

Principios para la gestión de aguas pluviales urbanas para proteger los ecosistemas fluviales

Christopher J. Walsh^{1,10}, Derek B. Booth^{2,11}, Matthew J. Burns^{1,12}, Tim D. Fletcher^{1,13}, Rebecca L. Hale^{3,14}, Lan N. Hoang^{4,15}, Grant Livingston^{5,16}, Megan A. Rippey^{6,17}, Allison H. Roy^{7,18}, Mateo Scoggins^{8,19}, y Angela Wallace^{9,20}

¹Facultad de Ciencias Forestales y de los Ecosistemas, Universidad de Melbourne, 500 Yarra Boulevard, Burnley, Victoria 3121, Australia

²Escuela Bren de Ciencias Ambientales y Gestión, Universidad de California-Santa Bárbara, Santa Bárbara, California 93106 EE. UU.

³Centro de Cambio Global y Sostenibilidad, Universidad de Utah, Salt Lake City, Utah 84112, EE. UU.

⁴Centro para el Desarrollo Sostenible, Departamento de Ingeniería, Universidad de Cambridge, Cambridge CB2 1PZ, Reino Unido

⁵Ingeniería de Recursos Hídricos, 233 Owen's Hall, Universidad Estatal de Oregón, Corvallis, Oregón 97330, EE. UU.

⁶Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela de Ingeniería Henry Samueli, Universidad de California-Irvine, Irvine, California 92697 EE. UU.

⁷Servicio Geológico de Estados Unidos, Unidad de Investigación Cooperativa de Pesca y Vida Silvestre de Massachusetts, Departamento de Conservación Ambiental, Universidad de Massachusetts, Amherst, Massachusetts 01003 EE. UU.

⁸Departamento de Protección de Cuencas Hidrográficas, Ciudad de Austin, 505 Barton Springs Road, Austin, Texas 78704, EE. UU.

⁹Autoridad de Conservación de Toronto y la Región, 5 Shoreham Drive, Toronto, Ontario M3N 1S4, Canadá

Abstracto: La escorrentía de aguas pluviales urbanas es una fuente crítica de degradación de los ecosistemas fluviales a nivel mundial. A pesar de la amplia apreciación por parte de los ecólogos fluviales de los efectos negativos de la escorrentía de aguas pluviales, los objetivos de gestión de aguas pluviales todavía se centran típicamente en la mitigación de inundaciones y contaminación sin un enfoque explícito en la hidrología alterada. Es poco probable que los enfoques de gestión resultantes protejan adecuadamente la estructura ecológica y la función de los arroyos. Presentamos elementos críticos de la gestión de aguas pluviales necesarios para proteger los ecosistemas fluviales a través de 5 principios que pretenden ser ampliamente aplicables a todos los paisajes urbanos que drenan a un arroyo receptor: 1) los ecosistemas que se deben proteger y un estado ecológico objetivo deben identificarse explícitamente; 2) el balance posterior al desarrollo de la evapotranspiración, el flujo del arroyo y la infiltración debe imitar el balance previo al desarrollo, lo que generalmente requiere evitar que un volumen significativo de escorrentía llegue al arroyo; 3) las medidas de control de aguas pluviales (SCM) deben proporcionar regímenes de flujo que imiten el régimen previo al desarrollo en calidad y cantidad; 4) Los SCM deben tener la capacidad de almacenar eventos de lluvia para todas las tormentas que no habrían producido escorrentía superficial generalizada en un estado previo al desarrollo, evitando así una mayor frecuencia de perturbación de la biota; y 5) Los SCM deben aplicarse a todas las superficies impermeables en la cuenca del arroyo objetivo. Estos principios presentan diversos desafíos técnicos y sociales. Los contextos infraestructurales, institucionales o de gobernanza existentes a menudo impiden la aplicación de los principios en la medida necesaria para lograr una protección o restauración efectiva, pero existe un potencial significativo de múltiples cobeneficios de las tecnologías de SCM (p. ej., suministro de agua y adaptación al cambio climático) que podrían eliminar las barreras para su implementación. Nuestro conjunto de principios ideales para la protección de arroyos pretende servir de guía para innovadores que buscan desarrollar nuevos enfoques para la gestión de aguas pluviales en lugar de aceptar limitaciones históricas aparentemente insuperables, que garantizan una degradación futura y continua.

