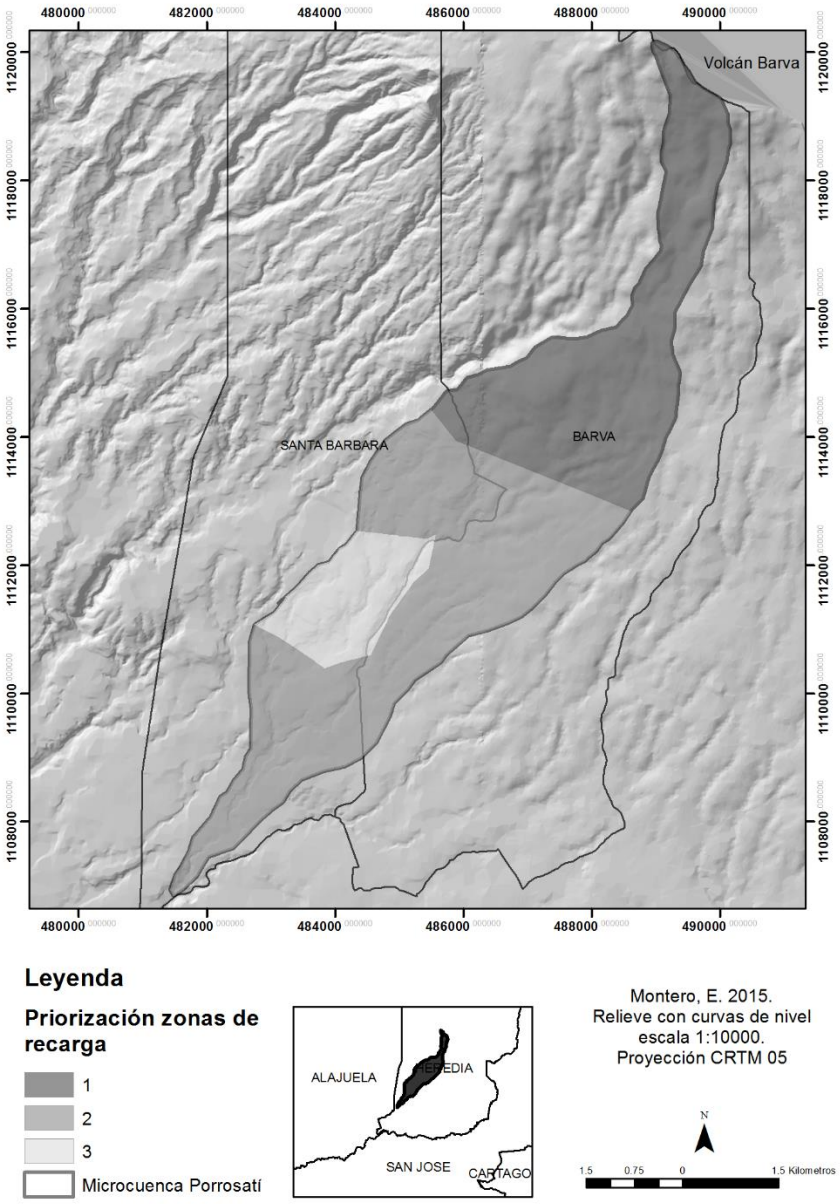

Fig. 36. Propuesta de priorización para la conservación de zonas de recarga en el mediano y largo plazo en la microcuenca del río Porrosatí. Fuente: Elaboración propia.

Esta selección de las zonas altas como prioridad en términos de conservación hídrica, permitiría concentrar y hacer un uso efectivo de los recursos destinados a este fin (tabla 19). Esto no indica que las demás zonas de la cuenca no tengan importancia en términos hidrológicos, sin embargo, los procesos de impermeabilización por cambio de uso de la tierra agrícolas y de pastos a uso urbano y las pocas herramientas legales y reglamentarias para detenerlos dificultan en gran medida los esfuerzos en esta dirección.

