**Cornisa:** Martínez-Yrízar et al. Ecosistemas terrestres: agua y nutrientes

**Análisis y perspectivas del estudio de los ecosistemas terrestres de México: dinámica hidrológica y flujos de nitrógeno y fósforo**

**Analysis and perspectives of the study of terrestrial ecosystem in Mexico: hydrological dynamics and fluxes of nitrogen and phosphorus**

Angelina Martínez-Yrízar1\*, Javier Álvarez-Sánchez2, Manuel Maass3

1Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 1354, Centro, Hermosillo, 83000, Sonora, México, [\*angelina@unam.mx](mailto:*angelina@unam.mx), 2Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior Universitario, UNAM-C.U., 04510, Ciudad de México, México, 3Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 27-3, Santa María de Guido, 58090, Morelia, Michoacán, México.

**Resumen**

Presentamos un diagnóstico del estado actual de conocimiento sobre la dinámica hidrológica y los almacenes y flujos nitrógeno y fósforo en los ecosistemas terrestres de México. Una revisión de la literatura en revistas indizadas de 1990 al 2016, arrojó 99 publicaciones, aproximadamente la mitad en cada tema, de colaboraciones entre 136 autores nacionales y 61 del extranjero; la mayoría en la última década. Un grupo reducido de sitios representativos de matorrales xerófilos, selvas bajas caducifolias y bosques templados y mesófilos han sido intensamente estudiados. Son escasos los trabajos con un enfoque integral; la mayoría abordan sólo algunos componentes de la dinámica hidrológica y nutrientes en interacción con factores abióticos; pocos los que estudian las interacciones agua-nutrientes. La mayoría son de corto plazo (<5 años), a escala de parcela, ladera o cuenca. La incorporación de metodologías más sofisticadas (e.g. isótopos estables, sensoría remota, “eddy covariance”) y el trabajo en redes nacionales han permitido fortalecer la investigación ecosistémica en México. Gradualmente se han mejorado las condiciones para abordar vacíos de información y las oportunidades de incidir en la toma de decisiones sobre la gestión del agua, protección de hábitats críticos para la provisión de servicios ambientales, la conservación y manejo de ecosistemas.

*Palabras clave* ecohidrología, partición de la precipitación, humedad del suelo, evapotranspiración, escorrentía, flujos, nutrientes.

**Abstract**

Here we summarize the current state of understanding of hydrological and nitrogen and phosphorus dynamics of terrestrial ecosystems in Mexico, based on a review of articles indexed in from 1990 to 2016. We found 99 papers, approximately half in hydrology and half in biogeochemistry, by 136 Mexican and 61 international scientists, whose collaboration has enriched our understanding of ecosystem functioning in Mexico; mostly published in the last decade. A small group of field sites from desert scrub, tropical dry forests and temperate and cloud forests have been intensively investigated. Research with an integrated approach are scarce, mostly analyzing one or a few components of the hydrological or nutrient cycling in relation to abiotic factors and fewer investigating water-nutrient interactions. Most of these studies are short-term (<5 years) and were conducted at plot, slope or watershed level. New methodologies (e.g., stable isotopes, remote sensing, eddy covariance towers) and collaborative research networks have substantially advanced ecosystem research in Mexico. Gradually, the ability to investigate research gaps of ecosystem function have improved the opportunities to inform decisions regarding water management, protection of critical habitats for the provision of ecosystem services, conservation and management of ecosystems.

*Key words* ecohydrology, precipitation partition, evapotranspiration, runoff, soil water content, fluxes, nutrients.

**Introducción**

La ecología como disciplina científica dentro de la biología surge del análisis de la relación entre los organismos y su ambiente. Inicialmente dominó una perspectiva desde los organismos individuales centrándose a estudiar y describir los mecanismos que han permitido el proceso evolutivo de las especies, incluyendo los factores que determinan la distribución y la abundancia de sus poblaciones; lo que denominamos genéricamente como la “historia natural” del mundo biológico. Con el surgimiento de la teoría de sistemas a comienzos del siglo pasado y su incorporación en la ecología varias décadas después, se comenzó a estudiar al fenómeno biológico a escalas por encima del individuo, identificando a los ecosistemas como la conformación de sistemas complejos integrados por agentes de corte biótico y abiótico interactuando en un espacio y tiempo determinados. En contraste con la ecología evolutiva, la ecología de ecosistemas centra su atención en los procesos funcionales a diferentes escalas de tiempo y espacio, mediante el análisis de sus bancos, balances y flujos internos de agua energía y nutrientes. Conforme se ha ido reconociendo la crisis ambiental de proporciones globales (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), ha sido ineludible entender procesos ecológicos a escalas mayores de los individuos, por lo que el dominio de la perspectiva analítico reduccionista de la biología evolutiva ha ido cediendo el paso a un enfoque más sistémico y funcional de los ecosistemas a escalas local, regional y global.

Los estudios de ecología de ecosistemas en México inician formalmente a principios de la década de los 80’s con estudios cuantitativos, principalmente sobre productividad primaria y ciclos de nutrientes en bosques tropicales y templados. La presencia de estaciones de campo en algunas de las áreas naturales protegidas de México, fue un detonador importante para impulsar los estudios sobre la ecología de los ecosistemas en el país. Inicialmente dominaron los estudios de carácter descriptivo o con modelos de simulación con poco respaldo de datos de campo. En la última década la difusión, innovación y adopción de nuevas tecnologías (isotopía estable, percepción remota, torres de flujos turbulentos, registradores automáticos de datos en tiempo real, enfoques filogenéticos, análisis de metadatos, entre otros) han permitido diseñar estudios que integran variables ambientales (temperatura, humedad, tipo de suelo, etc.) y analizan las interacciones (“feedbacks”) entre éstas y distintas variables fisiológicas (potenciales hídricos, conductancia estomática, respiración basal, etc.) o de rasgos funcionales de las plantas (densidad de madera, área foliar específica, hábito foliar, tamaño y forma de las plantas), logrando con ello una mejor aproximación a identificar los factores que regulan la dinámica del agua y los flujos de carbono y nutrientes en los ecosistemas.

El estudio de ecosistemas es por naturaleza multidisciplinario y grupal, por lo que el surgimiento de redes y programas multi-institucionales ha sido un elemento necesario y a la vez detonador de la investigación ecosistémica en México. Tal es el caso de la creación en México, en el 2004, de la Red Mexicana de Investigación Ecológica a largo plazo (Red Mex-LTER) como una iniciativa para consolidar la investigación sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas del país. La Red Mex-LTER que incluye 11 sitios representativos de distintos ecosistemas terrestres y acuáticos de México (Burgos et al., 2007; Maass et al., 2008). La investigación que se desarrolla en estos sitios aborda siete áreas temáticas con un enfoque de investigación socio-ambiental, lo que ha permitido fortalecer la investigación ecosistémica de largo plazo y crear una plataforma de bases de datos para la toma de decisiones (Jardel et al., 2013; Rivera-Monroy et al., 2008). A partir de entonces y hasta la publicación del libro “Capital Natural de México” en el 2008 por la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad CONABIO, los estudios de los procesos del funcionamiento de los ecosistemas seguían siendo escasos, no sólo en cuanto al tipo de ecosistemas de interés, sino también a las preguntas de investigación, objetivos y escalas espacio-temporales de estudio (Escobar et al., 2008). Así mismo, la conformación del Programa Mexicano del Carbono (PMC) en el 2005 (Vargas et al., 2012) y de las recientemente creadas redes nacionales de CONACYT han estimulado la investigación de corte ecosistémico en nuestro país. Esto se refleja en las publicaciones aparecidas en la última década, y en el que han aumentado el número de trabajos que analizan los patrones y procesos en una mayor variedad de tipos de ecosistemas en México, aunque el énfasis sigue siendo en la parte aérea del ecosistema y en el componente de plantas leñosas por ser el mayor reservorio de carbono de la vegetación. El funcionamiento del componente subterráneo, debido a las dificultades metodológicas asociadas al sistema radicular y el trabajo en el perfil del suelo, ha sido comparativamente, muy poco estudiado. En general, dada su complejidad, estudios integrales de los patrones y procesos del funcionamiento de los ecosistemas son aún escasos, no sólo en México, sino a nivel mundial.

El presente trabajo responde a la iniciativa de la Sociedad Científica Mexicana de Ecología (SCME) que en el 2014 organizó el simposio “La ecología en México: retos y perspectivas”. Este tipo de esfuerzos de recopilación de información y análisis del estado del arte en un campo de la ciencia es particularmente importante porque permite identificar temas que aún no han sido estudiados y estimular la investigación en el campo. Este esfuerzo complementa otros de interés similar, pero de carácter más amplio, como la revisión que presenta el libro recientemente publicado “Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México” (Balvanera et al., 2016) producto de un esfuerzo colectivo por parte de la Red de Ecosistemas (EcoRed) de CONACYT. El trabajo que aquí presentamos es un esfuerzo más acotado y enfocado a la investigación básica sobre la dinámica hidrológica y los almacenes y flujos de N y P en ecosistemas terrestres.

**Objetivos**

El objetivo del presente trabajo fue realizar un análisis del estado actual de conocimiento sobre los ecosistemas terrestres de México desde el punto de vista de su dinámica hidrológica y los almacenes y flujos de N y P, basada en una recopilación de la información disponible en la literatura científica en los últimos 25 años.

Los estudios relacionados con el ciclo de carbono en México, inherentemente vinculado a los ciclos de agua y nutrientes (Hastings et al., 2005; Vargas et al., 2012), han recibido un gran ímpetu desde la creación del Programa Mexicano del Carbono (PMC) en el 2005, que se establece con la misión de “coordinar a nivel nacional los esfuerzos de investigación relacionados con los aspectos físicos, geoquímicos, biológicos y sociales del ciclo del carbono” (<http://pmcarbono.org/pmc/>). Desde entonces, el PMC ha sido muy activo y ha generado cada año a partir del 2011, síntesis nacionales sobre el estado actual del conocimiento del ciclo del C en ecosistemas acuáticos y terrestres; documentos que se pueden consultar en línea.