Palabras clave: hidrología urbana, gestión, protección de arroyos, restauración de arroyos

Direcciones de correo electrónico: ¹⁰cwalsh@unimelb.edu.au ; ¹¹dbooth@bren.ucsb.edu ; ¹²matthew.burns@unimelb.edu.au ; ¹³timf@unimelb.edu.au ; ¹⁴rebecca.l.hale@utah.edu; ¹⁵lnh24@cam.ac.uk ; ¹⁶glivings@gmail.com ; ¹⁷mrippy@uci.edu ; ¹⁸aroy@eco.umass.edu ; ¹⁹mateo.scoggins@austintexas.gov ; ²⁰awallace@trca.on.ca

* Esta sección de la revista está destinada a la expresión de nuevas ideas, puntos de vista y comentarios sobre temas de interés para los científicos acuáticos. El consejo editorial invita a la publicación de artículos nuevos y originales, así como a la recepción de comentarios sobre artículos ya publicados en *Freshwater Science*. El formato y el estilo pueden ser menos formales que los de los artículos de investigación convencionales; no son apropiados los conjuntos de datos masivos. Se agradece la especulación si es probable que estimule un debate interesante. Los puntos de vista alternativos deben ser instructivos, no meramente contradictorios o argumentativos. Todos los artículos recibirán las revisiones y evaluaciones editoriales habituales.

DOI: 10.1086/685284. Recibido el 3 de marzo de 2015; Aceptado el 28 de agosto de 2015; Publicado en línea el 5 de enero de 2016.

Ciencia del Agua Dulce. 2016. 35(1):398–411. © 2016 por la Sociedad para la Ciencia del Agua Dulce. Todos los derechos reservados. Esta obra está bajo la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0), que permite la reutilización no comercial de la obra con atribución. Para uso comercial, contacte con journalpermissions@press.uchicago.edu.

La gestión del agua urbana en muchas ciudades está evolucionando desde un enfoque exclusivo en los servicios primarios que garantizan la salud pública (mediante el suministro de agua, la eliminación de aguas residuales y la mitigación de inundaciones) hacia un uso más integrado de los flujos hídricos urbanos. La gestión integrada del agua (de suministro de agua, aguas residuales y aguas pluviales) permite alcanzar múltiples objetivos, como el bienestar social, la protección de las aguas receptoras, la reducción del consumo de agua externa y otros recursos, y la mejora del microclima urbano (Brown et al., 2009b). La gestión del drenaje urbano es fundamental para alcanzar esta gama más amplia de objetivos de sostenibilidad, y la evolución de la gestión del drenaje urbano en ciudades de todo el mundo ha generado una divergencia en la terminología y los enfoques de gestión para reducir los efectos ambientales negativos del drenaje urbano (Fletcher et al., 2015).

Los primeros intentos de reformular la gestión del drenaje urbano para la protección ambiental se centraron en la protección de la integridad ecológica y física de los arroyos, ya sea explícitamente (Schueler 1987, Condado de King 1990, Whelans et al. 1994, Departamento de Recursos Ambientales del Condado de Prince George, Maryland 1999) o implícitamente, mediante objetivos de reducción de la contaminación (Martin et al. 2000). Sin embargo, en las décadas de 1990 y 2000, la gestión de aguas pluviales para la protección ambiental se volvió tácitamente menos explícita al describir los ecosistemas que debían protegerse o restaurarse. (En este artículo, nos referimos principalmente a la protección, pero nuestros argumentos también se aplican a los requisitos de restauración). La falta de enfoque en los arroyos como aguas receptoras que deben protegerse ha dado lugar a numerosos casos de sustitución de ecosistemas fluviales por humedales pluviales artificiales (p. ej., Taylor et al., 2005) o a la reingeniería de los arroyos como medidas de tratamiento de aguas pluviales para cumplir objetivos de gestión específicos, como la reducción de la exportación de nitrógeno a las aguas costeras. Tras dicha modificación, estos arroyos presentan escasa similitud funcional con su estado anterior (Palmer et al., 2014).

