



Retos en la evaluación de recursos hídricos en cuencas pobremente aforadas, la situación de Nicaragua y Centroamérica.

Heyddy Calderón

Área de Investigación y Desarrollo. Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua). P.O. Box 4598, Managua, Nicaragua.
heyddy.calderon@cira.unan.edu.ni

Resumen

Las cuencas no aforadas son aquellas que no cuentan con registros hidrometeorológicos. Las cuencas pobremente aforadas son las que cuentan con dichos registros, pero de forma incompleta. La mayoría de las cuencas en Centroamérica no son aforadas o están pobremente aforadas. Esto limita la capacidad de predecir el comportamiento hidrológico de las cuencas y la capacidad de toma de decisiones en materia de gestión de agua. Los países en desarrollo sufren significativamente los impactos del cambio en el clima y el uso del suelo, y además son las regiones con menos datos hidrológicos y menos redes de monitoreo. Esta combinación lleva a la depredación de los recursos hídricos y a la degradación de los ecosistemas. En Centroamérica, la investigación hidrológica y la evaluación de los recursos hídricos es obstaculizada por la falta de recursos

humanos y financieros. El enfoque general para estudios de cuencas enfatiza el manejo forestal y de suelo mientras pocos recursos son destinados al análisis de los sistemas hídricos. La vulnerabilidad de la región ante los eventos climáticos extremos enfatiza la necesidad de que la gestión de recursos hídricos en Centroamérica debe evolucionar de ser una respuesta inmediata a una crisis hacia la planificación y el monitoreo de largo plazo. Los estudios hidrológicos de largo plazo son necesarios, no sólo por razones científicas; sino también para el beneficio socio-económico y ambiental derivado de la gestión apropiada del agua basada en el conocimiento hidrológico.

Palabras clave: Gestión de recursos hídricos, hidrometeorología, cuencas pobremente aforadas, Centroamérica, Nicaragua.

Abstract

Ungauged catchments are those which lack of hydrometeorological records. Poorly gauged catchments have incomplete hydrometeorological records. Most catchments in Central America are ungauged or poorly gauged. This limits the ability to make predictions on the hydrological behaviour of the catchments and to make sound water resources management decisions. Developing regions suffer significantly the impact of climate change

and land use change, and these are also regions with less hydrological records and fewer monitoring stations. This combination leads to a depletion of water resources and ecosystems. Hydrological research in Central America is hindered by the scarce human and financial resources. The general approach for catchment studies emphasizes forest and soil management and pays insufficient attention to hydrological process study and hydrometeorological monitoring networks.

The vulnerability of the region to extreme climate events highlights the fact that water resources management in Central America needs to evolve from immediate crisis response to long term monitoring and planning. Long-term hydrological studies are necessary, not only for scientific reasons, but also for the socio-economic and

environmental benefits derived from proper water resources management based on sound hydrological knowledge.

Keywords: Water resources management, hydrometeorology, poorly gauged catchments, Central America, Nicaragua

Introducción

La hidrología de cuenca se relaciona profundamente con la gestión de los recursos hídricos para asegurar la sostenibilidad de la vida y los ecosistemas (Bonell & Bruijnzeel, 2004; Uhlenbrook, 2006). El manejo sostenible de los recursos hídricos debería garantizar agua para la vida humana, preservación y uso sostenible de ecosistemas y además minimizar el impacto de los riesgos hídricos. Las decisiones relacionadas con la gestión del agua requieren de información continua y predicciones confiables de la respuesta hidrológica para integrar óptimamente las perspectivas sociales, económicas y ecológicas. Sin embargo, muchas cuencas en el mundo no son aforadas o están pobremente aforadas lo que limita la habilidad de hacer estas predicciones (Sivapalan et al., 2003).

En vista de la falta de datos observados, el comportamiento hidrológico puede ser inferido a partir de las características físicas y climáticas o del comportamiento hidrológico de cuencas similares que sí son aforadas (Singh, Archfield, & Wagener, 2014). En este contexto emergió la iniciativa de la década de Predicción en Cuencas No Aforadas (PUB, en inglés) (Sivapalan et al., 2003). PUB buscaba mejorar las capacidades de la comunidad científica para hacer predicciones en cuencas no aforadas. Entre los resultados de PUB está el reconocimiento de que la hidrología es una parte integral del ecosistema y que un enfoque holístico mejoraría el entendimiento de la organización

y el funcionamiento de las cuencas (Hrachowitz et al., 2013).

Kirchner (2003) y Sivapalan (2006) establecen que la dominancia de teorías a pequeña escala en la hidrología de cuenca limitan su habilidad para explicar el comportamiento de las cuencas. Por lo tanto, es necesario desarrollar una teoría unificadora que explique los procesos hidrológicos a diferentes escalas espaciales y temporales, así como a través de diferentes regiones hidroclimáticas. Esta teoría requiere de un sistema de clasificación que ayude a determinar similitudes y diferencias entre cuencas e identificar patrones útiles (Sivapalan, 2006). Este sistema de clasificación debería relacionar la estructura de la cuenca (geología, topografía, pedología y uso de suelo) y las características hidroclimáticas con la respuesta de la cuenca. Esta respuesta incluye partición, almacenamiento y liberación de agua (Wagener, Sivapalan, Troch, & Woods, 2007) y debe incluir los flujos superficiales y subterráneos, así como los tiempos de residencia, la edad y química del agua a distintas escalas espaciales y temporales (Sivapalan, 2006).

El aumento de la población en el mundo está causando cambios en el uso del suelo, de vegetación natural a agricultura, asentamientos humanos o industrias. Esto dispara cambios en el escurrimiento superficial, recarga de agua subterránea y la calidad del agua (Sivapalan et al., 2003). El cambio climático, la variabilidad climática y otros cambios globales inducen cambios en el

régimen hidrológico. Los países en desarrollo usualmente sufren significativamente los impactos del cambio en el clima y el uso del suelo, y además son las regiones con menos datos hidrológicos y menos redes de monitoreo. Esta combinación lleva a la depredación de los recursos hídricos y a la degradación de los ecosistemas (Sivapalan et al., 2003).

El estudio de los procesos hidrológicos debe no sólo considerar la compleja interacción entre el agua, el uso del suelo, la atmósfera y la sociedad; sino también la interrelación entre el agua superficial y el agua subterránea dentro del continuum hidrológico (Alley et al., 2006; H. H. G. Savenije, 2009; Sivapalan et al., 2003; Uhlenbrook, 2006; Winter, Rosenberry, & LaBaugh, 2003). Estas interacciones son esenciales para la gestión sostenible del agua. No considerar estas interacciones puede llevar a falsas estimaciones y conceptos erróneos e inadecuadas decisiones en el manejo de los recursos hídricos.