Con base en nuestra revisión, presentamos primero una síntesis cuantitativa de la tendencia temporal del número de publicaciones en cada uno de estos dos temas. Hacemos una revisión de los ecosistemas y sitios estudiados, los objetivos de investigación en cada uno de los temas, de los aportes al conocimiento y de su aplicación para resolver problemas. Continuamos con un análisis del número y las instituciones académicas participantes en las publicaciones y de los programas de educación superior en México en los que se imparte el curso de Ecología de Ecosistemas y participan en la formación de recursos humanos en este campo. Concluimos señalando vacíos de conocimiento, retos y perspectivas de investigación sobre estos dos temas de la ecología de ecosistemas en México.

**Métodos**

La síntesis de información sobre la dinámica hidrológica y flujos de N y P está basada en una búsqueda de artículos científicos publicados en revistas indizadas incluidas en la base de datos ISI Web of Knowledge (<http://apps.isiknowledge.com>) y complementando la búsqueda en EBSCO EJS (<http://ejournals.ebsco.com/Login.asp>) para el periodo de 1990 al 2016. Estamos conscientes de la gran variedad de fuentes de información que existen (revistas no indizadas, libros, capítulos de libro, reportes y otras fuentes); sin embargo, limitamos la búsqueda a dichas bases de datos por ser de las más completas sobre artículos publicados en revistas indizadas a nivel internacional.

Realizamos la búsqueda usando las palabras clave ciclo hidrológico, ecohidrología, partición de la precipitación, evapotranspiración, escorrentía, lluvia, nitrógeno, fósforo, amonio, nitrato y México. Filtramos la búsqueda para excluir humedales, ecosistemas ribereños y costeros, agroecosistemas y plantaciones. Esto con el fin de centrar nuestro diagnóstico en los ecosistemas naturales terrestres de México, usando como criterio de selección el tipo de vegetación y la descripción de los sitios por los autores de cada estudio, así como el conocimiento propio de los sitios. La búsqueda arrojó un total de 99 artículos indizados (46 sobre la dinámica hidrológica y 53 sobre N y P).

Se capturó la información de cada publicación en una base de datos, para organizar los estudios y conocer la contribución de los trabajos por tema, por tipo de ecosistema, objetivos, variables analizadas, lugar, escala espacial y temporal de estudio, año de la publicación, nacionalidad de los autores e instituciones participantes. Para conocer los programas docentes y la contribución a la formación de recursos humanos se realizó una búsqueda en las bases de datos disponibles de las instituciones con mayor representación en los estudios de ecosistemas en México.

**Resultados y discusión**

*Estado actual del conocimiento sobre la dinámica hidrológica.* Como un importante antecedente al estado actual del conocimiento sobre el funcionamiento de los ecosistemas terrestres de México, fue el establecimiento de un proyecto a largo plazo, sobre la estructura y funcionamiento de ecosistemas tropicales secos, que realiza la UNAM desde comienzos de los años 1980 en su Estación de Biología Chamela, en la costa de Jalisco (Maass et. al., 2002; Sarukhán y Maass, 1990). En el marco de este proyecto se dieron los primeros estudios sobre aspectos generales de ecohidrología de la selva baja (Barradas y Fanjul, 1985) y de la hidrología del ecosistema (Cervantes et al., 1988; Maass, 1992; Vose y Maass, 1999). Paralelamente, se desarrollaron una diversidad de estudios de corte biogeoquímico (Campo et al., 1998, 2000, 2001; Davidson et al., 1991,1993; García-Oliva et al., 1994, 1995a, 1995b; García Méndez et al., 1991; Maass, 1995; Maass et al., 1988; Vitousek et al., 1989), y se realizaron las primeras de tesis de licenciatura y posgrado en estos temas. Una síntesis de estos trabajos pioneros, se pueden encontrar en Maass et al. (2002), Maass y Burgos (2011) y Jaramillo et al. (1995; 2011).

Desde entonces, la investigación ecosistémica se ha ido robusteciendo y apareciendo en diversos lugares de México, con estudios enmarcados desde una perspectiva ecohidrológica, que busca elucidar cómo los procesos hidrológicos tienen una influencia en la distribución, estructura y funcionamiento de los ecosistemas y cómo las respuestas de los procesos bióticos a su vez, por procesos de retroalimentación, impactan el ciclo hidrológico. Pero no fue sino hasta principios del 2010 que surgen un mayor número de publicaciones sobre la dinámica hidrológica (65% del total de publicaciones desde 1990), en más tipos de ecosistemas y sitios de estudio, con una tasa anual que no ha sido constante a través del tiempo y con dos máximos de producción, uno en el 2010 y otro en el 2015 (fig. 1a). Este mayor número de trabajos en los últimos años se relaciona principalmente con el uso de nuevas técnicas, como la aplicación de isótopos estables para analizar la partición de la precipitación y el uso de agua por las plantas y la técnica de covarianza de flujos turbulentos para el monitoreo continuo los flujos de vapor de agua y CO2 (Goldsmith et al., 2012; Vargas et al., 2013).

Del total de las 46 publicaciones indizadas que arrojó la búsqueda para el periodo 1990-2016, los ecosistemas con el mayor número de publicaciones son los matorrales desérticos y subtropicales (37% de los trabajos; fig. 2a), siguiéndoles de cerca los ecosistemas de alta montaña (en especial los bosques de pino, de encino y de pino-encino) (30% de los trabajos). Estos bosques junto con los bosques mesófilos de montaña (24%) representan a los bosques templados mejor estudiados desde la perspectiva ecohidrológica en México (fig. 2a). Los trabajos en las selvas bajas caducifolias representan el 20% de las publicaciones y en los pastizales, el 15%. Un solo estudio en la vegetación de mezquital analizó el uso de agua por las plantas para explicar la expansión de *Prosopis* sp. y sus consecuencias en el balance hídrico, en áreas donde históricamente predominaban los pastizales semiáridos en el norte de México (Brunel, 2009).

La mayor atención de los estudios hacia las zonas áridas y semiáridas del país (matorrales y selvas estacionales, juntos en el 57% de las publicaciones), se debe seguramente a que la interacción entre el agua y los ecosistemas es particularmente intensa en ecosistemas limitados por agua. En ellos, la disponibilidad de agua puede ser un factor limitante, y es crítica en los procesos del ecosistema no únicamente por su escasez, sino también porque en estas zonas es altamente variable e impredecible (Maass et al., 2002; Porporato y Rodríguez-Iturbide, 2002). Para estos ecosistemas ya se tiene un mejor conocimiento de la contribución de los componentes de la evapotranspiración (evaporación del suelo y transpiración) a la variación diaria y estacional de la misma (Robles-Morúa et al., 2012), así como de la influencia de la estacionalidad contrastante de la precipitación (Villarreal et al., 2016).

Respecto a los objetivos de investigación, la mayoría de los estudios se centran en la interacción procesos hidrológicos-suelo-vegetación, abordando uno o varios de sus componentes, para responder distintas preguntas. El 33% de los estudios analizan la interacción entre la partición de la lluvia (i.e., cómo se mueve y distribuye el agua en el ecosistema) y la estructura de la vegetación o los rasgos funcionales de las plantas y el uso de agua, con el fin de dilucidar los mecanismos y factores que influyen en dicha partición y aquellos que determinan el balance de agua del ecosistema (tabla1). En particular, se ha explorado la interacción entre los atributos del dosel y las plantas para diferenciar la contribución de la partición entre el escurrimiento por los tallos (“stemflow”) y el escurrimiento por el follaje (“throughfall”) y su influencia en la infiltración y la magnitud de la escorrentía superficial (Cantú y González-Rodríguez 2001; Gómez-Tagle et al., 2015; Ponette-González et al., 2010). Se ha encontrado que los valores de estos flujos varían considerablemente entre tipos de cobertura del suelo e intensidades de lluvia. Por ejemplo, Holwerda et al. (2010) reportan que la pérdida total aparente por interceptación (y que no atraviesa el dosel) fue del 17% de la lluvia anual en el bosque mesófilo maduro y 8% en el bosque secundario, debido a la mayor capacidad de almacenamiento de agua en el dosel y área foliar específica en el bosque maduro que en el secundario. Asimismo, Pérez-Suárez et al. (2014) encontraron que el agua interceptada y el escurrimiento por el follaje varía entre tipos de bosques en una microcuenca en la mesa central de San Luis Potosí, pero identificaron que eventos de lluvia mayores de 1.4 mm son necesarios para que ocurra escurrimiento. Otros estudios a nivel de especies, han analizado el papel de los rasgos funcionales (por ejemplo, la arquitectura de los árboles) en la partición de la precipitación y su influencia en la dinámica hidrológica del ecosistema, principalmente en los bosques templados y el matorral subtropical (Carlyle-Moses et al., 2004; Carlyle-Moses y Price 2007; Návar, 1993, 2011; Návar y Bryan, 1990) o la pérdida de agua por transpiración diurna y nocturna en bosques de niebla (Alvarado-Barrientos et al., 2015). Además, complementando con el uso de isótopos estables se ha podido rastrear la entrada de agua y el camino de la precipitación, el almacenamiento y la contribución al flujo en las plantas (Tarín et al., 2014). Esta técnica ha probado ser una herramienta útil para diferenciar el uso de distintas fuentes de agua (precipitación, niebla, agua en el suelo, arroyos, manto freático) y el movimiento de agua (entradas, flujos y almacenes) a través del paisaje (ecosistemas y a nivel de cuencas hidrográficas) revelando vínculos entre procesos ecohidrológicos en ecosistemas importantes de México (Goldsmith et al., 2012).

El 15% de los estudios han investigado los atributos hidrológicos y su influencia en procesos a distintas escalas (tabla 1). Por ejemplo, se ha investigado el efecto de la precipitación en el intercambio neto de CO2 y de vapor de agua en el ecosistema (Pérez-Ruíz et al., 2010; Verduzco et al., 2015), la relación entre la intercepción potencial de radiación solar y el contenido de agua del suelo a escala de cuenca (Galicia et al., 1999) y la relación entre NDVI y variables del balance hídrico a nivel del país (Mora e Inverson, 1998).