Por lo general, se ha observado una mejora leve o nula en los indicadores ecológicos aguas abajo tras la implementación de dichas medidas de control de aguas pluviales (MCP). En algunos casos, la implementación insuficiente en las cuencas o la variabilidad en el diseño y la eficacia de las MCP pueden ser los culpables (Horner et al. 2001, May y Horner 2002). En otros lugares, se han reportado efectos limitados y a veces contradictorios de las MCP. Greenway (2010) encontró un aumento en la riqueza de especies de macroinvertebrados aguas abajo de dos humedales de tratamiento de aguas pluviales construidos en el cauce del arroyo. Por el contrario, Walsh (2004) notó cambios en la composición del ensamble de macroinvertebrados aguas abajo de los humedales de tratamiento de aguas pluviales en línea, lo que sugirió que los humedales de aguas pluviales eran fuentes de nutrientes en lugar de sumideros durante el tiempo seco. La escasa evidencia de la eficacia de las MCP en la protección de los ecosistemas fluviales sugiere la necesidad de reevaluar los objetivos de diseño de las MCP para la protección de los arroyos.

Más recientemente, los autores de manuales de diseño de bajo impacto y regulaciones de aguas pluviales (p. ej., Perrin et al. 2009, Toronto and Region Conservation Authority y Credit Valley Conservation Authority 2010, California Central Coast Regional Water Quality Control Board 2013) han restablecido la intención original del diseño de bajo impacto para proteger los ecosistemas fluviales mediante la réplica de procesos hidrológicos preurbanos, con énfasis en replicar el balance de volumen de escorrentía, infiltración y evapotranspiración en cuencas urbanas. El enfoque principal de tales objetivos es hidrológico, pero el control de la calidad del agua es implícito debido a la contribución dominante de los flujos subterráneos en la mayoría de las cuencas no urbanas (p. ej., Tanaka et al. 1988). Dichos flujos subterráneos tienden a ser de alta calidad debido a la filtración y asimilación por suelos, subsuelos y acuíferos (Jarvis 2007).

Al proponer objetivos de diseño para la protección de los arroyos, Perrin et al. (2009; p. 2-1) plantearon que «si se imitan los volúmenes de escorrentía previos al desarrollo, se asume que se cumplen otros objetivos de cantidad de agua, como los caudales de salida estables del arroyo y la mitigación de picos de tormenta de 24 horas y un año». Según este razonamiento, reducir los caudales (es decir, evitar que el agua llegue a los arroyos) para aproximarlos a los del estado previo al desarrollo probablemente sea un prerrequisito para lograr los regímenes de caudal y calidad del agua necesarios para la protección y restauración de los arroyos.

Sin embargo, las normas actuales de diseño para sistemas de alcantarillado pluvial generalmente no protegen los cursos de agua (Burns et al., 2012), en parte porque los enfoques de gestión de aguas pluviales tradicionalmente no se han centrado en restaurar o mantener el equilibrio hidrológico. De hecho, las estrategias para mitigar la escorrentía urbana varían entre países, regiones, ciudades y municipios debido a las diferencias en el contexto político, la fisiografía y la infraestructura existente (Booth et al., 2016; Hale et al., 2016; Parr et al., 2016). Por ejemplo, en regiones y ciudades situadas en ensenadas costeras con potencial de eutrofización, la reducción de las cargas de contaminación en las bahías es un objetivo principal de gestión (Comité de Aguas Pluviales de Victoria, 1999; Consejo Nacional de Investigación, 2009). En ciudades más antiguas con sistemas de alcantarillado combinado, la atención se centra en la mitigación de inundaciones y contaminación para limitar los problemas ambientales y de salud humana asociados con los desbordamientos del alcantarillado combinado (Woods-Ballard et al., 2007). A pesar de esta diversidad de objetivos, el creciente reconocimiento de que la protección de los ecosistemas fluviales requiere diferentes enfoques de gestión de aguas pluviales (Burns et al., 2012; Walsh et al., 2012) sugiere una clara necesidad de que los ecólogos fluviales, en colaboración con hidrólogos, geomorfólogos e ingenieros, aporten mayor información al diseño de los SCM. Este enfoque interdisciplinario es necesario para identificar los factores de estrés críticos que la escorrentía de aguas pluviales urbanas genera en los ecosistemas fluviales y que requieren ser corregidos.