Aunque el impacto hidrológico de los bosques ha sido ampliamente investigado (e.g. Bruijnzeel, 2011), las diferencias en las condiciones climatológicas, pedológicas y fisiológicas entre las cuencas, causan diferentes respuestas a los cambios en el uso del suelo (Andréassian, 2004). El efecto del cambio del uso del suelo en Centroamérica no es claro (Kaimowitz, 2004). Las simulaciones de modelos se han enfocado mayormente en regiones donde la precipitación proviene de la evaporación que ocurre dentro del área de estudio, como en el caso de la cuenca del Amazonas. Sin embargo, este no es el caso de Centroamérica, donde la precipitación tiene un gran componente oceánico (Magaña et al., 1999). La investigación en Centroamérica muestra que no es probable que el cambio de uso de suelo sobre unos pocos miles de kilómetros cambie los patrones de precipitación (Bruijnzeel, 2004b). Sin embargo, a menor

escala, los cambios de uso de suelo que reducen la infiltración, aumentan la escorrentía superficial y los picos de flujo. En bosques tropicales nubosos de montaña, puede ocurrir lo opuesto, ya que el bosque puede capturar y reciclar la humedad (Bruijnzeel, 2004a). Además, la infiltración es favorecida por las raíces de los árboles y puede contribuir a recargar las fuentes de agua subterránea (Kaimowitz, 2004).

Los efectos de los cambios en el uso del suelo, resaltan la necesidad de tomar acciones en contra de la degradación de las cuencas en Centroamérica. En 1998, el Huracán Mitch causó 9000 víctimas y US\$ 6 billones en daños en Centroamérica. Después del desastre, la cooperación internacional y las agencias de gobierno atribuyeron la magnificación del desastre a la deforestación. Esto causó una oleada de iniciativas para atender este problema enfocándose en reforestación, conservación de suelo y defensa civil (Kaimowitz, 2004). Sin embargo, la mayoría de proyectos de gestión de cuencas dio atención insuficiente a la investigación y el monitoreo y fueron guiados más por ideas preconcebidas, en lugar de tratar de aprender a partir de la investigación. Este ejemplo resalta la necesidad de que la gestión de recursos hídricos en Centroamérica debe evolucionar de ser una respuesta inmediata a una crisis hacia la planificación y el monitoreo de largo plazo (Kaimowitz, 2004).

Retos hidrológicos en los trópicos húmedos

Los trópicos húmedos se ubican entre los 25° al norte y al sur de la línea ecuatorial e incluyen áreas donde la precipitación excede la evaporación al menos 270 días por año (Wohl et al., 2012). Estas regiones cubren un quinto de la superficie del planeta y producen el mayor volumen de escorrentía. Además sufren del mayor cambio en el uso del suelo por tala de bosques (FAO, 2010). La

hidrología de los trópicos húmedos difiere de la de otras regiones en la mayor cantidad de energía de entrada en forma de fluxes de vapor, precipitación más intensa, rápida degradación de la materia orgánica y el rápido movimiento de grandes volúmenes de agua y sedimento (Wohl et al., 2012). Además, las características de los suelos en los climas tropicales húmedos pueden diferir de los de clima templado debido a diferencias en el clima, la flora y la fauna (Minasny & Hartemink, 2011). Adicionalmente, la velocidad de cambios inducidos por el hombre es más rápida debido al crecimiento poblacional y los estreses socio-económicos (Wohl et al., 2012). No obstante, el entendimiento de los procesos hidrológicos en estas regiones es limitado y la transferencia de conocimiento hidrológico de otras regiones hidroclimáticas a regiones tropicales puede resultar desafiante debido a la diferencia en la intensidad y estacionalidad de la precipitación (Bonell, 1993), en adición a los patrones cíclicos de El Niño y La Niña (Bruijnzeel, 2004b).

Las predicciones de calidad y cantidad de agua requieren del entendimiento de procesos de generación de escorrentía (Bonell, 1998); y de acuerdo a Bonell y Bruijnzeel (2004) ha habido relativamente menos investigación en los climas tropicales comparada con los estudios detallados realizados en climas templados. Se espera que los procesos de generación de escorrentía en los trópicos difieran de los de climas templados debido a la fuerte intensidad y estacionalidad de la precipitación. La Figura 1 ejemplifica el mayor rango de descarga en los ríos de regiones tropicales comparados con los de regiones templadas.

La alta variabilidad espacial y temporal de la precipitación en las regiones tropicales puede llevar a periodos y áreas de alta variabilidad hidrológica. Además los procesos hidrológicos son altamente variables en espacio y tiempo y son gobernados por flujo

preferencial (Uhlenbrook, 2006). Por otra parte es necesario considerar las diferencias en escalas entre procesos que ocurren en el sistema de agua superficial y el sistema de agua subterránea. Los procesos que ocurren a nivel de arroyos, especialmente aquellos que ocurren en la zona hiporreica sufren ciclos estacionales y hasta ciclos diarios (Alley et al., 2002; Brunke & Gonser, 1997), mientras que los procesos en el agua subterránea tienen escalas temporales mucho mayores, de años, décadas y más (Alley et al., 2002).

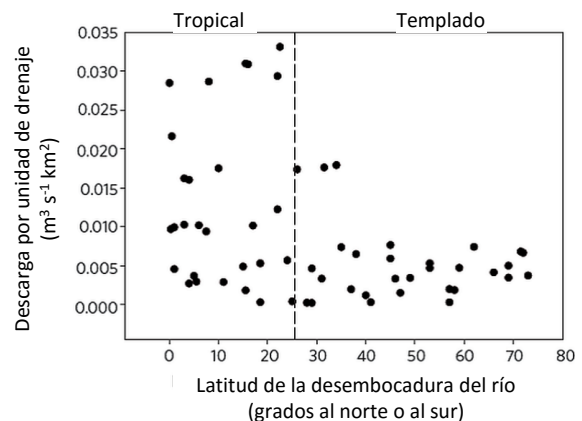


Fig. 1. Descarga promedio de los ríos como función de la ubicación de la desembocadura para regiones tropicales y templadas, tomado de Wohl et al. (2012) basado en datos de Herschy and Fairbridge (1998).