El 17% de los trabajos analizan las interacciones entre los procesos hidrológicos y la actividad de la vegetación (tabla 1). Esta aproximación ha permitido determinar cómo es que estas relaciones afectan el balance hídrico del ecosistema (Mora e Iverson, 1998; Vivoni, 2012) o validar/construir modelos basados en procesos hidrológicos (Ballinas et al., 2015; Carlyle-Moses y Price, 2007; Mendez-Barroso et al., 2014). Algunos de estos estudios han analizado a mayor escala el efecto de las anomalías climáticas como los eventos El Niño, la Oscilación Decadal del Pacífico, la Oscilación Multidecadal del Atlántico o la presencia del monzón de Norteamérica para explicar las variaciones en la evolución de la evapotranspiración y la partición de la precipitación en ecosistemas áridos y de alta montaña (Méndez-Barroso et al., 2009, 2010; Tang et al., 2012). Estos resultados provienen principalmente de estudios en el noroeste de México, fuertemente influenciado por el monzón de Norteamérica, fenómeno climatológico de gran escala que aporta entre el 40 y el 80% de la precipitación anual en solo tres meses durante el verano cada año en esta región del país (Robles-Morua et al., 2012).

Por su relevancia en el contexto de la vulnerabilidad de la disponibilidad de agua ante el cambio climático, como ya se mencionó, en los estudios sobre la dinámica hidrológica predomina el interés por documentar las interacciones entre variables ecohidrológicas, los cambios estacionales y las tendencias cíclicas de largo plazo. Se reconoce en los estudios que esta información es necesaria para entender los mecanismos por los cuales cambios en las fuerzas exógenas resultan en cambios de estado de los ecosistemas y, por lo tanto, en la cantidad de agua que fluye y la que queda disponible para el mantenimiento de sus funciones. A este respecto, Arredondo et al. (2016) a través de un experimento de manipulación de lluvia, mostraron que el pastizal semiárido tropical es tolerante a la sequía, pero sensible al legado de la precipitación previa de invierno en la productividad del siguiente verano.

Se ha avanzado en la validación de modelos analíticos a distintos niveles espaciales y su aplicabilidad a diferentes tipos de cobertura (Návar, 2013; Návar et al., 1999a; Návar et al., 1999b) o bien en la evaluación de los diseños de muestreo (Carlyle-Moses et al., 2004) y de estrategias metodológicas para el análisis más preciso de la dinámica hidrológica del ecosistema (Gebremichael y Barros, 2006; Vivoni et al., 2010; 11% de los trabajos, tabla 1). Este avance ha estado acompañado del uso de torres micrometeorológicas de flujos turbulentos (“Eddy covariance”), del apoyo de productos derivados de percepción remota o una combinación de ambos; técnicas presentes en el 30% de las publicaciones. El uso de índices derivados de percepción remota, ha probado ser una herramienta útil para escalar los procesos a nivel de cuenca, regional y de país (Gondwe et al., 2010; Mora e Iverson, 1998; Tang et al., 2012; Vivoni, 2012).

Las alteraciones de los componentes del flujo de agua asociadas al cambio de uso de suelo, la invasión de especies y la incidencia de disturbios como incendios y plagas son aspectos que han sido abordados en el 17% de los estudios sobre dinámica hidrológica en México (tabla 1). Un ejemplo de esto son los trabajos en el bosque mesófilo de montaña, que con la combinación de mediciones ecofisiológicas, micrometeorológicas, hidrológicas y el uso de isótopos estables han podido identificar con detalle el impacto hidrológico y las relaciones causales por la conversión del bosque a otros tipos de cobertura (Muñoz-Villers y McDonnell, 2013; Muñoz-Villers et al., 2015) o el tiempo necesario para la recuperación del comportamiento hidrológico original del bosque (Muñoz-Villers et al., 2012).

En los últimos 10 años, la aportación de los estudios sobre la dinámica hidrológica en México ha sido notable, tanto en la diversificación de los ecosistemas como en las localidades de estudio. No obstante, la investigación se ha realizado en pocos sitios selectos distribuidos en nueve estados de la república mexicana (fig. 3a). En Sonora, con el 28% de los trabajos, los ecosistemas áridos son los que han sido más estudiados, principalmente los ubicados en las cuencas del Rio Sonora y del Río San Miguel (Méndez-Barroso et al., 2010; Tarin et al., 2010; Vivoni et al., 2010). También en el noroeste de México, en el límite norte de la distribución de la selva baja caducifolia, se han descrito con detalle las tendencias de cambio estacional de la evapotranspiración y del intercambio de gases bajo la influencia del monzón (Pérez-Ruíz et al., 2010; Verduzco et al., 2015). Veracruz es el siguiente estado en importancia, con el 24% de los trabajos, principalmente en el Cofre de Perote en las montañas centrales del estado donde se distribuye el bosque mesófilo de montaña (fig. 3a). Para estos bosques se ha descrito el comportamiento de distintos componentes del flujo de agua, así como la influencia de factores topográficos y de distintos tipos de cobertura (coníferas vs. latifoliadas) en la entrada de agua al suelo, la interceptación de niebla, entre otros aspectos (Berry et al., 2016; Goldsmith et al., 2012; Holwerda et al., 2010; Muñoz-Villers et al. 2016). En Tamaulipas, con el 22% de las publicaciones, los estudios se han realizado principalmente en los encinares y bosques de pino y mixtos de pino-encino en las montañas y en el matorral tamaulipeco en la planicie costera del Golfo de México (Cantú-Silva y González-Rodríguez, 2001; Carlyle-Moses et al., 2004; Návar, 2011; Návar et al., 1999a). El estado de Jalisco con el 9% de las publicaciones sobresale por los estudios en la región de Chamela (Galicia et al., 1999; García-Oliva et al., 1995a, 1995b). Otros seis estados en el centro y sureste del país, están presentes en una o dos de las publicaciones (fig. 3a).

*Estado actual del conocimiento sobre los ciclos y almacenes de nitrógeno y fósforo.* Se ha desarrollado investigación básica sobre este tema en los ecosistemas terrestres de México para describir bancos y flujos de nutrientes, así como su variación temporal. Los estudios sobre estos aspectos de acuerdo a los criterios de búsqueda para esta revisión, comenzaron en 1991 con el estudio de las transformaciones de nitrógeno en la selva baja caducifolia de Chamela y las emisiones de óxido nítrico del suelo. Del total de las 53 publicaciones para el periodo 1990-2016 sobre los almacenes y ciclos de N y P, los años con más publicaciones han sido el 2008 y el 2015 (fig. 1b). El ciclo del N, considerando su mineralización, e incluso su inmovilización, es de estos dos nutrientes, el más conocido por ser el macronutriente más importante y limitante en muchos ecosistemas; 86% de los trabajos se refieren a aspectos del ciclo del N, mientras que 50% se refieren al ciclo del P. Se han estudiado bosques tropicales secos, lluviosos y de niebla, bosques templados, pastizales y matorrales xerófilos. Los ecosistemas más estudiados han sido la selva baja caducifolia que aparece en el 60% de las publicaciones, seguida de los pastizales con 25% de los trabajos (fig. 2b). Las razones de un mayor número de estudios en estos ecosistemas parecen coincidir con las mencionadas en el caso de los estudios de ecohidrología: los esfuerzos e intereses institucionales para conocer el funcionamiento de las selvas secas que por más tiempo se ha centrado en la región de Chamela y entender los efectos de la sequía y del cambio de uso de suelo, principalmente la conversión de la selva a pastizales (Jaramillo et al., 2011; Maass et al., 2002). Los bosques templados están representados en el 13% de los estudios, seguido por la selva alta perennifolia y los matorrales desérticos con poco menos del 10%, cada uno. Los bosques mesófilos de montaña están incluidos únicamente en el 4% de los estudios sobre N y P. Una aportación importante ha sido la publicación de un meta-análisis para el ciclo del C y el N en el bosque mesófilo y el bosque tropical perennifolio de baja altitud (Bejarano-Castillo et al., 2015).

En cuanto a los almacenes de N y P, a pesar de la importancia de conocer la magnitud de estos almacenes para caracterizar el funcionamiento de los ecosistemas, éstos han sido analizados en 32% y 9% de los estudios, respectivamente. El almacén más estudiado es el del suelo (Campos, 2010; García-Oliva et al., 2006; García-Méndez et al., 1991; Hughes et al.,1999; 2000; Jaramillo et al., 2003; Medina-Roldán et al., 2008; Saynes et al., 2005, entre otros), seguido del mantillo (Campo et al., 2007; Tobón et al., 2010). Datos de concentración de N y P en los tres componentes principales del flujo de nutrientes (hojarasca, mantillo y suelo) son muy escasos, excepto quizá por el de Campo et al. (2001) y Jaramillo et al. (2003).

Estudios enfocados al efecto de especies clave en los ciclos de nutrientes corresponden al 4% de los estudios realizados en México (tabla 2). Sobre este tema, se han reportado datos para especies de pino y abeto en los bosques templados cercanos a la Ciudad de México (Fenn et al., 1999; Pérez-Suárez et al., 2008), para *Lysiloma microphyllum* Benth. en selvas bajas de Huatla, Morelos (Cárdenas y Campo, 2007), para *Caesalpinia eriostachys* Benth. en la selva baja caducifolia de Chamela (Toledo-Aceves et al., 2008), para *Quercus* en Michoacán (Chávez-Bergara et al., 2015), y para *Astrocaryum mexicanum* Liebm., palma dominante en la selva lluviosa de Los Tuxtlas (Álvarez-Sánchez et al., 2016). A nivel de los compartimentos del ecosistema, otros estudios han analizado las variaciones estacionales de estos nutrientes en el mantillo y la hojarasca (Anaya et al., 2007; García-Oliva et al., 2006) y en el suelo (Montaño et al., 2007). El principal objetivo de estos trabajos ha sido entender los mecanismos que regulan o modifican los almacenes y flujos de N y P en el ecosistema. Un cambio importante de enfoque en los estudios sobre la dinámica de N y P ha sido el análisis de la eficiencia y proficiencia de reabsorción en el uso de los nutrientes en la selva baja caducifolia. Esto apunta a entender mejor el funcionamiento de dicho ecosistema en términos de los mecanismos de conservación de nutrientes en ambientes estacionalmente secos (Cárdenas y Campo, 2007; Rentería et al., 2005; Rentería y Jaramillo, 2011).