Tabla 19. Descripción de los factores utilizados para la priorización dentro de la microcuenca del río Porrosatí

Factor	Descripción
Precipitación	Las zonas altas exhiben los mayores valores de lluvia en el registro 2000-2014 y en los escenarios de mediano y largo plazo, lo que con las condiciones adecuadas, permitiría aprovechar estos importantes volúmenes a efectos de recarga.
Temperatura	Las zonas altas muestran las temperaturas más bajas tanto en el registro 2000-2014 como los escenarios de mediano y largo plazo, lo que se traduce en menores volúmenes de evapotranspiración.
Suelo	Pese a que en las zonas medias se encontraron condiciones físicas del suelo que benefician en mayor medida la infiltración y percolación del agua, los valores en las zonas altas fueron cercanos y considerados como muy buenos.
Uso de la tierra	La zonas altas se caracterizan por contar con usos de bosque y plantaciones forestales predominantemente, siendo usos que benefician las condiciones del suelo para la infiltración del agua y permiten conservar las dinámicas hidrológicas naturales

Fuente: Elaboración propia

La priorización para la conservación del recurso hídrico con fines de abastecimiento humano debe ser liderada por los entes encargados del suministro en la microcuenca. Esto además de la responsabilidad de procurar el abastecimiento en cantidad y calidad suficiente para el futuro, se fundamenta en las facilidades ý potencialidades operativas que podrían tener los entes. La inclusión de tarifas hídricas en donde se cobra un monto adicional destinado a programas de conservación en los cuales se involucran actividades como Pagos por Servicios Ambientales (PSA), reforestación de sitios degradados, educación ambiental, entre otros, han sido aplicados exitosamente por la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH), uno de los entes que se abastecen del agua producida en la microcuenca del Porrosatí.

La participación de grupos organizados de diferente índole, así como la población de la microcuenca en general, debe ser un punto medular. El primer paso es concientizar a la población de la importancia de las zonas altas de la microcuenca para el abastecimiento de agua potable y la dependencia para la recarga del agua subterránea. El uso eficiente del recurso y las medidas tomadas a nivel individual tiene un peso significativo en el balance de disponibilidad en el medio y largo plazo.

A nivel regional, las políticas de ordenamiento territorial y reglamentos de protección de área de importancia ecológica e hídrica pueden tener impactos positivos en zonas sensibles de la microcuenca como las altas y medias. La vigilancia y participación de la población de la microcuenca del Porrosatí y adyacentes en las que probablemente se encuentren circunstancias similares, pueden ser decisivas en este sentido. A su vez, los entes encargados de la administración y abastecimiento del recurso hídrico se convertirán en figuras políticas en tanto las condiciones en el mediano y largo plazo se cumplan.

7.2 Otras medidas basadas en tecnologías limpias para asegurar la disponibilidad del recurso hídrico en la microcuenca del río Porrosatí

En este apartado se describen brevemente algunas recomendaciones para aumentar el grado de resiliencia de los sistemas de abastecimiento ante los escenarios pronosticados en este mismo trabajo. En esta dirección, se recomienda realizar trabajos posteriores que profundicen sobre este tipo de medidas a nivel operacional y su factibilidad técnica, económica y ambiental.

Observaciones de las variaciones climáticas e hidrológicas para la planificación en el corto, mediano y largo plazo.

El análisis a profundidad de variables climáticas y su incidencia en la recarga del agua subterránea fue el principal componente del presente trabajo. Pese a que aún se puede ahondar más, se encontraron limitaciones en la disponibilidad de registros climáticos. Los modelos matemáticos tratan de acercar la complejidad de los procesos naturales a operaciones matemáticas relativamente simples, en las que la calidad de los datos de entrada resulta fundamental para producir resultados confiables. Por esto, la ampliación de la cobertura del monitoreo climático es un factor que favorece enormemente el análisis de comportamientos y la generación de escenarios futuros para la planificación del recurso hídrico.

Otros datos como el monitoreo periódico de la producción de agua de las nacientes, permite obtener datos de mucha utilidad, en los cuales se pueden desarrollar fórmulas matemáticas que puedan predecir la respuesta o sensibilidad de las fuentes antes variaciones en las condiciones climáticas. Para lograr este objetivo y obtener resultados confiables, al igual que en el punto anterior, es fundamental contar con registros lo más amplios posibles. El factor climático es tan variable que la escala temporal de los datos debe ser amplia para evitar resultados segados o recomendaciones equivocadas.