La rápida degradación y conversión de las áreas boscosas a otros usos de suelo en los trópicos húmedos están alterando el funcionamiento hidrológico de las cuencas (Bonell & Bruijnzeel, 2004; Elsenbeer, 2001; Uhlenbrook, 2007; Wohl et al., 2012). Los cambios de uso de suelo tienen influencia significativa en la hidrología local y regional (Costa, 2004). La naturaleza del impacto del cambio en el uso del suelo es agrupada en impactos en el suelo (e.g. Giertz et al., 2005, Diekkrüger and Hieppe 2012) e impactos en la calidad y cantidad de las aguas superficiales (e.g. Chavez et al., 2008, Germer et al., 2009, Masese et al., 2014). Estos impactos pueden resumirse como aumento de: escorrentía superficial, erosión,

sedimentación, flujo pico, entrada de nutrientes y químicos; y disminución en: la producción de agua, flujo base, recarga de agua subterránea y probablemente cambios en el régimen de precipitación a gran escala (Aylward, 2004).

Las futuras alteraciones de la hidrosfera tropical serán impulsadas por las necesidades de agua para suministro de agua dulce, agua para agricultura y agua para generación de energía. Esto subraya la importancia de entender los sistemas humano-naturales que determinarán el futuro de los ciclos hidrológicos en estas regiones (Lele, 2009). Esto está en línea con el concepto de socio-hidrología discutido por Sivapalan, Savenije, and Blöschl (2012), quienes establecen la necesidad de observar, entender y predecir la co-evolución de los sistemas humano-hídricos. Las características de las cuencas en los trópicos húmedos, junto con los registros hidrológicos usualmente incompletos o inexistentes, representan el mayor reto para las investigaciones hidrológicas y la adecuada gestión de los recursos hídricos.

Recursos Hídricos en Nicaragua El estado de la ciencia

Nicaragua tiene una extensión de 130 000 km² y oficialmente estaba dividida (hasta el 2015) en 21 áreas de cuenca principales, de las cuales 13 drenan al Caribe y 8 drenan al Océano Pacífico. Las cuencas en el lado del Caribe varían entre 1 500 km² y 30 000 km²; mientras que en el lado del Pacífico varían entre 274 km² y 3700 km². La cuenca del Río San Juan es la más grande e importante del país. Cubre aproximadamente 30 000 km² e incluye los dos lagos más grandes de Centroamérica: el Lago de Nicaragua, con un área aproximada de 8 200 km² y el Lago de Managua, el cual tiene una extensión aproximada de 1 040 km² (Castillo Hernández et al., 2006). Hay además numerosas lagunas cratéricas, algunas de las

cuales son usadas para abastecimiento de agua (*e.g.* Asososca) (Parello et al., 2008).

El mapeo hidrogeológico del país empezó durante los 1960s y 1970s (Castillo Hernández et al., 2006). Mapas hidrogeológicos e hidroquímicos (1: 250 000) fueron elaborados para la región del Pacífico por el Instituto de estudios Territoriales (INETER) (Krasny & Hecht, 1998). La región central del país ha sido mapeada (INETER, 2005); sin embargo, la hidrogeología de la región Atlántica no ha sido mapeada aún, pero se prevee que dicha labor empiece en el futuro próximo (Castillo Hernández et al., 2006).

Los recursos hídricos subterráneos más importantes del país se encuentran en la Costa Pacífica. La mayoría de ellos son acuíferos no confinados recargados por la precipitación. Los más importantes son los acuíferos de León-Chinandega, ubicado en la parte Noroeste del país en una de las regiones más densamente pobladas; y el acuífero de Managua, ubicado en la capital del país. Aunque se ha realizado muchos estudios en estos acuíferos (Bethune et al., 1996; Calderon & Bentley, 2007; Corriols et al., 2009; Cruz, 1997; Choza, 2002; Delgado Quezada, 2003; Johansson, Scharp, Alveteg, & Choza, 1999; Moncrieff, Bentley, & Palma, 2008), es difícil comparar las estimaciones de disponibilidad de agua subterránea debido a las disparidades en las metodologías usadas y las diferencias en la densidad espacial y temporal de los datos utilizados. Comúnmente en Nicaragua se utiliza un método empírico para determinar la recarga a partir de los datos promedios de precipitación y la capacidad de infiltración de los suelos (Schosinsky & Losilla, 2000). Este método fue desarrollado basado en los registros de precipitación de Costa Rica y aunque los autores sugieren que podría ser usado en otras áreas de Centroamérica con características climáticas similares, aún no se ha evaluado la incertidumbre asociada a la

extrapolación del método, y esta debe considerarse como significativa.

No obstante, las estimaciones de recursos hídricos en el Pacífico de Nicaragua indican una disponibilidad aproximada de 3×10^9 millones $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ (Castillo Hernández et al., 2006). Los reportes sobre agua subterránea en Nicaragua usualmente consideran que el aprovechamiento seguro es 50% de los recursos disponibles, ver por ejemplo las revisiones hechas por Castillo Hernández et al. (2006), GWP (2011) y Vammen et al. (2012). Sin embargo, la incertidumbre en las estimaciones de los fluxes y la simplificación en la aplicación del concepto de rendimiento seguro implican una amenaza para el uso sostenible de los recursos hídricos. El concepto de rendimiento seguro busca evitar las consecuencias negativas de la extracción de agua subterránea tales como agotamiento del caudal de los ríos, pérdida de humedales y ecosistemas ribereños. Sin embargo, no es suficiente considerar sólo la recarga natural para estimar el rendimiento seguro. Deben considerarse además los efectos dinámicos de la extracción de agua subterránea en el ambiente natural, la economía y la sociedad (Sophocleous, 2007; Zhou, 2009).

Adicionalmente, hay muchas debilidades en la estimación de los balances hídricos de cuencas. La evaporación es calculada a través del método de Thornthwaite modificado (Thornthwaite & Mather, 1957), y se asume que la diferencia entre la evaporación y la precipitación corresponde a la escorrentía. Este enfoque no considera explícitamente la interceptación, la cual puede ser especialmente importante en las cuencas boscosas (Bruijnzeel, 2004a; Savenije, 2004). La descarga del río usualmente no es usada como una entrada directa en el cálculo, ya que las estaciones de monitoreo son escasas y los datos son usualmente insuficientes o inciertos. Los datos climáticos raras veces están completos, o no cubren periodos suficientemente largos o no están disponibles

para el área de interés. Por lo tanto la extrapolación de datos es necesaria e introduce las incertidumbres asociadas.