El análisis del flujo de nutrientes por vía del escurrimiento por el follaje y el escurrimiento por los tallos está representado en el 11% de los estudios (tabla 2). Entre éstos se encuentran, los trabajos en selva baja caducifolia (Maass et al., 2002; Das et al., 2011; Runyan et al., 2013), en los bosques de pino y oyamel (Pérez-Suárez et al., 2008) y en las selvas húmedas (Álvarez-Sánchez et al., 2016). Un trabajo pionero con un enfoque aplicado fue el de Fenn et al. (1999) en bosques de la Ciudad de México que analizó las implicaciones en los flujos por la contaminación en la ciudad.

En 9% de las publicaciones se ha estudiado la relación del N y P con la dinámica microbiana en el suelo (tabla 2) que sabemos es crucial en el ciclo de nutrientes. Para ecosistemas áridos se han estudiado las implicaciones de la actividad microbiana en las islas de fertilidad (Perroni-Ventura et al., 2006) y las costras biológicas del suelo (Sandoval-Pérez et al., 2016). Asimismo, ya se ha analizado en ecosistemas estacionales la estructura de la comunidad microbiana (Noguez et al., 2008) y estimado el N y el P microbiano (Campo et al., 1998; Galicia y García-Oliva, 2004; Chávez-Bergara et al., 2015). Recientemente, se han introducido enfoques novedosos en contribuciones muy interesantes relacionadas con aspectos filogenéticos y moleculares, al analizarse la actividad enzimática de la nitrogenasa en la caracterización de la comunidad microbiana (Falcón et al., 2007) y en la relación al N almacenado con rasgos filogenéticos de varias especies (Bhaskar et al., 2016).

Aunque es una preocupación general entender qué ocurre con el ciclaje del N y del P ante el cambio de uso del suelo a pastizales, potreros o cultivos, o por la fragmentación del hábitat, este tema está representando solo en el 15% de las publicaciones. Se ha incorporado también un enfoque experimental en el contexto del manejo de ecosistemas, en particular para determinar el efecto de la fertilización con N y P en parcelas de selva baja (Campo et al., 2012; Ceccon et al., 2002; Gamboa et al., 2010) y en bosques de niebla (Bejarano et al., 2014). Del total de los estudios publicados, 21% tuvieron como objetivo el manejo de ecosistemas (tabla 2).

Los estudios que analizan los cambios en el ciclo de nutrientes debido a disturbios naturales y antropogénicos representan el 15% de las publicaciones (tabla 2). Son un ejemplo, los estudios de Campos et al. (2007, 2012) en los bosques del Cofre de Perote en Veracruz, y los de García-Oliva et al. (2006) en las selvas estacionales de Chamela en Jalisco. Ahora entendemos mejor la vulnerabilidad de los bosques al cambio de uso de suelo a través de estudios también en el Cofre de Perote (Campos 2010; Campos et al., 2007, 2012), en la Sierra de Huatla (Valdespino et al., 2009), por la conversión del matorral desértico a pastizales en Sonora (Morales-Romero et al., 2015), y por la roza-tumba y quema en las selvas estacionales de Chamela (García-Oliva et al., 2006; Giardina et al., 2000; Jaramillo et al., 2003). La mayor parte de los estudios sobre N y P determinan la existencia de cambios estacionales en los almacenes de estos nutrientes por el disturbio antropogénico, pero su resiliencia es un tema que se ha explorado para la selva seca de Chamela integrando varios elementos de la dinámica del ecosistema (Gavito et al., 2015).

Por estado, los estudios en Jalisco, principalmente en la selva baja caducifolia, representan el 38% del total de los estudios publicados para México. Le siguen en importancia localidades en la Península de Yucatán, con estudios en Los Tuxtlas y el Cofre de Perote en Veracruz, con el 9% y 6% del total de las publicaciones, respectivamente. En los otros nueve estados, se han reportado uno o dos trabajos sobre almacenes y ciclos de N y P (fig. 3b) y la mayoría en sitios ubicados en las zonas áridas de cada estado.

*Aportes en la aplicación del conocimiento.* La presente revisión nos permitió identificar bajo los criterios de la búsqueda, varios trabajos que evalúan el efecto del cambio de uso de suelo en la dinámica hidrológica y ciclos de nutrientes. Como ya se mencionó, la mayoría de los trabajos (85%) fueron de investigación básica. Muchos estudios de corte más aplicado, son trabajos de tesis o han sido publicados como capítulos de libro, artículos en revistas nacionales o reportes, no menos importantes, pero que no formaron parte de los criterios de búsqueda. Por su enfoque de estudio, otros trabajos no incluidos en la presente revisión abordan aspectos como la problemática de uso de agua asociada al turismo en las zonas tropicales estacionales (Riensche et al., 2015), el papel de los ecosistemas en la provisión de servicios ecosistémicos (Balvanera et al., 2016), las relaciones entre variables biofísicas y socio-económicas para elucidar los vínculos entre la degradación de la tierra y el ciclo hidrológico a distintas escalas (Huber-Sannwald et al., 2006) o han incorporado el enfoque socioecosistémico en la política pública del país (Challenger et al., 2015). Estos son sólo algunos ejemplos de investigación aplicada que merece un análisis más completo, pero que va más allá del alcance del presente diagnóstico.

Estudios en la presente revisión de la literatura con el potencial de incidir en la aplicación del conocimiento incluyen el trabajo multidisciplinario de Gondwe et al. (2010) en la región de la Península de Yucatán (donde se ubica la Reserva de la Biosfera de Sian Ka´an) en el que, hacia una gestión adecuada del agua subterránea de la cual dependen los ecosistemas y la sociedad, combinó parámetros geofísicos y de percepción remota para determinar la recarga del acuífero (17% de la precipitación promedio anual) y las variaciones espaciales en la región de estudio. Otro trabajo es el de Návar (2015) que identificó los vínculos entre los periodos de sequía, la humedad del suelo y la incidencia de plagas de escarabajos descortezadores en áreas quemadas con un alto número de incendios en los bosques templados. Señala que la convergencia de estos vínculos con anomalías climáticas es crítica para tener un mejor entendimiento de la vulnerabilidad del bosque a estos disturbios e implementar mejores prácticas de manejo de estos bosques. A escala de cuenca, Muñoz-Villers et al. (2016) cuantificaron el tiempo de tránsito de la precipitación en una cuenca de bosque mesófilo de montaña, identificando las variables que influyen a sostener el flujo del caudal, bajo diferentes tipos de cobertura e intensidades de lluvia. Para la cuenca del Rio Conchos, Chihuahua, Reyes-Gómez et al. (2007) compararon la capacidad de infiltración y escorrentía entre suelos de bosque y de pastizal para determinar las áreas de recarga en la cuenca. En el caso del N y el P, solo se encontró un estudio en un potrero derivado de una selva húmeda, sobre los efectos de la manipulación de distintos tratamientos con miras a la restauración (Tobón el al., 2010). Pocos son los estudios con un enfoque experimental que hayan analizado el efecto de la fertilización con dichos nutrientes, para analizar los cambios en la calidad del mantillo y las repercusiones en el crecimiento de los árboles o en los almacenes de N y P en el suelo (Saynes et al., 2005; Campo et al., 2007).

*Entidades académicas participantes en las publicaciones de los estudios en México sobre ecohidrología y ciclos de N y P.* En los estudios sobre la dinámica hidrológica de los ecosistemas de México es notable la colaboración internacional que se ha dado entre las instituciones nacionales y del extranjero, tanto de Latinoamérica, como de Europa, Australia, Estados Unidos y Canadá, con un total de 18 instituciones mexicanas interactuando en colaboración con 29 del extranjero. Del total de las 47 instituciones representadas en las publicaciones, por su mayor contribución destacan siete instituciones mexicanas, principalmente la UNAM (35% de las publicaciones), y ocho del extranjero, principalmente la Universidad Estatal de Arizona y la Universidad de Toronto (17% de las publicaciones cada una; fig. 4a). De los 46 artículos, 16 no fueron publicados con participación internacional y 10 no incluyen la participación de instituciones mexicanas.

La incidencia institucional en el estudio de los ciclos del N y el P incluye la participación de 10 instituciones mexicanas y 15 del extranjero. Once de las 25 instituciones (fig. 4b) están presentes en más de una publicación. El trabajo está también dominado por la UNAM presente en 48 de las 53 publicaciones, seguida por el Colegio de Postgraduados (COLPOS) en el 15% de las publicaciones y el Instituto de Ecología A.C. (INECOL) en el 9% (fig. 4b). El resto de las instituciones mexicanas están representadas en muy 1-2 estudios. Del total de las publicaciones sobre N y P la mayoría de los trabajos (71%) son publicaciones de instituciones mexicanas que no incluyen la participación internacional, y únicamente 14 trabajos son en colaboración con las instituciones del extranjero, principalmente con el Consejo Superior de Investigaciones Científicas en España, la Universidad Estatal de Oregon y la Universidad de Stanford. Únicamente dos trabajos sobre N y P fueron publicados sin la participación de autores mexicanos.