La ampliación del monitoreo climático e hidrológico debe ser una responsabilidad compartida entre los entes encargados del abastecimiento como de las

institucionales estatales encargadas. El trabajo conjunto entre instituciones puede ser una estrategia efectiva para alcanzar este objetivo.

Aumento de la capacidad de tanques de almacenamiento y uso eficiente del recurso

Extender la capacidad de almacenamiento les permitirá a los entes administradores del agua en la microcuenca, hacer una planificación más controlada de los recursos disponibles. Además de servir como reservorios en tiempos críticos, el aumento del almacenamiento induce un racionamiento más eficiente de la extracción del recurso. El volumen de los tanques puede ser construido con las medidas necesarias para abastecer los escenarios de crecimiento o decrecimiento demográfico en el mediano plazo. Esta medida ya está siendo implementada por la Asada de San Pedro de Barva y la Empresa de Servicios Públicos de Heredia actualmente.

Cabe recalcar que una proporción estimable del agua extraída de los acuíferos de las zonas montañosas de Heredia para abastecimiento de agua potable es perdida por deficiencias en la captación, fugas y conexiones ilegales. Corregir estas situaciones podría ayudar en el control y uso eficiente del recurso para aumentar la resiliencia de los sistemas hídricos que dependen del macizo productor de agua del Volcán Barva.

A la vez, sería altamente recomendable replicar el estudio con un mayor alcance tanto en términos de territorio y muestreo como la incorporación de la variable de comportamiento del consumo (demanda) de líquido, tanto como tendencia histórica relacionada a la densidad demográfica como en relación a las dinámicas climáticas para así proyectar de manera ajustada las variables de disponibilidad y demanda en el mediano y largo plazo.

8. CONCLUSIONES

La microcuenca del río Porrosatí se caracteriza por abastecer a un gran volumen de población del sector norte de Heredia de manera directa, debido a sus abundantes y caudalosas nacientes y pozos. Por otra parte, de forma indirecta la recarga que sucede en el área de la microcuenca recarga a su vez importantes fuentes como los sistemas acuíferos Barva y Colima, los cuales abastecen a cerca del 60 % de la población en el Gran Área Metropolitana.

Los resultados generados revelan la alta sensibilidad de los sistemas hídricos subterráneos a las variaciones en el clima. Además, elementos como los cambios en el uso de la tierra representan una amenaza ante la recarga y eventual disponibilidad del recurso hídrico de origen subterráneo en la microcuenca. En este sentido, el aumento del área impermeabilizada es una limitante trascendental por considerar en los escenarios futuros.

Las variaciones en el clima muestran escenarios en los que se desdibuja de manera clara el calendario estacional típico de la cuenca. Así, la discontinuidad temporal de las precipitaciones podría traer consigo efectos adversos sobre los niveles de la lámina de agua. Al no alcanzarse los niveles necesarios para que el agua subterránea emane naturalmente de los manantiales ubicados en las zonas altas de la microcuenca, se pone en riesgo el abastecimiento de más de 25 000 personas de forma directa (en el 2015). Esto también compromete la extracción de agua subterránea mediante pozos, en donde se podría variar las profundidades necesarias para garantizar el abastecimiento requerido.

Estas variaciones climáticas generadas para el mediano y largo plazo dificultan la labor de planificación para el abastecimiento del recurso hídrico por parte de las instituciones encargadas. Otro elemento fundamental y que no fue tomado en cuenta en los balances hídricos por su dificultad de análisis, es la variación de la intensidad de las lluvias. Eventos de precipitación de mucha intensidad dificultan el proceso de infiltración y percolación del agua en el suelo y subsuelo. Así, estos eventos aumentan la proporción de agua que escurre sobre la superficie y disminuye el agua recargada a los acuíferos.