Aunque el Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER) maneja la red hidrometeorológica del país, el número y distribución de las estaciones es aún insuficiente. El monitoreo de los niveles de agua subterránea fue interrumpido en 1979 debido a la guerra e inició nuevamente en 2003 para los principales acuíferos de la Costa Pacífica (Castillo Hernández et al., 2006). Sin embargo el monitoreo es hecho en su mayor parte de forma manual y la resolución temporal es pobre. Adicionalmente, hay 425 estaciones meteorológicas en el país, de las cuales 344 solamente registran precipitación y sólo 30 son telemétricas. Recuperado de webserver2.ineter.gob.ni/Direcciones/meteorologia/Red%20Meteorologica/antecedentes.htm. Esta situación resalta la necesidad de extender y mejorar las características de la red de monitoreo en el país. Esto mejoraría el nivel de la investigación científica y permitiría estimaciones más confiables de la disponibilidad de recursos hídricos, permitiendo mejores decisiones para la gestión de los mismos.

Los estudios de calidad de agua son más prolíficos que los estudios de hidrología física en Nicaragua. Esto es en parte debido a la significativamente mayor disponibilidad de recursos financieros y humanos. Los problemas de calidad de agua usualmente reciben la atención inmediata del público, las instituciones de gobierno y las agencias internacionales. Algunos ejemplos de este tipo de estudios son Hassan et al. (1981), Lacayo, Cruz, Calero, Lacayo, and Fomsgaard (1992), Calero, Fomsgaard, Lacayo, Martinez, y Rugama (1993), Carvalho et al. (1999), Castilho, Fenzl, Montenergo Guillén, and Nascimento (2000), Carvalho et al. (2003), Mendoza and Barmen (2006), Picado et al. (2010) and Scheibye et

al. (2014). Dentro de los principales problemas de calidad de agua en el país se hallan la contaminación difusa de las aguas superficiales y subterráneas por plaguicidas, arsénico de origen natural, la contaminación por mercurio causada por la minería artesanal y algunas industrias, aguas residuales, lixiviados de basureros y la sedimentación (Castillo Hernández et al., 2006; GWP, 2011; Vammen et al., 2012).

Los estudios de hidrología isotópica se han aplicado principalmente en los lagos de Nicaragua, Managua y en algunos reservorios de agua subterránea. Algunos ejemplos son Payne and Yurtsever (1974), Araguas (1992), Plata, Gonfiantini, and Lopez (1994), ARCAL XXI (1999), Parello et al., (2008) and INETER (2009). Las aplicaciones isotópicas a procesos hidrológicos son escasas. Algunos ejemplos son Corrales y Delgado (2009), Calderon y Flores (2011), Calderon and Uhlenbrook (2014) y Calderon et al., (in review).

Legislación hídrica y desarrollo

Nicaragua posee una Política Nacional de Recursos Hídricos establecida en el año 2001. Este instrumento proporciona las guías generales bajo las cuales los recursos hídricos nacionales deberían ser manejados. La política reconoce la naturaleza finita de los recursos hídricos, así como su valor económico, social y ambiental. Esta política ha estado en revisión desde el año 2010 (Calderon, 2010), en vista de los cambios en los fundamentos socio-políticos del país. La discusión busca actualizar la política de acuerdo a los nuevos valores filosóficos del gobierno que se reflejan en el Plan Nacional de Desarrollo Humano y en la Ley General de Aguas Nacionales (2007).

La Ley General de Aguas Nacionales (Ley No. 620) es notablemente moderna (2007). La ley creó la Autoridad Nacional de Agua, la cual fue establecida en el 2010. Esta

entidad tiene la responsabilidad de “manejar los recursos hídricos nacionales y sus bienes inherentes”. Algunas de las responsabilidades más importantes de esta entidad son la creación de una Plan Nacional de Recursos Hídricos y planes de gestión para cada una de las 21 áreas de cuenca del país. El primero es un plan general para establecer las prioridades de uso y protección de los recursos hídricos. El segundo son instrumentos específicos a ser aplicados en cada cuenca y deberían ser elaborados en forma participativa, incluyendo los actores locales y regionales. Sin embargo, aún no se han cumplido estas tareas, en parte debido a la limitación de recursos humanos y financieros.

Dentro de las características más notables de la ley está el reconocimiento del derecho humano al agua, el cual prima sobre cualquier otro uso. De acuerdo a una revisión elaborada por Vammen et al. (2012) cerca del 70% del consumo total de agua en Nicaragua es suplida por agua subterránea y el mayor uso del agua en Nicaragua es la agricultura (83%), seguida por la industria (14%) y el uso doméstico (3%). Sin embargo, esta información no incluye el uso para generación hidroeléctrica, el cual está volviéndose muy importante en el país. Actualmente, la mayor fuente de energía renovable es la geotérmica, seguida por la hidroeléctrica, eólica y biomasa. Las energías renovables suplen el 24% de la demanda. Se estima que para el 2020 cubrirán el 90% de la demanda. Recuperado de

[http://www.cndc.org.ni/graficos/graficaGeneracion Tipo TReal.php](http://www.cndc.org.ni/graficos/graficaGeneracionTipoTReal.php). Aunque la legislación hídrica requiere a los usuarios reportar los volúmenes de agua utilizados, aún hay serias dificultades para implementar esta particularidad de la ley. Por lo tanto, los volúmenes utilizados se desconocen.

Hidrología de cuencas y la gestión de los recursos hídricos

Centroamérica tiene una alta variabilidad climática a pesar de su relativamente pequeña extensión de unos 520 000 km² (Westerberg et al., 2014). Los desastres hídricos son frecuentes e incluyen inundaciones y sequías con terribles consecuencias como pérdida de vidas, daño a cosechas, deslizamientos, escasez para el suministro y para la generación de energía (George, Waylen, & Laporte, 1998; Waylen & Sadí Laporte, 1999). Aunque las características climáticas de la región han sido estudiadas (Amador, Alfaro, Izano, & Magaña, 2006; Castillo Hernández et al., 2006; Durán-Quesada, Reboita, & Gimeno, 2012; Hastenrath, 1967; Hidalgo et al., 2013; Magaña et al., 1999), hay pocos artículos hidrológicos publicados y revisados por pares. Algunos ejemplos son Genereux (2004), Mendoza, Ulriksen, Picado, y Dahlin (2008), Harmon et al. (2009), Westerberg et al. (2010), Caballero et al. (2013) and Macinnis-Ng, Flores, Müller, y Schwendenmann (2014). La escasez de literatura es en parte causada por el limitado acceso a datos hidrológicos adecuados, completos y de largo plazo.