*Programas docentes que imparten la materia de Ecología de Ecosistemas.* Los cursos de ecología de ecosistemas comenzaron a mediados de la década de 1980 cuando arrancó el Programa de Doctorado en Ecología coordinado por el entonces Centro de Ecología de la UNAM. Desde entonces se han ido incorporando poco a poco cursos y materias alineadas con este enfoque en el país, pero principalmente a nivel de posgrado. Un curso de Ecología de Ecosistemas a nivel de maestría y doctorado se ha impartido de manera ininterrumpida como materia optativa primero y ahora como obligatoria en el Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM desde 1990. Hasta donde sabemos, y quizá solo con excepción de la Licenciatura en Ecología de la Universidad Estatal de Sonora (UES) y la de Ingeniero en Recursos Agropecuarios del CUCSUR de la Universidad de Guadalajara, es raro que la materia de Ecología de Ecosistemas, con un contenido temático que abarque marcos conceptuales y todos los componentes del funcionamiento de los ecosistemas se incluya en los planes de estudios de las licenciaturas afines (como la de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias de la UNAM, o las carreras de Biología de la misma UNAM, de la Universidad Autónoma Metropolitana y de la Universidad de Sinaloa, entre otras), en las cuales a lo más que se llega es a impartir conocimientos básicos de ecología de ecosistemas dentro del programa general de la materia de “Ecología” o de un curso donde se combinan la ecología de comunidades y ecosistemas. Sin embargo, con el surgimiento de carreras más interdisciplinarias y multi-institucionales han ido apareciendo cursos claramente enmarcados en el paradigma ecosistémico (e.g. Hidrología y Energética de Ecosistemas, Biogeoquímica del Ecosistema, Manejo Integral de Ecosistemas, etc.) como en la Licenciatura en Ciencias Ambientales en el campus de la UNAM en Morelia con la participación de varios centros e institutos. Un número significativo de tesis de los posgrados en Ciencias Ambientales, Recursos Naturales y de Ciencias Biológicas de las instituciones con mayor número de trabajos en dos estos temas de la dinámica hidrológica y los flujos de N y P en los ecosistemas terrestres de México, han también aumentado en correspondencia con el mayor número de artículos publicados. Por ejemplo, tan solo en las bases disponibles en la UNAM, del IPICYT, INECOL y del Instituto Tecnológico de Sonora identificamos (solo por el título del trabajo) al menos 85 trabajos de tesis de sobre aspectos de hidrológica y biogeoquímica, bajo la asesoría de varios de los investigadores que aparecen como autores en las publicaciones de esta revisión y la mayoría de ellas generadas en los últimos 10 años. Dada la importancia del tema del agua, sobresale en los trabajos de ecohidrología, un vínculo con procesos de cambios de uso de suelo y con la provisión y calidad del agua. Sin embargo, la ecología de ecosistemas como disciplina aún requiere de mayor impulso en la formación de recursos humanos, a fin de atender el reducido número de expertos en México que, como lo señalan Vargas et al. (2012) trabajan con infraestructura y programas de monitoreo de largo plazo aún muy limitados.

**Conclusiones**

*Vacíos del conocimiento, retos y perspectivas en México.* Si bien existen estudios en los ecosistemas más representativos de México, no todos han sido estudiados con el mismo detalle, ni todos representados, considerando la enorme variedad de tipos de matorrales xerófilos, pastizales y bosques templados y tropicales, maduros y secundarios, en una variedad de ambientes que existen en el país.

Los siguientes son algunos aspectos generales que se desprenden de esta revisión de la bibliografía de trabajos de corte ecosistémico en México, limitada a los trabajos publicados en los últimos 25 años en revistas indizadas, sobre la dinámica hidrológica y del N y P en ecosistemas terrestres. Si bien, no es una revisión exhaustiva sobre el funcionamiento de los ecosistemas de México, nos ha permitido identificar las contribuciones de estos dos temas y sugerir algunas acciones para mejorar este campo de conocimiento en México.

1) La mayoría de los estudios analizan cambios estacionales. Sólo 13% de los estudios sobre la dinámica de N y P consideran una escala tres años o más. De los estudios de hidrología, (39%) han tenido una duración de mediciones en campo de 1 año, 26% de 2 años, 8% de 3 años, y 6% de 4 a 8 años. Dos estudios de percepción remota analizan el cambio en series tiempo mayores de 10 años. Dadas las fluctuaciones temporales de las variables de control (p.ej. humedad del suelo en escala desde horas a décadas) estos procesos requieren estudiarse a diferentes escalas de tiempo en un mayor número de sitios y ecosistemas que permitan comparar el comportamiento temporal y analizar la universalidad de los patrones y procesos observados.

2) Los estudios sobre N y P se han realizado principalmente a nivel de parcela o paisaje y solamente 9% a nivel de cuenca. De los estudios sobre la dinámica hidrológica, el 59% se han realizado a nivel de un sitio representativo del ecosistema de estudio, mismo que es intensamente monitoreado, o abarcando una mayor escala espacial con varios sitios distribuidos en una mayor área geográfica o en la parte alta de una cuenca. Ya que la escala espacial es también importante en el análisis de las interacciones clima-suelo-vegetación, falta aún en México ampliar este conocimiento a las escalas espaciales relevantes a estos procesos y en un mayor número de sitios y tipos de ecosistemas.

3) Es central determinar si los cambios en los almacenes de nutrientes determinan cambios en la biomasa aérea, lo cual se conoce sólo en acahuales derivados del desmonte de la selva alta perennifolia en Los Tuxtlas (Hughes et al., 2000), o de qué manera inciden en la modificación de rasgos de historia de vida de las plantas (Rentería y Jaramillo, 2011) que pudieran aumentar su resiliencia a condiciones de estrés (sequías, heladas, altas temperaturas, fuego y plagas). Es imprescindible aumentar los esfuerzos para conocer los almacenes de nutrientes asociados a la actividad estacional de las comunidades de microorganismos del suelo. Solo el 10% de los estudios determinó el C, el N o P microbiano. Este es un tema central considerando que un alto porcentaje del carbono de la planta se dirige al mantenimiento de la biomasa de estos organismos como bacterias y hongos micorrizógenos, los cuales son parte importante de los mecanismos de absorción de N y P en las plantas. La cuantificación a través de la fijación simbiótica y no simbiótica de N en los ecosistemas es un tema en progreso; como el estudio de González-Ruiz et al. (2008) sobre la dinámica de la nodulación y actividad de los nódulos en algunas especies de leguminosas de selva baja.

4) Es aún poco lo que sabemos sobre el papel de numerosas especies que por su abundancia o rasgos funcionales son clave en la partición de la precipitación, la entrada de agua al suelo o en la dinámica de los nutrientes. La importancia de estos atributos en la variabilidad espacial de la partición de la precipitación y la distribución de la humedad y de los nutrientes en el suelo es un tema que se reconoce falta aún por determinar en la mayoría de los ecosistemas terrestres de México. Esto constituye un reto enorme dada la enorme variabilidad que existe en estructura dentro y entre los mismos tipos de ecosistemas.

5) Sabemos poco sobre los umbrales de estrés inducidos por disturbios naturales y antropogénicos que lleven a los ecosistemas y/o sus procesos a otro estado. Si bien existen algunos trabajos sobre las alteraciones inducidas por actividades humanas a los ciclos de nutrientes por vía de la erosión del suelo (García Oliva et al., 1995a, 1995b) y ya se ha comenzado a investigar sobre lo que ocurre con los flujos y almacenes de N y P a través de la sucesión secundaria (Bhaskar et al., 2016), no hay estudios para la mayoría de los ecosistemas, ni que se haya analizado de manera integral.

6) Dada la intensa fragmentación del paisaje México por cambio de uso de suelo y la existencia de paisajes modificados formados por un complejo mosaico de pastizales y áreas de cultivo activos y abandonados, bosques secundarios y vegetación natural, se necesitan más estudios para documentar los cambios en los almacenes de nutrientes a través de estos paisajes, para evaluar el impacto de la fragmentación en los ciclos de nutrientes y el balance hídrico regional. Falta en general una mayor incorporación a los estudios del componente social como conductor de cambio de los ecosistemas.

7) Los trabajos en relación con el tema de cambio climático o de los eventos climáticos extremos son aún escasos. Dado el contexto climático de los estudios de ecohidrología, la mayoría de los trabajos plantea la urgente necesidad de conocer, para los diferentes tipos de ecosistema, los componentes del ciclo hidrológico en el balance de agua como información fundamental para predecir los impactos del cambio global. Sin embargo, no detectamos trabajos explícitamente diseñados para evaluar los impactos del cambio climático, excepto por un trabajo que analiza la respuesta de variables fisiológicas asociadas con el uso de agua de las plantas ante distintas condiciones ambientales, como una aproximación para evaluar la vulnerabilidad ambiental regional (Esperón-Rodríguez et al., 2015).

8) Enfrentamos aún el reto de estandarización de metodologías para el análisis de los procesos del funcionamiento de los ecosistemas. Como ya se mencionó, un primer esfuerzo ha sido el trabajo en redes nacionales, tanto de la Red Mex-LTER como el PMC, dentro de los cuales se busca que todos los sitios donde se desarrolla investigación de corte ecosistémico sean equipados siguiendo un mismo protocolo de medición para analizar el balance hídrico del ecosistema y que los datos sean comparables (Maass et al., 2010; Vargas et al., 2012, 2013); iniciativas que aún están en proceso de consolidarse. Asimismo, experimentos y modelación en un mayor número de ecosistemas, permitirán establecer predicciones o generalizaciones acerca del comportamiento de las variables y sus interacciones, y de cómo la importancia relativa de cada una varía entre sitios, a través del tiempo o en respuesta al manejo.

9) Finalmente, hay aún mucho camino por recorrer para que la información generada sobre el funcionamiento de los ecosistemas y el conocimiento que se tiene sobre las demandas de agua para el mantenimiento de sus procesos, sea utilizada en la toma de decisiones sobre gestión del agua, protección de hábitats críticos para la provisión de servicios ecosistémicos (captación de agua y regulación de inundaciones), y para el manejo y conservación de ecosistemas. Habrá que redoblar esfuerzos en la generación de información funcional de corte ecosistémico en el país, como una estrategia de investigación ante la urgente necesidad de atender la severa crisis ambiental que tenemos enfrente.

**Agradecimientos**

A Enriquena Bustamente por su apoyo en la preparación del manuscrito y a Víctor J. Jaramillo y Alberto Búrquez por sus valiosos comentarios para mejorar esta revisión.

**Referencias**

Alvarado-Barrientos, M. S., Holwerda, F., Geissert, D. R., Muñoz-Villers, L. E., Gotsch, S. G., Asbjornsen, H., et al. (2014). Nighttime transpiration in a seasonally dry tropical montane cloud forest environment. *Trees*, 29, 259–274.

Álvarez-Sánchez, J., Barajas-Guzmán, G., Campo, J. y León, R. (2016). Inorganic nitrogen and phosphorus in stemflow of the palm *Astrocaryum mexicanum* Liebm. located in Los Tuxtlas, Mexico. *Tropical Ecology, 57*, 45–55.

Anaya, C., García-Oliva, F. y Jaramillo, V. (2007). Rainfall and labile carbon availability control litter nitrogen dynamics in a tropical dry forest. *Oecologia, 150*, 602–610.

Arredondo, T., Garcia Moya, E., Huber-Sannwald, E., Loescher, H.W. Delgado-Balbuena, J. y Luna, M. (2016). Drought manipulation and its direct and legacy effect on productivity of a monodominant and mixed-species semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, *223*, 132-140.