Pese a la dificultad de pronosticar y crear escenarios que incluyan la incorporación de anomalías como los fenómenos ENOS, de los cuales fue comprobada la sensibilidad de la recarga ante estas condiciones extremas secas o lluviosas, existe la probabilidad de darse eventos de mayor magnitud y frecuencia altamente consensuada por la comunidad científica internacional tal como se mencionó en la sección de resultados y discusión. Estas condiciones podrían crear inestabilidad en las fuentes de abastecimiento de los sistemas de acueducto presentes en la microcuenca. En los años secos, que en su mayoría estuvieron relacionados con

condiciones de El Niño, la recarga mostró disminuciones significativos que han obligado a los entes operadores a utilizar fuentes alternas como de origen superficial, racionamientos y fuentes externas como camiones cisternas para la dotación del líquido.

La zonificación de la cuenca permite visualizar las zonas bajas como zonas con valores bajo de recarga al agua subterráneo en comparación con las zonas altas. La principal razón radica en los altos volúmenes de pluviosidad dados en las partes montañosas y una mayor cobertura vegetal de bosque. En las zonas bajas se combinan regímenes de lluvia más bajos y un aumento considerable del área impermeabilizada y poca cobertura boscosa.

La presencia de zonas de alta pluviosidad hacia las partes altas de la microcuenca aumenta la importancia y presión de estas en el mediano y largo plazo. Los escenarios de usos del suelo muestran incrementos considerables del área impermeabilizada en las partes medias y bajas, lo que resulta en una drástica reducción de la recarga al agua subterránea. Por tanto, la parte alta de la microcuenca será la zona de la que dependerá mayormente la microcuenca del Porrosatí. La urgencia por proteger esta zona es respaldada con los datos generados en donde hay un aumento del área impermeabilizada poco significante. Esto se encuentra relacionado con las políticas de protección, leyes y reglamentos ejecutados a la fecha. Un viraje en las condiciones políticas podría desencadenar en la apertura al desarrollo inmobiliario y turístico a esta vital zona causando impactos sobre la cantidad y calidad del agua subterránea generada en las zonas altas de la microcuenca.

El componente subterráneo es por sí mismo un elemento limitante o de riesgo para el abastecimiento de agua potable en el mediano y largo plazo. Los datos de los entes operadores con que se trabajó, demuestran que estos se abastecen de un 100 % de agua subterránea. Las fuentes superficiales son utilizadas únicamente en casos de emergencia, como épocas secas severas o la interrupción del funcionamiento de subsistemas de abastecimiento por daños imprevistos. La mayor utilización de fuentes subterráneas se justifica por las conocidas diferencias en sus características fisicoquímicas y microbiológicas. En el país, la mayoría de fuentes subterráneas gozan de características deseables que hacen que los tratamientos de potabilización sean simples y de bajo costosos, mientras que las fuentes superficiales requieren de tratamientos más complejos y costos. Sumado a esto, existe una percepción negativa asociada a la calidad el agua de origen superficial, posiblemente fundamentada en apreciaciones organolépticas.

A su vez, en el estudio se tuvieron limitantes metodológicas. Principalmente la incertidumbre asociada a los escenarios climáticos que alimentar el modelo hidrológico. Como se mencionó en las secciones respectivas, los datos

regionalizados están proyectos bajo un escenario de emisiones A2, en el cual, continuaran el crecimiento poblacional a un ritmo similar al actual y habrá pocos avances en la disminución de emisiones, siendo el menos optimista. Similar a lo ocurrido en la proyección de datos de mediano y largo plazo para los cambios de uso de la tierra, la variable clima puede verse afectada en gran medida de las decisiones globales que se encuentran en este momento en discusión, por lo que, el trabajo con el escenario A2 permite prever las condiciones más drásticas y realizar ejercicios de planificación bajo este umbral.

Por otro lado, las experiencias analizadas mediante la literatura, evidencian la importancia de la participación ciudadana en el marco de la formulación de políticas de adaptación exitosas. El primer paso entendido como la generación de conocimiento científico, está dado por lo que resta seguir el proceso propuesto en la sección 7.1, en el cual se promueve una horizontalidad del acceso y manejo del conocimiento respecto al cambio climático y la disponibilidad de recurso hídrico. El empoderamiento y participación ciudadana aunada al correcto manejo político por parte de las municipalidades y el técnico por parte de los entes administradores puede generar las oportunidades de adaptación que potencien inclusive mejoras a las condiciones actuales de abastecimiento.