Centroamérica ha sido identificada como un ‘punto crítico’ para cambio climático (Giorgi, 2006) y la costa del Pacífico de Nicaragua incrementará su vulnerabilidad a eventos climáticos extremos en el futuro (Hidalgo et al., 2013). Las predicciones de cambio climático para Centroamérica y el Caribe muestran un aumento de entre 2°C y 3°C en las temperaturas para mediados del siglo 21 y una disminución en las precipitaciones (Stocker et al., 2013). Las proyecciones regionales estiman disminución de entre 7% y 18% en la precipitación para Nicaragua (SICA, 2010). Las proyecciones globales indican una reducción entre 10% y 20% en la descarga de los ríos y la disponibilidad de agua para Nicaragua (Kundzewicz et al., 2008). El último reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático

(IPCC) (Stocker et al., 2013) establece que “es muy probable que para el 95% de los océanos del mundo, el aumento del nivel relativo del mar sea positivo”. El incremento en el nivel del mar afectará los humedales en Centroamérica. Los humedales tropicales secuestran carbono y ayudan a mitigar los efectos del cambio climático (Mitsch & Hernandez, 2013). Si el aumento del nivel del mar no es acompañado por una acreción vertical de sedimentos equivalente, los manglares y lagunas costeras desaparecerán debido a la inundación y la erosión. Consecuentemente, los servicios ambientales y socio-económicos de estos ecosistemas se perderán.

En Centroamérica, la investigación hidrológica y la evaluación de los recursos hídricos es obstaculizada por la falta de recursos humanos y financieros. El enfoque general para estudios de línea base de cuencas enfatiza el manejo forestal y de suelo mientras pocos recursos son destinados al análisis de los sistemas hídricos (Faustino & García, 2001; Faustino, Jiménez, & Kammerbauer, 2007). Ciertas características de la cuenca como el uso del suelo, factores socio-económicos y fuentes de contaminación puntual son investigadas más profundamente que los procesos hidrológicos. En la mayoría de los casos, las cuencas no son aforadas o los registros hidrometeorológicos están incompletos. Hay pocos ejemplos de estudios hidrológicos de largo plazo en la región centroamericana: Plan Trifinio, que cubre la cuenca transfronteriza del Río Lempa, compartida por Guatemala, Honduras y El Salvador y empezó en 1988 (Llort & Montufar, 2002); PROCUENCA, que cubría la cuenca transfronteriza del Río San Juan entre Nicaragua y Costa Rica y empezó en 1995 hasta 2004; el plan de gestión de recursos naturales para la cuenca de El Cajón en Honduras, que duró desde 1989 a 1991 (OEA, 1992); y PIMCHAS en Nicaragua (Orozco et al., 2008). Aunque

estos trabajos son valiosas fuentes de información, carecen de un análisis de procesos hidrológicos.

Se necesita un conocimiento científico más profundo sobre los recursos hídricos y su variabilidad en el tiempo y el espacio para crear planes de gestión de cuencas más efectivos y sostenibles. Este conocimiento está apenas empezando a desarrollarse en Centroamérica.

Todos estos retos resaltan la necesidad de mejorar la calidad de la investigación hidrológica en Centroamérica y Nicaragua. Esto tiene que comenzar con el mejoramiento de las redes hidrometeorológicas y el fortalecimiento de las capacidades científicas. Los estudios hidrológicos de largo plazo son necesarios, no sólo por razones científicas; sino también para el beneficio socio-económico y ambiental derivado de la gestión apropiada del agua basada en el conocimiento hidrológico.

Conclusiones

En Centroamérica, la investigación hidrológica y la evaluación de los recursos hídricos es obstaculizada por la falta de recursos humanos y financieros. La mayoría de las cuencas en la región no son aforadas o están pobremente aforadas. En Nicaragua y el resto de Centroamérica, es necesario extender y mejorar las características de la red de monitoreo hidrometeorológico. Esto mejoraría el nivel de la investigación científica y permitiría estimaciones más confiables de la disponibilidad de recursos hídricos en el país, permitiendo mejores decisiones para la gestión de los mismos. Así mismo, es necesario fortalecer las capacidades científicas. El enfoque de gestión de cuenca en Centroamérica enfatiza el manejo de suelo y forestal y descuida el estudio de procesos hidrológicos y el monitoreo hidrometeorológico. La vulnerabilidad de la región ante los eventos

climáticos extremos enfatiza la necesidad de que la gestión de recursos hídricos en Centroamérica debe evolucionar de ser una respuesta inmediata a una crisis hacia la planificación y el monitoreo de largo plazo. Los estudios hidrológicos de largo plazo son necesarios, no sólo por razones científicas; sino también para el beneficio socio-económico y ambiental derivado de la gestión apropiada del agua basada en el conocimiento hidrológico.

Referencias

- Alley, W. M., Healy, R. W., LaBaugh, J. W., & Reilly, T. E. (2002). Flow and Storage in Groundwater Systems. *Science*, 296(5575), 1985-1990. doi: 10.1126/science.1067123
- Alley, W. M., La Baugh, J. W., & Reilly, T. E. (2006). Groundwater as an Element in the Hydrological Cycle. In M. G. Anderson & J. J. McDonnell (Eds.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences* (pp. 1-12): John Wiley & Sons, Ltd.
- Amador, J. A., Alfaro, E. J., Lizano, O. G., & Magaña, V. O. (2006). Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4), 101-142. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.007>
- Andréassian, V. (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291(1-2), 1-27. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.015>
- Araguas, L. (1992). Estudio de Hidrología Isotópica de los Acuíferos de Managua (Study of the isotopic hydrology of the Managua aquifers): OIEA/INETER.