Ballinas, M., Esperón-Rodríguez, M. y Barradas, V. L. (2015). Estimating evapotranspiration in the central mountain region of Veracruz, Mexico. *Bosque (Valdivia), 36*, 445–455.

Balvanera, P., Arias, E., Rodríguez Estrella, R., Almeida, L., Schmitter J. J. (Eds.) (2016). Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México, México: CONACYT y UNAM.

Barradas, V. L. y Fanjul, L. (1985). Equilibrio Hidrico y evapotranspiración en una selva baja caducifolia de la costa de Jalisco, Mexico. *Biotica, 10*, 199–210.

Bejarano, M., Etchevers, J., Ruíz-Suárez, G. y Campo J. (2014). The effects of increased N input on soil C and N dynamics in seasonally dry tropical forests: An experimental approach. *Applied Soil Ecology,* *73*, 105–115.

Bejarano-Castillo, M., Campo, J. y Roa-Fuentes, L. (2015). Effects of increased nitrogen availability on C and N cycles in tropical forests: a meta-analysis. *PLOS One*, *10,* e0144253.

Berry, Z.C., Gotsch, S., Holwerda, F., Muñoz-Villers, L.E. y Asbjornsen, H. (2016). Slope position influences vegetation-atmosphere interactions in a tropical montane cloud forest. *Agriculture and Forest Meteorology*, *221*, 207-228.

Bhaskar, R., Porder, S., Balvanera, P. y Edwards, E. J. (2016). Ecological and evolutionary variation in community nitrogen use traits during tropical dry forest secondary succession. *Ecology, 97,* 1194–1206.

Brunel, J. P. (2009). Sources of water used by natural mesquite vegetation in a semi-arid region of northern Mexico. *Hydrological Sciences Journal, 54*, 375–381.

Burgos, A., Maass, J.M., Ceballos, G., Equihua, M., Jardel, E., Medellín, R.A., et al. (2007). La Investigación Ecológica a Largo Plazo (LTER) y su proyección en México. *Ciencia y Desarrollo*, *33*, 24-31.

Campo, J., Jaramillo, V. y Maass, M. (1998). Pulses of soil phosphorus availability in a Mexican tropical dry forest: effects of seasonality and level of wetting. *Oecologia*, 115, 167–172.

Campo, J., Maass, J.M., Jaramillo, V. y Martínez-Yrízar, A. (2000). Calcium, potassium and magnesium cycling in a Mexican tropical dry forest ecosystem. *Biogeochemistry*, *49*, 21-36.

Campo J., Maass M., Jaramillo V., Martínez-Yrízar, A. y Sarukhán, J. (2001). Phosphorus cycling in a Mexican tropical dry forest ecosystem. *Biogeochemistry, 53*, 161–179.

Campo, J., Solís, E. y Valencia, M. (2007). Litter N and P dynamics in two secondary tropical dry forests after relaxation of nutrient availability constraints. *Forest Ecology and Management, 252*, 33–40.

Campo, J., Solís, E. y Gallardo, J.F. (2012). The effects of nutrient shortage on the growth of dominant tree species in secondary tropical forests (southeastern Mexico). *Journal of Tropical Forest Science*, *24*, 419 – 426.

Campos, A. (2010). Response of Soil Inorganic Nitrogen to Land Use and Topographic position in the Cofre de Perote Volcano (Mexico). *Environmental Management, 46*, 213–224.

Campos, A., Oleschko, K., Etchevers, J. y Hidalgo, C. (2007). Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico). *Forest Ecology and Management, 248*, 174–182.

Campos, A., Etchevers, J., Oleschko, K. y Hidalgo, C. (2012). Soil microbial biomass and nitrogen mineralization rates along an altitudinal gradient on the Cofre de Perote Volcano (Mexico): the importance of landscape position and land use. *Land Degradation and Development, 25*, 581–593.

Cantú Silva, I. y González Rodríguez, H. (2001). Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico. *Tree Physiology, 21*, 1009–1013.

Cárdenas, I. y Campo, J. (2007). Foliar nitrogen and phosphorus resorption and decomposition in the nitrogen-­fixing tree *Lysiloma microphyllum* in primary and secondary seasonally tropical dry forests in Mexico. *Journal of Tropical Ecology, 23*, 107–113.

Carlyle-Moses, D. E. (2004). Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid Environments*, *58*, 181–202.

Carlyle-Moses, D. E. y Price, A. G. (2007). Modelling canopy interception loss from a Madrean pine-oak stand, Northeastern Mexico. *Hidrological Processes, 21*, 2572–2580.

Ceccon, E., Sánchez, S. y Campo, J. (2002). Tree seedling dynamics in two abandoned tropical dry forests of differing successional status in Yucatán, Mexico: a field experiment with N and P fertilization. *Plant Ecology, 170*, 277–285.

Cervantes, L., Maass, J.M. y Domínguez, R. (1988). Relación lluvia-escurrimiento en un sistema pequeño de cuencas de selva baja caducifolia. *Ingeniería Hidráulica en México*. *Segunda época*, *III*, 30-42.

Challenger, A., Bocco, G., Equihua, M., Lazos-Chavero., E. y Maass, J.M. (2015) La aplicación del concepto del Sistema Socio-ecológico: alcances, posibilidades y limitaciones en la gestión ambiental de México. *Investigación Ambiental y Política Pública*, 6, 1-21.

Chávez-Bergara, B., Rosales-Castillo, A., Merino, A., Vázquez-Marrufo, G., Oyama, K. y García-Oliva, F. (2015). *Quercus* species control nutrients dynamics by determining the composition and activity of the forest floor fungal community. *Soil Biology and Biochemistry,* *98*, 186–195.

Das, R., Lawrence, D., D’Odorico, P. y DeLonge, M. (2011). Impact of land use change on atmospheric P inputs in a tropical dry forest. *Journal of Geophysical Research*, *116*, G01027, 1-9.

Davidson, E. A., Matson, P. A., Vitousek, P., Riley, R., Dunkin, K., García-Méndez, G., et al. (1993). Process regulation of soil emission of NO and N2O in a seasonally dry tropical forest. *Ecology*,*74*, 130-139.

Davidson, E. A., Vitousek, P., Matson, P. A., Riley, R., García-Méndez, G., Maass, J. M., et al. (1991). Soil emissions of nitric oxide in a seasonally dry tropical forest of Mexico. *Journal of Geophysical Research, 96*, 15439-15445.

Esperón-Rodríguez, M. y Barradas, V. L. (2015). Comparing environmental vulnerability in the montane cloud forest of eastern Mexico: A vulnerability index. *Ecological Indicators, 52*, 300–310.

Escobar, E., Maass, M., Alcocer, J., Azpra, E., Falcón, L., Gallegos, A., et al. (2008). Diversidad de procesos funcionales en los ecosistemas. En: *Capital Natural de México. Vol. I: Conocimiento Actual de la Biodiversidad* (pp. 161–189). México: CONABIO.

Falcón, L., Cerritos, R., Eguiarte, L. y Souza, V. (2007). Nitrogen fixation in microbial mat and stromatolite communities from Cuatro Ciénegas, Mexico. *Microbial Ecology,* *54*, 363–373.

Fenn, M.E., De Bauer, Ll., Quevedo-Nolasco, A. y Rodríguez-Frausto, C. (1991). Nitrogen and sulfur deposition and forest nutrient status in the Valley of Mexico. *Water Air and Soil Pollution*, *113*, 155-174.

Galicia, L., López-Blanco, J., Zarco-Arista, A., Filips, V. y Garcı́a-Oliva, F. (1999). The relationship between solar radiation interception and soil water content in a tropical deciduous forest in Mexico. *Catena, 36*, 153–164.

Galicia, L. y García-Oliva, F. (2004). The effects of C, N and P addition on soil microbial activity under two remnant tree species in a tropical seasonal pasture. *Applied Soil Ecology,* *26*, 31–39.

Gamboa, A.M., Hidalgo, C., De León, F., Etchevers, J., Gallardo, J.F. y Campo, J. (2010). Nutrient addition differentially affects soil carbon sequestration in secondary tropical dry forests: Early- vs. late-succession stages. *Restoration Ecology*, *18*, 252 – 260.

García-Méndez, G., Maass, J.M., Matson, P.A. y Vitousek, P. (1991). Nitrogen transformations and nitrous-oxide flux in a tropical deciduous forest in Mexico. *Oecologia*, 88, 362-366.

García-Oliva, F., Casar, I., Morales, P. y Maass, J.M. (1994). Forest-to-pasture conversion influences on soil carbon dynamics in a Tropical Deciduous Forest. *Oecologia*, *99*, 392-396.

García-Oliva, F., Maass, J.M. y Galicia, L. (1995a). Rainstorm Analysis and Rainfall Erosivity of a Seasonal Tropical Region with a Strong Cyclonic Influence in the Pacific Coast of Mexico. *Journal of Applied Meteorology*, *34*, 2491-2498**.**

García-Oliva, F., Martínez, R. y Maass, J.M. (1995b). Long-term net soil erosion as determined by Cs-137 redistribution in a natural and perturbed tropical deciduous forest ecosystem. *Geoderma*, *68*, 135-147.

García-Oliva, F., Gallardo, J. y Montaño, N. (2006). Soil Carbon and nitrogen dynamics followed by a forest-to-pasture conversion in western Mexico. *Agroforestry Systems, 66*, 93–100.

Gavito, M. E., Martínez-Yrizar, A., Ahedo, R., Araiza, S., Ayala, B., Ayala, R., et al. (2014). La vulnerabilidad del socio-ecosistema de bosque tropical seco de Chamela, Jalisco, al cambio global: un análisis de sus componentes ecológicos y sociales. *Investigación Ambiental Ciencia y Política Pública*, *6*, 109-126.

Gebremichael, M. y Barros, A. P. (2006). Evaluation of MODIS Gross Primary Productivity (GPP) in tropical monsoon regions. *Remote Sensing of Environment*, *100*, 150–166.

Giardina, C. P., Sanford, Jr. R. L., Døckersmith, I. C. (2000). Changes in Soil Phosphorus and Nitrogen During Slash-and-Burn Clearing of a Dry Tropical Forest. *Soil Science Society of American Journal* *64*, 399–405.