9. BIBLIOGRAFÍA

Aguilar; J. & Iza, A. 2006. Gobernanza de aguas compartidas. Moravia, Costa Rica, UICN. 204 p.

Ali; T; McFarlane, B; Varma, C; Warrick, S; Emelyanova, J; Hodgson; Charles, C. 2012. Potential climate change impacts on groundwater resources of south-western Australia. Journal of Hydrology 475: 456–472

Alvarado, G; Bertsh, S; Bornemiza, W; Cabalceta; Henríquez, J; Mata, J; Molina; Salas, E. 2000. Suelos derivados de cenizas volcánicas (andisoles) de Costa Rica. San José, Costa Rica, UCR. 62 p.

Alvarado, L; Contreras, C; Alfaro, J; Jiménez, S. 2012. Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica. San José, Costa Rica, IMN. 1060 p.

Arellano, V; Rodríguez, J; Zúñiga, O; Vásquez; Ramírez, E; Paredes; Suárez, K. 2009. Estudio hidrogeológico para la caracterización y delimitación de las zonas de recarga de las fuentes Milano y El Cairo. Costa Rica, Hidrogeotecnia. 133 p.

Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, Eds., 2008: El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 224 págs.

Beck, S; Bernauer, W. 2011. How will combined changes in water demand and climate affect water availability in the Zambezi river basin. Global Environmental Change 21: 1061–1072.

Bergoeing, W. 2007. Geomorfología de Costa Rica. 2da edición. San José, Costa Rica, Librería Francesa. 328 p.

Bindoff, NL; Stott, PA; AchutaRao, M; Allen, MR; Gillett, N; Gutzler, D; Mokhov, II. 2013. Detection and attribution of climate change: from global to regional. Reino Unido, Cambridge University Press.

Bindoff, NL; Stott, PA; AchutaRao, M; Allen, MR; Gillett, N; Gutzler, D; Mokhov, II. 2013. Detection and attribution of climate change: from global to regional. Reino Unido, Cambridge University Press.

Bruijnzeel, L. 1990. Hydrology of moist forest and effects of conversion: A state of knowledge review. Paris, Francia, UNESCO. 224 p.

Busuioc, M; Chen, X; Hellstrom, L. 2001. Performance of statistical downscaling models in GCM validation and regional climate change estimates: application for Swedish precipitation. International Journal of Climatology 21: 557–578.

Candela, L; Tamoh, K; Olivares, G; Gomez, M; Valdes-Abellan, J. 2015. Efectos del cambio climático y usos del suelo sobre los recursos hídricos de la cuenca del río Tordera (Barcelona, España). Aqua-LAC - Vol. 7 - Nº 1 - Mar. 2015. pp. 1 - 10

Castro, J; Chavarría, K; De la Cruz, A; Gelabert, M; Martínez, D; Paniagua, A; Sánchez; Sibaja, L. 2011. Impacto antrópico en el manto acuífero Barva (Heredia, Costa Rica) con énfasis en el uso del suelo (1992-2006). Cuadernos de Investigación UNED 3(1): 71-80.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Chile). 2010. La economía del cambio climático en Centroamérica. México, Naciones Unidas. 144 p.

CGR (Contraloría General de la República) 2012. Informe sobre la auditoría operativa acerca de la eficacia y eficiencia de la Empresa de Eervicios Públicos de Heredia para garantizar la prestación del servicio de abastecimiento de agua potable. InformE Nro. DFOE-AE-IF-07-2012. San José, Costa Rica. 37 p.

DAM (Dirección de Aguas del MINAE) 2015. Base de datos de concesiones de agua. San José, Costa Rica.

Dawes, W; Ali, T; Varma; Emelyanova, N; Hodgson, Y; McFarlane, M. 2012. Modelling the effects of climate and land cover change on groundwater recharge in south-west Western Australia. Hydrology and Earth System Sciences 16: 2709–2722.