El objetivo de nuestro trabajo es articular cinco principios críticos del control de aguas pluviales que son necesarios para la protección de los ecosistemas fluviales en paisajes urbanos. Identificamos los siguientes:

Cinco principios, que se debatieron colectivamente durante el Simposio sobre Urbanización y Ecología de Ríos de 2014 y en debates posteriores, se basan en la literatura y en nuestra experiencia global. Nos centramos principalmente en los principios que sustentan la gestión de la escorrentía pluvial, pero reconocemos la importancia de limitar su generación minimizando la creación de zonas impermeables siempre que sea posible.

Los principios descritos son intencionalmente idealistas; nuestra esperanza es que, al articular los objetivos hidrológicos necesarios para proteger y restaurar completamente los cursos de agua, también ofrezcamos perspectivas sobre situaciones donde los ecosistemas no pueden restaurarse por completo. Tras describir los principios, exploramos su aplicación en contextos contrastantes alrededor del mundo. Estos ejemplos resaltan los desafíos técnicos y sociopolíticos, dadas las diferencias fisiográficas e institucionales entre las ciudades. Por lo tanto, estos principios pueden ser difíciles de implementar plenamente en muchos entornos urbanos existentes sin un cambio institucional. En la sección final, describimos los beneficios adicionales que podrían brindarse al adoptar las tecnologías. Estos beneficios adicionales pueden proporcionar la motivación crucial para los cambios en las instituciones y las estructuras de gobernanza necesarios para proteger eficazmente los cursos de agua.

LOS PRINCIPIOS

La hipótesis general que guía estos principios es que la protección ecológicamente eficaz de los ecosistemas fluviales en cuencas en proceso de urbanización, o la restauración de ecosistemas fluviales ya degradados por la escorrentía pluvial urbana, requiere una gestión del drenaje pluvial a escala de cuenca para replicar los procesos hidrológicos previos al desarrollo (Tabla 1). Este resultado podría parecer difícil de lograr, y aún no existen ejemplos de restauración ecológicamente eficaz de arroyos urbanos, pero se ha demostrado la prevención de la degradación por los efectos negativos de las aguas pluviales (Walsh et al., 2012). A partir de estos ejemplos, proponemos principios que requieren experimentación en contextos de restauración.

Dos de los principios (3 y 4) abordan directamente los múltiples factores de estrés que la escorrentía pluvial urbana ejerce sobre los ecosistemas fluviales. Los otros tres principios establecen medidas prácticas necesarias para aplicar adecuadamente los principios básicos y lograr la protección de los cauces.

En muchas zonas urbanas, el agua receptora inmediata es un gran río, o un entorno léntico o marino, típicamente con una gran capacidad de amortiguación que hace que las cargas de contaminantes a largo plazo sean más importantes que las alteraciones del régimen de caudal. Por el contrario, los ecosistemas fluviales de tamaño pequeño a mediano se ven fuertemente influenciados por el régimen de caudal como factor principal de la estructura y función ecológicas (Poff et al., 1997): es probable que los cambios a corto plazo en el agua y la entrega de contaminantes desde la cuenca tengan un mayor efecto en dichos...

Ecosistemas. Por lo tanto, la protección de los ecosistemas fluviales requiere objetivos de control de aguas pluviales diferentes a los que podrían ser adecuados para grandes ríos y entornos lénticos y marinos. Limitamos nuestros principios a la consideración de objetivos de protección o restauración de ecosistemas fluviales, pero observamos que los siguientes objetivos de reducción de volumen y replicación de regímenes de caudal y calidad del agua previos al desarrollo probablemente también protejan adecuadamente las aguas abajo de mayor tamaño.

Principio 1. Se deben identificar los ecosistemas fluviales que se van a proteger o restaurar y se debe establecer un objetivo para su estado ecológico.