- Aylward, B. (2004). Land use, hydrological function and economic valuation. In M. Bonell & L. A. Bruijnzeel (Eds.), *Forests, water and people in the humid tropics: past, present and future hydrological research for integrated land and water management* (pp. 99-120). UK: Cambridge University Press.
- Bethune, D. N., Farvolden, R. N., Ryan, M. C., & Guzman, A. L. (1996). Industrial Contamination of a Municipal Water-Supply Lake by Induced Reversal of Ground-Water Flow, Managua, Nicaragua. *Ground Water*, 34(4), 699-708. doi: 10.1111/j.1745-6584.1996.tb02058.x
- Bonell, M. (1993). Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *Journal of Hydrology*, 150(2-4), 217-275. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90112-M](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(93)90112-M)
- Bonell, M. (1998). Selected challenges in runoff generation research in forests from hillslope to headwater drainage basin scale 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(4), 765-785. doi: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb01514.x
- Bonell, M., & Bruijnzeel, L. A. (2004). *Forests, water and people in the humid tropics: past, present and future hydrological research for integrated land and water management*. UK: Cambridge University Press.
- Bruijnzeel, L. A. (2004a). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(1), 185-228. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>
- Bruijnzeel, L. A. (2004b). Tropical montane cloud forest: a unique hydrological case. In M. Bonell & L. A. Bruijnzeel (Eds.), *Forests, water and people in the humid tropics: past, present and future hydrological research for integrated land and water management* (pp. 462-483). UK: Cambridge University Press.
- Bruijnzeel, L. A., Mulligan, M., & Scatena, F. N. (2011). Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns. *Hydrological Processes*, 25(3), 465-498. doi: 10.1002/hyp.7974
- Brunke, M., & Gonser, T. (1997). The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*, 37(1), 1-33.
- Caballero, L. A., Easton Zachary, M., Richards Brian, K., & Steenhuis Tammo, S. (2013). Evaluating the bio-hydrological impact of a cloud forest in Central America using a semi-distributed water balance model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(1), 9. doi: 10.2478/jhh-2013-0003
- Calderon, H. (2010). Dictamen científico técnico de la actual Política Nacional de los Recursos Hídricos (Scientific and technical analysis of the National Water Resources Policy) (pp. 28). Managua: National Water Authority.
- Calderon, H., & Bentley, L. R. (2007). A regional-scale groundwater flow model for the Leon-Chinandega aquifer, Nicaragua. *Hydrogeology Journal*, 15(8), 1457-1472.
- Calderon, H., & Flores, Y. (2011). Evaluación de la dinámica de la laguna de Apoyo mediante trazadores isotópicos y geoquímicos

- (Assessment of the dynamics of the Apoyo lake using isotopic and geochemical tracers). *Universidad y Ciencia*, 5(8), 22-26.
- Calderon, H., Flores, Y., Corriols, M., Sequeira, L., & Uhlenbrook, S. (in review). Integrating geophysical, tracer and hydrochemical data to conceptualize groundwater flow systems in a tropical coastal catchment. *Environmental Earth Sciences*.
- Calderon, H., & Uhlenbrook, S. (2014). Characterising the climatic water balance dynamics and different runoff components in a poorly gauged tropical forested catchment, Nicaragua. *Hydrological Sciences Journal*. doi: 10.1080/02626667.2014.964244
- Calero, S., Fomsgaard, I., Lacayo, M. L., Martinez, V., & Rugama, R. (1993). Toxaphene and Other Organochlorine Pesticides in Fish and Sediment from Lake Xolotlán, Nicaragua. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 53(4), 297-305. doi: 10.1080/03067319308044434
- Carvalho, F., Montenegro-Guillén, S., Villeneuve, J., Cattini, C., Bartocci, J., Lacayo, M., & Cruz, A. (1999). Chlorinated hydrocarbons in coastal lagoons of the Pacific Coast of Nicaragua. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 36(2), 132-139. doi: 10.1007/s002449900452
- Carvalho, F., Montenegro-Guillén, S., Villeneuve, J., Cattini, C., Tolosa, I., Bartocci, J., . . . Cruz-Granja, A. (2003). Toxaphene residues from cotton fields in soils and in the coastal environment of Nicaragua. *Chemosphere*, 53(6), 627-636.
- Castilho, J. A. A., Fenzl, N., Montenegro Guillén, S., & Nascimento, F. S. (2000). Organochlorine and organophosphorus pesticide residues in the Atoya river basin, Chinandega, Nicaragua. *Environmental Pollution*, 110(3), 523-533. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00277-8
- Castillo Hernández, E., Calderón Palma, H., Delgado Quezada, V., Flores Meza, Y., & Salvatierra Suárez, T. (2006). Situación de los recursos hídricos en Nicaragua. *Boletín Geológico y Minero*, 117(1), 127-146.
- Corrales, D., & Delgado, V. (2009). Estudio del Acuífero Aluvial del Valle de Estelí, Nicaragua (Study of the alluvial aquifer of the Esteli valley, Nicaragua) *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina (Isotopic hydrology studies in Latin America)* (pp. 232). Vienna, Austria: IAEA.
- Corriols, M., Nielsen, M. R., Dahlin, T., & Christensen, N. (2009). Aquifer investigations in the León-Chinandega plains, Nicaragua, using electromagnetic and electrical methods. *Near Surface Geophysics*, 7(5-6), 413-425.
- Costa, M. (2004). Large-scale hydrological impacts of tropical forest conversion. In M. Bonell & L. A. Bruijnzeel (Eds.), *Forests, water and people in the humid tropics: past, present and future hydrological research for integrated land and water management* (pp. 590-595). UK: Cambridge University Press.
- Cruz, O. (1997). *Modelaje del Acuífero de Managua y su Rendimiento Sostenible (Modeling of the Managua aquifer*