Dengo, R. 2004. Perspectivas y problemas en el uso del agua. San José, Costa Rica, CRU-SA. 61 p.

Denyer, P; Kussmaul, D. 2000. Geología de Costa Rica. Cartago, Costa Rica, Editorial Tecnológica. 515 p.

Dobles, R. 2008. Política hídrica nacional y la gestión del agua como recurso y como servicio. San José, Costa Rica, MINAET. 21 p.

Forsythe, W. 1985. Física de suelos: manual de laboratorio. San José, Costa Rica, IICA. 212 p.

Fowler, H; Blenkinsopa, S; Tebaldib, C. 2007. Review: Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. Int. J. Climatol. 27: 1547–1578 (2007) DOI: 10.1002/joc

Galdivia, J; Rueda, A. 2006. ¡¡Agua!! España, Ministerio de Educación. 175 p.

García, F; Campos, R. 2005. Enfoques de manejo de recursos naturales a escala de paisaje: convergencia hacia un enfoque ecosistémico. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 55 p.

Glynn, B; Heinke, T. 1999. Ingeniería ambiental. 2da ed. México, Prentice Hall. 800 p.

Green, T; Taniguchib, M; Kooic, H: Gurdakd, J; Allene, D; Hiscockf, Alice, A; Aureli, T. 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. Journal of Hydrology 405: 532–560.

Gunawardhana, K; Kazama, I. 2012. Statistical and numerical analyses of the influence of climate variability on aquifer water levels and groundwater temperatures: The impacts of climate change on aquifer thermal regimes. Global and Planetary Change: 86–87.

HEC (Hydrologic Engineering Center, Estados Unidos). 2010. Hydrologic Modeling System (HEC-HMS): User Manual: Version 3.5. Estados Unidos, U.S. Army Corps of Engineers. 306 p.

Henríquez, J; Cabalceta, E. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 111 p.

Henríquez, L. 2006. Escenarios futuros de uso de suelo para el análisis del efecto del cambio global en los recursos hídricos aplicado al acuífero de la Mancha Oriental. Tesis de Maestría. Universidad Politecnica de Valencia. Valencia, España. 225 p.

Hernando, L; Ruiz, A; Solís, K. 2012. Disponibilidad del recurso hídrico en la microcuenca del río Segundo: Región Central de Costa Rica. Revista Geografía de América Central 48 (1): 117-132.

Hijmans, R; Cameron, S; Parra, J; Jones, P; Jarvis, A. 2005. Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. International Journal of Climatology 25: 1965-1978.

ICE (Instituto Costarricense de Electricidad). 1990. [ ]. Boletín Hidrológico (18).

IPCC (Intergubernamental Panel on Climate Change). 1997. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC. Documento Técnico II. 47 p

IPCC (Intergubernamental Panel on Climate Change). 2000. SRES (Special Report: Emissions Scenarios): Summary for Policymakers. Working Group III. 21 p.

IPCC (Intergubernamental Panel on Climate Change). 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. España. 73 p.

Jiménez, F; Faustino, H. s.f. Enfoques y estrategias para el manejo de cuencas hidrográficas en América Central. San José, Costa Rica, CATIE, 8 p.

Kurylyk, K; MacQuarrie, L. 2013. The uncertainty associated with estimating future groundwater recharge: A summary of recent research and an example from a small unconfined aquifer in a northern humid-continental climate, Journal of Hydrology, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.043

Lavel, A. 2009. Desempacando la adaptación al cambio climático y la gestión del riesgo: Buscando las relaciones y diferencias: Una crítica y construcción conceptual y epistemológica. UICN-FLACSO. 45 p.

León, J; González, M; Gallardo, J. 2010. Distribución del agua lluvia en tres bosques altoandinos de la Cordillera Central de Antioquia, Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín 63(1): 5319- 5336.

Loáiciga, A. 2003. Climate Change and Ground Water. Annals of the Association of American Geographers 93 (1): 30–41.

Lorío, R. 2004. Procesos organizativos, regulación y tecnologías para el manejo y conservación del recurso hídrico y mitigación de la sequía, subcuenca del río Aguas Calientes, Nicaragua. Tesis de Maestría. Turrialba, Cartago, Costa Rica, CATIE. 150 p.