Nuestra definición de gestión de aguas pluviales urbanas para la protección de arroyos asume que las aguas pluviales se gestionan con el objetivo de mantener la estructura ecológica y la función de los arroyos receptores en un estado dinámico y funcional similar a una condición de referencia definida o "imagen guía". Esta definición sigue la guía de Palmer et al. (2005; p. 210) que indica que los proyectos de restauración deben llevar los ecosistemas fluviales "al estado menos degradado y más dinámico ecológicamente posible, dado el contexto regional". Para proteger los ecosistemas fluviales de los efectos de la escorrentía de aguas pluviales urbanas, un objetivo apropiado podría ser la condición del arroyo antes del desarrollo urbano de su cuenca o de arroyos rurales análogos en la misma región. No sugerimos que todos los arroyos deban restaurarse a dicho nivel (esa es una decisión que se deja a los administradores; Smith et al. 2016), pero si se intenta restaurar arroyos, primero se debe identificar la escala del arroyo y el objetivo ecológico.

El punto de nacimiento de un arroyo es una cuestión controvertida (Doyle y Bernhardt, 2011) que potencialmente dificulta la identificación de los arroyos más pequeños que requieren protección. Debido a la mayor interacción entre el agua y los sedimentos en los arroyos pequeños y a su abundancia en paisajes no urbanos, se reconocen como puntos críticos de retención y transformación de contaminantes (McClain et al., 2003) y, por lo tanto, deben protegerse. Sin embargo, muchos arroyos pequeños en las ciudades suelen enterrarse y convertirse en desagües pluviales (Graf, 1977; Meyer y Wallace, 2001; Elmore y Kaushal, 2008). Estos cursos de drenaje modificados, hidráulicamente eficientes, son un factor principal en la degradación de los arroyos (Walsh et al., 2005). Los cauces más pequeños, con áreas de acumulación a menudo demasiado pequeñas para iniciar la formación de canales, son incluso más comunes en el paisaje que los arroyos pequeños y, por lo tanto, se convierten con mayor frecuencia en canalizaciones de aguas pluviales.

En las zonas urbanas existentes, donde ya se ha producido dicha transformación, los sistemas de gestión de aguas pluviales (SCM) deben diseñarse para evitar que las aguas pluviales fluyan hacia estas tuberías, excepto en raras tormentas fuertes que presenten riesgo de inundación urbana. Sin embargo, incluso los arroyos pequeños y los flujos sin canalizar...

Tabla 1. Resumen de los principios para la gestión de aguas pluviales urbanas con el fin de proteger los ecosistemas fluviales. Se presentan las principales consideraciones y desafíos de cada principio; también se enumeran los beneficios asociados a cada uno, pero muchos no se corresponden con un único principio. Agua = calidad del agua, ET = evapotranspiración, SCM = medidas de control de aguas pluviales.

| Principios | Consideraciones | Desafíos | Beneficios |
|--|---|---|--|
| 1. Identificar los ecosistemas que deben protegerse y establecer objetivos | <p>Si el sistema es un arroyo o un río, el</p> <p>Se aplican los principios; se establecen objetivos para la condición del arroyo, el balance hídrico y los regímenes de caudal y calidad del agua.</p> <p>Si una filtración profunda fluye hacia un río, Sistema marino/léntico, acuífero confinado, objetivo establecido para pérdida aceptable por filtración profunda</p> | <p>Encontrar la referencia apropiada</p> <p>La condición puede ser difícil (Smith et al. 2016)</p> <p>Identificar cantidad y Destino de la filtración profunda; sin información, suponga que es pequeña</p> | Arroyos saludables y ecosistema asociado servicios |
| 2. Imita el balance hídrico previo al desarrollo. | <p>Se impidió alcanzar el volumen el caudal (a través de la cosecha para riego [pérdida de ET] o pérdida hacia el alcantarillado/otra cuenca) idealmente debería ser igual</p> <p>pérdida de ET previa al desarrollo</p> <p>El volumen del caudal debe ser entregado a través de sistemas de infiltración</p> <p>Infiltración profunda entregada a través de sistemas de infiltración, determinados por probables ecosistema receptor</p> | Encontrar suficiente demanda | Abastecimiento de agua, inundaciones mitigación |
| 3. Implementar SCM que proporcionen flujos filtrados | <p>Filtración e infiltración</p> <p>sistemas para cumplir con los objetivos de caudal y calidad del agua</p> | Diseño de sistemas para entregar flujo rápido; gestión de contaminantes móviles; mantenimiento | Agricultura urbana, urbana enfriamiento a través de ET, sombreado, resiliencia al cambio climático, bienestar humano |
| 4. Implementar SCMs con capacidad para almacenar eventos de lluvia que producir perturbación a la biota del arroyo | <p>Equilibrio adecuado de almacenamiento</p> <p>Volumen/demanda/pérdida a través de ET o infiltración</p> | Espacio, costo, demanda | El aumento de la demanda reduce Requisitos de espacio, reduce costos al reducir la demanda de agua potable. |
| 5. Aplicar SCMs a toda la superficie impermeable. en la cuenca | Planificación a escala de cuenca requerido | Espacio, aceptación social | Un paisaje más verde y fresco |