- and its safe yield*). Master thesis, Universidad de Costa Rica, San Jose.
- Choza, A. (2002). Elementos básicos para la protección de las aguas subterráneas aplicados en el acuífero de Managua, Nicaragua (Basic elements for the protection of groundwater applied to the Managua aquifer, Nicaragua). *Revista Geológica de América Central*, 1(27), 61-74.
- Delgado Quezada, V. (2003). *Groundwater flow system and water quality in a coastal plain aquifer in northwestern Nicaragua*. Master thesis, University of Calgary, Calgary.
- Diekkrüger, B., & Hiepe, C. (2012). The role of modeling for integrated water resource management. In H. Bormann & I. Althoff (Eds.), *Watershed Management and Rural Sanitation* (pp. 63-78). Siegen: Universität Siegen.
- Durán-Quesada, A. M., Reboita, M., & Gimeno, L. (2012). Precipitation in tropical America and the associated sources of moisture: a short review. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 612-624. doi: 10.1080/02626667.2012.673723
- Elsenbeer, H. (2001). Hydrologic flowpaths in tropical rainforest soilscapes—a review. *Hydrological Processes*, 15(10), 1751-1759. doi: 10.1002/hyp.237
- FAO. (2010). *Global Forest Resources Assessment 2010 Main Report*. Rome: FAO.
- Faustino, J., & García, S. (2001). Manejo de cuencas hidrográficas (Watershed management). *Conceptos, gestión, planificación, implementación y monitoreo*. San Salvador, El Salvador.
- Faustino, J., Jiménez, F., & Kammerbaeur, H. (2007). La cogestión de cuencas hidrográficas en América Central: Planteamiento conceptual y experiencias de implementación (Co-management of watersheds in Central America: Coceptual set up and implementation). *Turrialba, CR, CATIE/Asdi*.
- Genereux, D. (2004). Comparison of naturally-occurring chloride and oxygen-18 as tracers of interbasin groundwater transfer in lowland rainforest, Costa Rica. *Journal of Hydrology*, 295(1-4), 17-27. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.02.020>
- George, R. K., Waylen, P., & Laporte, S. (1998). Interannual variability of annual streamflow and the Southern Oscillation in Costa Rica. *Hydrological Sciences Journal*, 43(3), 409-424. doi: 10.1080/02626669809492135
- Giertz, S., Junge, B., & Diekkrüger, B. (2005). Assessing the effects of land use change on soil physical properties and hydrological processes in the sub-humid tropical environment of West Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30(8-10), 485-496. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2005.07.003>
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8), L08707. doi: 10.1029/2006gl025734
- GWP. (2011). Situación de los recursos hídricos en Centroamérica (State of the water resources in Central America) (pp. 143). Honduras.
- Harmon, R. S., Berry Lyons, W., Long, D. T., Ogden, F. L., Mitasova, H., Gardner, C. B., . . . Witherow, R. A. (2009). Geochemistry of four tropical

- montane watersheds, Central Panama. *Applied Geochemistry*, 24(4), 624-640.
- Hassan, A., Velasquez, E., Belmar, R., Coye, M., Drucker, E., Landrigan, P. J., . . . Sidel, K. B. (1981). Mercury poisoning in Nicaragua. *International Journal of Health Services*, 11(2), 221-226.
- Hastenrath, S. L. (1967). Rainfall distribution and regime in Central America. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 15(3), 201-241. doi: 10.1007/bf02243853
- Hersch, R. W., & Fairbridge, R. W. (1998). *Encyclopedia of hydrology and water resources* (Vol. 22): Springer.
- Hidalgo, H. G., Amador, J. A., Alfaro, E. J., & Quesada, B. (2013). Hydrological climate change projections for Central America. *Journal of Hydrology*, 495(0), 94-112. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.004>
- Hrachowitz, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G., McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Pomeroy, J. W., . . . Cudennec, C. (2013). A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review. *Hydrological Sciences Journal*, 1-58. doi: 10.1080/02626667.2013.803183
- INETER. (2005). Mapificación hidrogeológica e hidroquímica de la región central de Nicaragua (Hydrogeologic and hydrochemical mapping of the central region of Nicaragua). Managua: INETER.
- INETER. (2009). Caracterización hidrogeológica e isotópica del lago de Nicaragua (Hydrogeologic and isotopic characterization of Lake Nicaragua) (pp. 58). Managua: INETER.
- Johansson, P. O., Scharp, C., Alveteg, T., & Choza, A. (1999). Framework for Ground Water Protection - the Managua Ground Water System as an Example. *Ground Water*, 37(2), 204-213. doi: 10.1111/j.1745-6584.1999.tb00975.x
- Kaimowitz, D. (2004). Useful myths and intractable truths: the politics of the link between forests and water in Central America. In M. Bonell & L. A. Bruijnzeel (Eds.), *Forests, water and people in the humid tropics: past, present and future hydrological research for integrated land and water management* (pp. 86-98). UK: Cambridge University Press.
- Kirchner, J. W. (2003). A double paradox in catchment hydrology and geochemistry. *Hydrological Processes*, 17(4), 871-874. doi: 10.1002/hyp.5108
- Krasny, J., & Hecht, G. (1998). Estudios hidrogeológicos e hidroquímicos de la Región del Pacífico de Nicaragua (Hydrogeologic and hydrochemical studies of the Pacific Region of Nicaragua) (pp. 154). Managua: INETER.
- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., DÖLL, P., Jimenez, B., Miller, K., . . . Shiklomanov, I. (2008). The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 3-10. doi: 10.1623/hysj.53.1.3
- Lacayo, M., Cruz, A., Calero, S., Lacayo, J., & Fomsgaard, I. (1992). Total arsenic in water, fish, and sediments from Lake Xolotlán, Managua, Nicaragua. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*,

- 49(3), 463-470. doi: 10.1007/bf01239653
- Lele, S. (2009). Watershed services of tropical forests: from hydrology to economic valuation to integrated analysis. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(2), 148-155. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2009.10.007>
- Llort, M., & Montufar, J. (2002). El Plan Trifinio y la cuenca compartida del río Lempa de El Salvador, Guatemala y Honduras. *Secretaria Ejecutiva Trinacional, San Salvador, El Salvador*. p, 247-264.
- Macinnis-Ng, C. M. O., Flores, E. E., Müller, H., & Schwendenmann, L. (2014). Throughfall and stemflow vary seasonally in different land-use types in a lower montane tropical region of Panama. *Hydrological Processes*, 28(4), 2174-2184. doi: 10.1002/hyp.9754
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6), 1577-1588. doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<1577:tmdoma>2.0.co;2
- Mendoza, J. A., & Barmen, G. (2006). Assessment of groundwater vulnerability in the Río Artiguas basin, Nicaragua. *Environmental Geology*, 50(4), 569-580. doi: 10.1007/s00254-006-0233-1
- Mendoza, J. A., Ulriksen, P., Picado, F., & Dahlin, T. (2008). Aquifer interactions with a polluted mountain river of Nicaragua. *Hydrological Processes*, 22(13), 2264-2273. doi: 10.1002/hyp.6822
- Minasny, B., & Hartemink, A. E. (2011). Predicting soil properties in the tropics. *Earth-Science Reviews*, 106(1-2), 52-62. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.005>
- Mitsch, W. J., & Hernandez, M. E. (2013). Landscape and climate change threats to wetlands of North and Central America. *Aquatic Sciences*, 75(1), 133-149. doi: 10.1007/s00027-012-0262-7
- Moncrieff, J., Bentley, L., & Palma, H. (2008). Investigating pesticide transport in the León-Chinandega aquifer, Nicaragua. *Hydrogeology Journal*, 16(1), 183-197. doi: 10.1007/s10040-007-0229-2
- OEA, W., DC. (1992). Honduras: proyecto de manejo de los recursos naturales renovables de la Cuenca del Embalse El Cajón: estudio de factibilidad (Honduras: renewable resources management plan for the El Cajon watershed: factibility study).
- Orozco, P. P., Brown, S., Lantagne, S., Faustino, J., & ASDI, S. J. C., Turrialba. (2008). Proceso de planificación para el manejo, gestión y cogestión de la parte alta de la subcuenca del río Viejo, Nicaragua El caso del proyecto MARENA-PIMCHAS. *Seminario Internacional "Cogestión de Cuencas Hidrográficas Experiencias y Desafíos". Turrialba (Costa Rica). 14-16 Oct 2008.*
- Parelo, F., Aiuppa, A., Calderon, H., Calvi, F., Cellura, D., Martinez, V., . . . Vinti, D. (2008). Geochemical characterization of surface waters and groundwater resources in the Managua area (Nicaragua, Central America). *Applied Geochemistry*, 23(4), 914-931. doi:

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.08.006>
- <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.09.115>
- Payne, B., & Yurtsever, Y. (1974). Environmental isotopes as a hydrogeological tool in Nicaragua *IAEA-SM-182/19* (pp. 52): Department of Research and Isotopes, IAEA.
- Picado, F., Mendoza, A., Cuadra, S., Barmen, G., Jakobsson, K., & Bengtsson, G. (2010). Ecological, groundwater, and human health risk assessment in a mining region of Nicaragua. *Risk analysis*, 30(6), 916-933.
- Plata, A., Gonfiantini, R., & Lopez, A. (1994). Assessment of contamination risks of Asososca Lake (Nicaragua). *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 222, 177-188.
- PNUD, & OMM. (1972). Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano (Central American Hydrometeorological Project) (pp. 208). Costa Rica.
- Savenije, H. H. G. (2004). The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. *Hydrological Processes*, 18(8), 1507-1511. doi: 10.1002/hyp.5563
- Savenije, H. H. G. (2009). HESS Opinions "The art of hydrology"*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13(2), 157-161. doi: 10.5194/hess-13-157-2009
- Scheibye, K., Weisser, J., Borggaard, O. K., Larsen, M. M., Holm, P. E., Vammen, K., & Christensen, J. H. (2014). Sediment baseline study of levels and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in Lake Nicaragua. *Chemosphere*, 95(0), 556-565. doi:
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual (Analytical model to determine infiltration based on monthly precipitation). *Revista Geológica de América Central*, 23, 43-55.
- SICA. (2010). Estrategia regional de cambio climático (Regional strategy for climate change) (pp. 92). El Salvador: SICA.
- Singh, R., Archfield, S. A., & Wagener, T. (2014). Identifying dominant controls on hydrologic parameter transfer from gauged to ungauged catchments – A comparative hydrology approach. *Journal of Hydrology*, 517(0), 985-996. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.030>
- Sivapalan, M. (2006). Pattern, Process and Function: Elements of a Unified Theory of Hydrology at the Catchment Scale *Encyclopedia of Hydrological Sciences*: John Wiley & Sons, Ltd.
- Sivapalan, M., Savenije, H. H. G., & Blöschl, G. (2012). Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrological Processes*, 26(8), 1270-1276. doi: 10.1002/hyp.8426
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri, H., Lakshmi, V., . . . Zehe, E. (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 48(6), 857-880. doi: 10.1623/hysj.48.6.857.51421.
- Sophocleous, M. (2007). The Science and Practice of Environmental Flows and

- the Role of Hydrogeologists. *Ground Water*, 45(4), 393-401. doi: 10.1111/j.1745-6584.2007.00322.x
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., . . . Midgley, P. M. (2013). Climate change 2013: The physical science basis *Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5)* (pp. 1535). New York.
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in Climatology*, 10(3), 185-311.
- Uhlenbrook, S. (2006). Catchment hydrology—a science in which all processes are preferential. *Hydrological Processes*, 20(16), 3581-3585. doi: 10.1002/hyp.6564
- Uhlenbrook, S. (2007). Biofuel and water cycle dynamics: what are the related challenges for hydrological processes research? *Hydrological Processes*, 21(26), 3647-3650. doi: 10.1002/hyp.6901
- Vammen, K., Hurtado, I., Picado, F., Flores, Y., Calderón, H., Delgado, V., . . . Saenz, R. (2012). Recursos hídricos en Nicaragua: una visión estratégica (Water resources in Nicaragua: a strategic vision). In B. Cisneros & J. Tundisi (Eds.), *Diagnóstico del agua en las Américas* (pp. 359-403). Mexico: IANAS.
- Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P., & Woods, R. (2007). Catchment Classification and Hydrologic Similarity. *Geography Compass*, 1(4), 901-931. doi: 10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x
- Waylen, P., & Sadí Laporte, M. (1999). Flooding and the El Niño-Southern Oscillation phenomenon along the Pacific coast of Costa Rica. *Hydrological Processes*, 13(16), 2623-2638. doi: 10.1002/(sici)1099-1085(199911)13:16<2623::aid-hyp941>3.0.co;2-h
- Westerberg, I., Walther, A., Guerrero, J. L., Coello, Z., Halldin, S., Xu, C. Y., . . . Lundin, L. C. (2010). Precipitation data in a mountainous catchment in Honduras: quality assessment and spatiotemporal characteristics. *Theoretical and Applied Climatology*, 101(3-4), 381-396. doi: 10.1007/s00704-009-0222-x
- Westerberg, I. K., Gong, L., Beven, K. J., Seibert, J., Smedo, A., Xu, C. Y., & Halldin, S. (2014). Regional water balance modelling using flow-duration curves with observational uncertainties. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18(8), 2993-3013. doi: 10.5194/hess-18-2993-2014
- Winter, T. C., Rosenberry, D. O., & LaBaugh, J. W. (2003). Where Does the Ground Water in Small Watersheds Come From? *Ground Water*, 41(7), 989-1000. doi: 10.1111/j.1745-6584.2003.tb02440.x
- Wohl, E., Barros, A., Brunzell, N., Chappell, N. A., Coe, M., Giambelluca, T., . . . Ogden, F. (2012). The hydrology of the humid tropics. [10.1038/nclimate1556]. *Nature Clim. Change*, 2(9), 655-662.
- Zhou, Y. (2009). A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. *Journal of Hydrology*, 370(1-4), 207-213. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.009