Martínková, M; Hesseb, C; Krysanovab, V; Vetterb, T; Hanela, M. 2011. Potential impact of climate change on nitrate load from the Jizera catchment. Physics and Chemistry of the Earth 36: 673–683.

Mata R., Ramírez J.E. 1999. Estudio de caracterización de suelos y su relación con el manejo del cultivo de café en la Provincia de Heredia. ICAFE. San José, Costa Rica. 92 p

Mata, R; Ramírez, J. 1999. Estudio de caracterización de suelos y su relación con el manejo del cultivo de Café en la provincia de Heredia. San José, Costa Rica, Instituto del Café de Costa Rica. 92 p.

MINAET (Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, Costa Rica). 2009. Estrategia Nacional de Cambio Climático. San José, Costa Rica, Editorial Calderón y Alvarado.109 p.

MINAET (Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, Costa Rica). 2009. Estrategia Nacional de Cambio Climático. San José, Costa Rica, Calderón y Alvarado. 109 p.

Mora, W. 2009. Agua. San José, Costa Rica, EUNED. 352 p.

Moss; Brinkman; Calvo; Edmonds; Elgizouli; Emori; Hibbard; Jones; Kainuma; Kelleher; Lamarque; Matthews; Meehl; Meyer; Mitchell; Nakicenovic; O'Neill; Pichs; Riahi; Rose; Runci; Stouffer; Weyant; Wilbanks; van Ypersele. 2008. Exploración de nuevos escenarios para el análisis de las emisiones, del cambio climático, de sus impactos y de las estrategias de respuesta: Informe de una Reunión de Expertos. Ginebra, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, 26 p.

Musmmani, S. 2013. Tecnologías limpias: ¿Qué son y adonde se encuentran?, (diapositivas). Heredia, Costa Rica.

Narula; Gosain. 2013. Modeling hydrology, groundwater recharge and non-point nitrate loadings in the Himalayan Upper Yamuna basin. Sci Total Environ, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.022

NOAA (National Weather Service). 2016. Cold & warm episodes by season (en línea, sitio web). Consultado Setiembre, 2016. Disponible en: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

NOAA 2015. Global Analysis - Annual 2015. Consultado setiembre, 2016. Recuperado de: https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201513

Núñez, J. 1981. Fundamentos de edafología. San José, Costa Rica, EUNED. 220 p.

OPS (Organización Panamericana de la Salud). 2003. Calidad del agua potable en Costa Rica: Situación actual y perspectivas. San José, Costa Rica. 40 p.

Pedroni; Imbach; Rodríguez. 2001. Finding threatened forest areas in the Central Volcanic mountain range Conservation Area in Costa Rica. Ponencia VI Semana Científica del CATIE. p. 105-106.

PNUMA (Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2003. GEO América Latina y el Caribe: perspectivas del medio ambiente. s.l. 281 p.

Postigo; Chacón; Castro; Malvares Miguez; Geary; Lampis; Palacio; de la Cuadra; Blanco; Fuenzalida; Torres. Cambio Climático, Movimientos Sociales y Políticas Públicas. Instituto de Ciencias Alejandro Lipschutz (ICAL). Santiago, CH. 298 p

Prieto, A. 2004. El agua: Sus formas, abastecimientos, usos, daños, control y conservación. 2da ed. Bogotá, Colombia, Ecoe Ediciones.

Pritchett, W. 1986. Suelos forestales: Propiedades, conservación y mejoramiento. México, Editorial Limusa.

PROVIA, 2013: PROVIA Guidance on Assessing Vulnerability, Impacts and Adaptation to Climate Change. Consultation document, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 198 pp.

Ramírez, C. 2007. Recarga potencial del acuífero Colima y Barva, Valle Central. Costa Rica, SENARA. 41 p.

Reynolds, J. 2002. Manejo integrado de aguas subterráneas: un reto para el futuro. San José, Costa Rica, EUNED. 325 p.