Goldsmith, G. R., Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Mcdonnell, J. J., Asbjornsen, H. y Dawson, T. E. (2012). Stable isotopes reveal linkages among ecohydrological processes in a seasonally dry tropical montane cloud forest. *Ecohydrology*, *5*(6), 779–790.

Gómez-Tagle Ch, A., Gómez-Tagle R, A. F., Ávila O, J. A. y Bruijnzeel, L. A. (2015). Partición de la precipitación en un bosque tropical montano de pino-encino en el centro de México. *Bosque* (Valdivia), *36*, 505–518.

Gondwe, B. R. N., Lerer, S., Stisen, S., Marín, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G., et al. (2010). Hydrogeology of the south-eastern Yucatan Peninsula: New insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing. *Journal of Hydrology*, *389*, 1–17.

González-Ruiz, T., Jaramillo, V.J., Peña-Cabriales, J.J. y Flores, A. (2008). Nodulation dynamics and nodule activity in leguminous tree species of a Mexican tropical dry forest. *Journal of Tropical Ecology*, *24*,107-110.

Hastings, S. J., Oechel, W.C. y Muhlia-Melo, A. (2005). Diurnal, seasonal and annual variation in the net ecosystem CO2 exchange of a desert shrub community (Sarcocaulescent) in Baja California, Mexico. *Global Change Biology, 11*, 927–939.

Holwerda, F., Bruijnzeel, L. A., Muñoz-Villers, L. E., Equihua, M. y Asbjornsen, H. (2010). Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forests of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, *384*, 84–96.

Huber-Sannwald, E., Maestre, F. T, Herrick J. E. y Reynolds, J. F. (2006). Ecohydrological feedbacks and linkages associated with land degradation: a case study from Mexico. *Hydrological Process*, *20*, 3395–3411.

Hughes, R. F., Kauffman, J. y Jaramillo, V. (1999). Biomass, carbon and nutrient dynamics of secondary forest in a humid tropical region of Mexico. *Ecology,* *80*, 1892–1907.

Hughes, R. F., Kauffman, J. y Jaramillo, V. (2000). Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico. *Ecological Application,* *10*, 515–527.

Jaramillo, V., Kauffman, J.B., Rentería–Rodríguez, L., Cummings, D.L. y Ellingson, L.J. (2003). Biomass, Carbon, and nitrogen pools in Mexican tropical dry forest landscapes*. Ecosystems*, *6*, 609–629.

Jaramillo, V., Martínez-Yrízar, A. y Sanford, R.L. Jr. (2011). Primary productivity and biogeochemistry of primary and secondary Tropical Dry Forests. En R. Dirzo, H. Young, H. A. Mooney y G. Ceballos (Eds.), *Seasonally Dry Tropical Forests: Ecology and Conservation* (pp. 109–128). Washington, D. C.: Island Press.

Jardel, E., Maass, J.M. y Rivera-Monroy, V.H. (Eds.) (2013). *Investigación Ecológica a Largo Plazo en México.* Ciudad de México, México: Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.

Maass, J.M. (1992). The use of litter–mulch to reduce erosion on hilly land in Mexico. En H. Hurni y K. Tato (Eds.), *Erosion, conservation and small-scale farming* (pp. 383–391). Geographisca Bernensia, International Soil Conservation Organization (ISCO) and World Ass. of Soil and Water Conservation (WASWC).

Maass, J. M. (1995). Tropical deciduous forest conversion to pasture and agriculture. En S. H. Bullock, H. A. Mooney y E. Medina (Eds.), *Seasonally Dry Tropical Forests* (pp. 399–422). Cambridge: Cambridge University Press.

Maass, J.M., Jordan, C. y Sarukhán, J. (1988). Soil erosion and nutrient losses in seasonal tropical agroecosystems under various management techniques. *Journal of Applied Ecology***,** *25*, 595–607.

Maass, J.M, Jaramillo, V., Martínez-Yrízar, A., García-Oliva, F., Pérez-Jiménez, A. y Sarukhán, J. (2002). Aspectos funcionales del ecosistema de selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco. En F. A. Noguera, J. H. Vega-Rivera, A. N. García-Aldrete y M. Quezada-Avendaño(Eds.),*Historia Natural de Chamela* (pp. 525–542). Ciudad de México, México: Instituto de Biología, UNAM.

Maass, M., Equihua, M. y Jardel, E. (2008). La Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo. Editores invitados para el número especial. *Ciencia y Desarrollo*, *34* (215).

Maass, J.M. y Burgos, A. (2011). Water Dynamics at the Ecosystem Level in Tropical Dry Forests. En R. Dirzo, H. Young, H. A. Mooney y G. Ceballos (Eds), *Seasonally Dry Tropical Forests: Ecology and Conservation* (pp. 141-156). Washington, D. C.: Island Press.

Maass, M., Díaz-Delgado, R., Balvanera, P., Castillo, A. y Martínez-Yrízar, A. (2010). Redes de investigación ecológica y socio-ecológica a largo plazo (LTER y LTSER) en Iberoamérica: los casos de México y España. *Revista Chilena de Historia Natural, 83*, 171–184.

Medina-Roldán, E., Arredondo, T., Huber-Sannwald, E., Chapa-Vargas, L. y Olalde, V. (2008). Grazing effects on fungal root symbionts and carbon and nitrogen storage in a shortgrass steppe in Central Mexico. *Journal of Arid Environments,* *72*, 546–556.

Méndez-Barroso, L. A., y Vivoni, E. R. (2010). Observed shifts in land surface conditions during the North American Monsoon: Implications for a vegetation-rainfall feedback mechanism. *Journal of Arid Environments*, *74*, 549–555.

Méndez-Barroso, L. A., Vivoni, E. R., Robles-Morua, A., Mascaro, G., Yépez, E. A., Rodríguez, J. C., et al. (2014). A modeling approach reveals differences in evapotranspiration and its partitioning in two semiarid ecosystems in Northwest Mexico. *Water Resources Research*, *50*, 3229–3252.

Méndez-Barroso, L. A., Vivoni, E. R., Watts, C. J. y Rodríguez, J. C. (2009). Seasonal and interannual relations between precipitation, surface soil moisture and vegetation dynamics in the North American monsoon region. *Journal of Hydrology*, *377*, 59–70.

Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, D.C.: Island Press.

Montaño, N., García-Oliva, F. y Jaramillo, V. (2007). Dissolved organic carbon affects soil microbial activity and nitrogen dynamics in a Mexican tropical deciduous forest. *Plant and Soil,* *295*, 265–277.

Mora, F. y Iverson, L. R. (1998). On the sources of vegetation activity variation, and their relation with water balance in Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, *19*, 1843–1871.

Morales-Romero, D., Campo, J., Godínez-Álvarez, H. y Molina-Freaner, F. (2015). Soil carbon, nitrogen and phosphorus change from conversions of thornscrub to buffelgrass pasture in northwestern Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 199*, 231–237.

Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Gómez-Cárdenas, M., Equihua, M., Asbjornsen, H.,Bruijnzeel, L. A., et al. (2012). Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forests in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, *462*–*463*, 53–66.

Muñoz-Villers, L. E. y McDonnell, J. J. (2013). Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17*, 3543–3560.

Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F, Alvarado-Barrientos, M. S., Geissert, D., Marín-Castro, B. E., Gómez-Tagle, A., et al. (2015). Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque*, *36*, 395–407.

Muñoz-Villers, L. E., Geissert, D. R., Holwerda, F. y McDonnell, J. J. (2016). Factors influencing stream baseflow transit times in tropical montane watersheds. *Hydrology and Earth Systems Science* *20*, 1621–1635

Návar, J. (1993). The causes of stemflow variation in three semi-arid growing species of northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, *145*, 179–190.

Návar, J. (2011). Stemflow variation in Mexico’s northeastern forest communities: Its contribution to soil moisture content and aquifer recharge. *Journal of Hydrology*, *408*, 35–42.

Návar, J. (2013). The performance of the reformulated Gash’s interception loss model in Mexico’s northeastern temperate forests. *Hydrological Processes*, *27*, 1626–1633.

Návar, J. (2015). Hydro-climatic variability and perturbations in Mexico’s north-western temperate forests. *Ecohydrology*, *8*, 1065–1072.

Návar, J. y Bryan, R. (1990). Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, *115*, 51–63.

Návar, J., Charles, F. y Jurado, E. (1999a). Spatial variations of interception loss components by Tamaulipan thornscrub in northeastern Mexico. *Forest Ecology and Management*, *124*, 231–239.

Návar, J., Carlyle-Moses, D. E. y Martinez M., A. (1999b). Interception loss from the Tamaulipan matorral thornscrub of north-eastern Mexico: an application of the Gash analytical interception loss model. *Journal of Arid Environments*, *41*, 1–10.

Noguez, A.M., Escalante, A.E., Forney, L.J., Nava-Mendoza, M., Rosas, I., Souza, V. y García-Oliva, F. (2008). Soil aggregates in a tropical deciduous forest: effects on C and N dynamics, and microbial communities as determined by t-RFLPs. *Biogeochemistry,* *89*, 209–220;

Pérez-Ruiz, E. R., Garatuza-Payán, J., Watts, C. J., Rodríguez, J. C., Yepez, E. A. y Scott, R. L. (2010). Carbon dioxide and water vapour exchange in a tropical dry forest as influenced by the North American Monsoon System (NAMS). *Journal of Arid Environments*, *74*, 556–563.

Pérez-Suárez, M., Fenn, M. E., Cetina-Alcalá, V. M. y Aldrete, A. (2008). The effects of canopy cover on throughfall and soil chemistry in two forest sites in the Mexico City air basin. *Atmosfera,* *21*, 83–100.

Pérez-Suárez, M., Arredondo-Moreno, J. T., Huber-Sannwald, E. y Serna-Pérez, A. (2014). Forest structure, species traits and rain characteristics influences on horizontal and vertical rainfall partitioning in a semiarid pine-oak forest from Central Mexico. *Ecohydrology*, *7*, 532–543.

Perroni-Ventura, Y., Montaña, C. y García-Oliva, F. (2006). Relationship between soil nutrient availability and plant species richness in a tropical semi-arid environment. *Journal of Vegetation Science,* *17*, 719–728.