Reynolds-Vargas, J; Fraile, J. 2009. Estudios de hidrología isotópica en América Latina 2006. Viena, Austria, OIEA. p. 83-96.

Rodas, A. 2008. Manejo y gestión de zonas de recarga hídrica de microcuencas y fuentes de agua para consumo humano en Honduras. Tesis de Maestría. Turrialba, Cartago, Costa Rica, CATIE. 106 p.

Rosengrant, D; Cai,, B; Cline, G. 2002. Panorama global del agua hasta el año 2025: cómo impedir una crisis inminente. Estados Unidos, Instituto Internacional para el Manejo del Agua. 26 p.

Sánchez, J; Días, A; Cavazos. D; Granados, K; Gómez, M. 2011. Elementos para entender el cambio climático y sus impactos. México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 167 p.

Schosinsky G; Losilla M. 2000. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Revista Geológica de América Central (23): 43-55.

Schosinsky, G. 2006. Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Revista Geológica de América Central, (34-35): 13-30.

Sibaja, 2013. El crecimiento urbano y la producción hídrica en la cuenca del río Porrosatí, provincia de Heredia, Costa Rica. Tesis de Licenciatura de Ciencias Geográficas. San José, Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica. 150 p.

Soto, P. 1989. Diseño de sistema de riego para finca de uso agrícola múltiple. Costa Rica, Universidad de Costa Rica.

Steffen, W & Fenwick, J. 2016. The hottest year on record (again). Climate Council of Australia. Sydney, Australia. 17 p.

Stuart, M; Gooddy, D; Bloomfield, J; Williams. A. 2011. A review of the impact of climate change on future nitrate concentrations in groundwater of the UK. Science of the Total Environment 409: 2859–2873.

U.S. Geological Survey (USGS). 1997. Geology and resource assessment of Costa Rica at 1:500,000 scale; a digital representation of maps of the U.S. Geological Survey's 1987 folio I-1865. Dirección General de Geología y Minas e Hidrocarburos; Universidad de Costa Rica.

UNEP. 2012. The UN-Water Status Report on the Application of Integrated Approaches to Water Resources Management. s.l. 106 p.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2012. Managing Water under Uncertainty and Risk. The United Nations World Water Development Report 4(1): 866.

Ureña, N. 2005. Efectos del aumento poblacional y del cambio del uso del suelo sobre los recursos hídricos en la microcuenca del río Ciruelas, Costa Rica. Tesis de Maestría. Turrialba, Cartago, Costa Rica, CATIE. 170 p.

Varela, A. 2007. Estudio de la gestión municipal del agua: enfoque de "gestión de la demanda del agua" en Costa Rica y en países con mayor grado de gestión del recurso hídrico. Informe. Costa Rica, CIPA. 70 p.

Veneklaas, EJ; van Ek, R. 1990. Rainfall interception in two tropical montane rain forest, Colombia. Hydrological Processes 4(4): 311-326.

Viessman. L & Lewis, L. 2003. Introduction to hydrology. 5 ed. Francia, Lavossier. 776 p.

Villalobos F; Campos M; Retana J. 2007. Estrategia de adaptación del sistema hídrico al cambio climático en la zona noroccidental del Gran Área Metropolitana. Costa Rica, IMN. 62 p.

Wang, G; Leung, K; McGregor, T; Lee, V; Wang, C; Ding, T; Kimura, X. 2004. Regional climate modeling: progress, challenges, and prospects. Journal of the Meteorological Society of Japan 82: 1599–1628.

Wilby, E; Conway, C; Jones, J. 2002. Prospects for downscaling seasonal precipitation variability using conditioned weather generator parameters. Hydrological Processes 16: 1215–1234

Zambrana, H. 1975. Comparación y evaluación de la intercepción de lluvias en dos tipos de bisques tropicales. Tesis de Maestría. Turrialba, Cartago, Costa Rica, CATIE. 61 p.

Zury, B. 2012. Análisis organizacional e institucional de la gestión del agua para consumo humano en las microcuencas Buenavista y Esquichá, cuenca del río Coatán, México-Guatemala. Tesis de Maestría. Turrialba, Cartago, Costa Rica. CATIE. 159 p.