Ponette-González, A. G., Weathers, K. C. y Curran, L. M. (2010). Water inputs across a tropical montane landscape in Veracruz, Mexico: Synergistic effects of land cover, rain and fog seasonality, and interannual precipitation variability. *Global Change Biology*, *16*, 946–963.

Porporato A. y Rodríguez-Iturbide, I. (2002). Ecohydrology-a challenging multidisciplinary research perspective / Ecohydrologie: une perspective stimulante de recherche multidisciplinaire. *Hydrological Sciences Journal 47*, 811–821.

Rentería, L., Jaramillo, V., Martínez-Yrízar, A. y Pérez-Jiménez, A. (2005). Nitrogen and phosphorus resorption in trees of a Mexican tropical dry forest. *Trees,* *19*, 431–441.

Rentería, L. y Jaramillo, V. (2011). Rainfall drives leaf traits and leaf nutrient resorption in a tropical dry forest in Mexico. *Oecologia, 165*, 201–211.

Reyes Gomez, V. M., Viramontes-Pereida, D., Miranda-Ojeda, N. E., Sanchez-Fernandez, P. B. y Viramontes-Olivas, O. (2007). Papel hidrológico ambiental de las propiedades hidraúlicas del suelo superficial de la cuenca del Rio Conchos. *Ingeniería Hidraúlica en México*, *22*, 33–46.

Riensche, M., Castillo, A., Flores-Diaz, A. y Maass, M. (2015). Tourism at Costalegre, Mexico: An ecosystem services-based exploration of current challenges and alternative futures. *Futures*, *66*, 70–84.

Rivera-Monroy, V., Maass, M., Benítez, J., Coronado, C., Euán, J., Godínez, E., et al. (2008). Eco-hidrología y demandas de agua en México. *Ciencia y Desarrollo*, *34*, 24-27**.**

Robles-Morua, A., Vivoni, E. R. y Mayer, A. S. (2012). Distributed Hydrologic Modeling in Northwest Mexico Reveals the Links between Runoff Mechanisms and Evapotranspiration. *Journal of Hydrometeorology*, *13*, 785–807.

Runyan, C., D'Odorico, P., Vandecar, K., Das, R., Schmoock, B. y Lawrence, D. (2013). Positive feedbacks between phosphorus deposition and forest canopy trapping, evidence from Southern Mexico. *Journal of Geophysical Research, 118*, 1521–1531.

Sandoval-Pérez, A., Camargo-Ricalde, S. L., Montaño, N., García-Oliva, F., Alarcón A, Montaño, S. et al. (2016). Biocrust, inside and outside resource islands of *Mimosa luisana* (Leguminosae), improve soil carbon and nitrogen dynamics in a tropical semiarid ecosystem. *European Journal of Soil Biology,* *74*, 93–103.

Sarukhán, J. y Maass, J.M. (1990). Bases ecológicas para un manejo sostenido de los ecosistemas: el sistema de cuencas hidrológicas.  En E. Leff (Ed.), *Medio ambiente y desarrollo en México* Vol. I (pp. 81–114). Ciudad de México: UNAM (CIIH)-Porrúa.

Saynes, V., Hidalgo, C., Etchevers, J. y Campo, J. (2005). Soil C and N dynamics in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. *Applied Soil Ecology,* *29*, 282–289.

Tang, Q., Vivoni, E. R., Muñoz-Arriola, F. y Lettenmaier, D. P. (2012). Predictability of Evapotranspiration Patterns Using Remotely Sensed Vegetation Dynamics during the North American Monsoon. *Journal of Hydrometeorology*, *13*, 103–121.

Tarin, T., Yépez, E. A., Garatuza-Payán, J., Watts, C. J., Rodríguez, J. C., Vivoni, E. R., et al. (2014). Partición de la evapotranspiración usando isótopos estables en estudios ecohidrológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *5*, 97–114.

Tobón, W., Martínez-Garza, C. y Campo, J. (2010). Soil responses to restoration of a tropical pasture in Veracruz, South-Eastern Mexico. *Journal of Tropical Forest Science,* *23*, 338–344.

Toledo-Aceves, T. y García-Oliva, F. (2008). Effects of forest-pasture edges on C, N and P associated with *Caesalpinia eriostachys*, a dominant tree species in a tropical deciduous forest in Mexico. *Ecological Research, 23*, 271–280.

Valdespino, P., Romualdo, R., Cardenazzi, L. y Campo, J. (2009). Phosphorus cycling in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. *Annals of Forest Science, 66,* 107–107.

Vargas, R., Loescher, H. W., Arredondo, T., Huber-Sannwald, E., Lara-Lara, R. y Yépez, E. A. (2012). Opportunities for advancing carbon cycle science in México: toward a continental scale understanding. *Environmental Science and Policy, 21*, 84–93.

Vargas, R., Yépez, A., Andrade, J. L., Ángeles, G., Arredondo, T., Castellanos, A. E. et al. (2013). Progress and opportunities for monitoring greenhouse gases fluxes in Mexican ecosystems: the MexFlux network. *Atmósfera, 26*, 325–336.

Verduzco, V. S., Garatuza-Payán, J., Yépez, E. A., Watts, C. J., Rodríguez, J. C., Robles-Morua, A.,et al. (2015). Variations of net ecosystem production due to seasonal precipitation differences in a tropical dry forest of northwest Mexico. *Journal of Geophysical Research G: Biogeosciences*, *120*, 2081–2094.

Villarreal, S., Vargas, R., Yepez, E. A., Acosta, J. S., Castro, A., Escoto-Rodriguez, M., et al. (2016). Contrasting precipitation seasonality influences evapotranspiration dynamics in water-limited shrublands. *Journal of Geophysical Research G: Biogeosciences*, *121*, 494–508.

Vitousek, P., Matson, P., Volkmann, C., Maass, J.M. y García, G. (1989). Nitrous oxide flux from dry tropical forests. *Global Biogeochemical Cycles*, *3*, 375–382.

Vivoni, E. R. (2012). Diagnosing Seasonal Vegetation Impacts on Evapotranspiration and Its Partitioning at the Catchment Scale during SMEX04–NAME. *Journal of Hydrometeorology*, *13*, 1631–1638.

Vivoni, E. R., Watts, C. J., Rodríguez, J. C., Garatuza-Payán, J., Méndez-Barroso, L. A. y Sáiz-Hernández, J. A. (2010). Improved land-atmosphere relations through distributed footprint sampling in a subtropical scrubland during the North American monsoon. *Journal of Arid Environments*, *74*, 579–584.

Vose, J.M. y Maass, J.M. (1999). A Comparative analysis of hydrologic responses of tropical deciduous and temperate deciduous watershed ecosystems to climatic change. En C. Aguirre-Bravo y C. Rodríguez-Franco (Comp.), *North American Science Symposium: Toward a Unified Framework for Inventorying and Monitoring Forest Ecosystem Resources* (pp. 292–298).  Guadalajara, México: USDA Forest Service Proceedings RMRS.

**Tablas**

Tabla 1. Temas de la investigación sobre la dinámica hidrológica en los ecosistemas terrestres de México en artículos indizados para el periodo 1990-2016.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| TEMA |  |  |  |  | N | % |
| Interacción partición de la lluvia y atributos vegetación y rasgos funcionales | | | | | 15 | 32.6 |
| Interacción procesos hidrológicos y actividad vegetación | | | | | 8 | 17.4 |
| Disturbios (recarga acuíferos, incidencia fuegos, invasión, cambio de uso del suelo) | | | | | 8 | 17.4 |
| Interacción procesos hidrológicos y procesos del ecosistema | | | | | 7 | 15.2 |
| Metodológicos (aplicabilidad de modelos, estrategias de muestreo) | | | | | 5 | 10.9 |
| Experimentales (manipulación de lluvia) y aplicados | | | | | 3 | 6.5 |
| Total |  |  |  |  | 46 | 100 |

Tabla 2

Temas de la investigación sobre los almacenes y ciclos de nitrógeno y fósforo en los ecosistemas terrestres de México en artículos indizados para el periodo 1990-2016.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| TEMA |  |  |  |  | N | % |
| Análisis de flujos y almacenes | | |  |  | 19 | 35.8 |
| Manejo de ecosistemas (restauración, fertilización) | | | |  | 11 | 20.8 |
| Disturbios (cambio de uso del suelo, efecto de borde) | | | | | 8 | 15.1 |
| Lluvia de escurrimiento por el follaje y por los tallos | | | |  | 6 | 11.3 |
| Relación con la dinámica microbiana | | |  |  | 5 | 9.4 |
| Eficiencia y disponibilidad de nutrientes | | | |  | 2 | 3.8 |
| Contribución de especies clave y rasgos foliares | | | |  | 2 | 3.8 |
| Total |  |  |  |  | 53 | 100 |

**Pies de figura**

Figura 1. Número de artículos publicados en revistas indizadas entre 1990 y 2016 sobre el funcionamiento de ecosistemas terrestres en México. a) dinámica hidrológica, b) almacenes y flujos de nitrógeno y fósforo.

Figura 2. Porcentaje de estudios por tipo de ecosistema del total de las publicaciones indizadas de 1990 a 2016 sobre a) dinámica hidrológica y b) almacenes y flujos de nitrógeno y fósforo, en los ecosistemas terrestres de México. Matorrales xerófilos (MX), bosques templados (BT), bosques mesófilos de montaña (BMM), selvas bajas caducifolias (SBC), pastizales (P), mezquitales (Mz), selvas altas perennifolias (SAP).

Figura 3. Porcentaje de estudios por localidad del total de las publicaciones indizadas de 1990 a 2016 sobre a) dinámica hidrológica y b) almacenes y flujos de nitrógeno y fósforo, en los ecosistemas terrestres de México.

Figura 4. Porcentaje de estudios por institución académica participante del total de las publicaciones indizadas de 1990 a 2016 sobre a) dinámica hidrológica y b) almacenes y flujos de nitrógeno y fósforo, en los ecosistemas terrestres de México. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste A.C. (CCGSS), Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Regional Integral (CIIDIR), Centro Instituto de Ecología, A.C. (INECOL), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. (IPICYT), Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), U.S. Department of Agriculture (USDA), Woods Hole Research Center (WHRC).