Los senderos deben reconocerse como ecosistemas que vale la pena proteger en sí mismos desde las primeras etapas de la planificación de nuevas áreas urbanas. Idealmente, deberían reservarse como espacios verdes lineales que puedan conservar su función retentiva, a la vez que ofrecen un valioso espacio abierto. Estas ideas son coherentes con las primeras concepciones del diseño de bajo impacto, expresadas en algunos desarrollos a pequeña escala (Karvonen, 2011).

Un corolario importante de este principio es que la protección de los arroyos requiere que los SCM intercepten la escorrentía antes de entrar en el arroyo en lugar de permitir que el agua fluya hacia él y, posteriormente, alterar aún más el ecosistema fluvial mediante la construcción de un sistema de tratamiento en el cauce. Dicha interceptación requiere la ubicación de SCM cerca de las fuentes.

(por ejemplo, interceptando escorrentías de carreteras o techos) o en trayectorias de flujo aguas arriba de donde primero descargan en canales definidos.

La importancia de las interacciones sedimento-agua en la función ecológica y la estructura de los arroyos también indica la necesidad de considerar la zona riparia y la llanura aluvial de los arroyos como parte integral del ecosistema fluvial que debe protegerse (Vietz et al., 2012). Estas áreas forman parte del régimen dinámico de flujo de los arroyos y son cruciales para funciones ecológicas como el aporte y la retención de materia orgánica, el ciclo de nutrientes y la modificación de la temperatura (p. ej., Pusey y Arthington, 2003; Jackson et al., 2014). El aislamiento hidrológico de los ecosistemas riparios, que suele resultar de la incisión de los arroyos urbanizados (Groffman et al., 2003),

es probable que restrinja la restauración ecológica incluso si los efectos hidrológicos a escala de cuenca de la escorrentía de aguas pluviales pueden mitigarse adecuadamente porque se reducirá la interacción entre el canal y la llanura de inundación.

Principio 2. El balance hídrico posterior al desarrollo debe ser similar al balance hídrico previo al desarrollo. En concreto, los volúmenes de escorrentía y agua infiltrada de una zona impermeable con SCM deben ser similares a los de la zona previa al desarrollo. Esto requiere que el volumen de agua perdida (por ejemplo, a través del alcantarillado sanitario o la evapotranspiración) se aproxime al volumen de agua que se habría perdido por evapotranspiración en la zona previa al desarrollo.

Un determinante principal del éxito de la protección es el régimen de caudal del cauce receptor y, fundamentalmente, su coeficiente de caudal: la proporción de la precipitación de la cuenca que, en promedio, se convierte en caudal. La proporción de la precipitación que se pierde en el aire por evapotranspiración o por infiltración profunda es el complemento del coeficiente de caudal. En su análisis global, Zhang et al. (2001) asumieron que las pérdidas netas a largo plazo por infiltración profunda suelen ser pequeñas y estimaron que la evapotranspiración es el complemento funcional del caudal. (En este trabajo, al referirnos a agua perdida, nos referimos al agua que no se convierte en caudal). Encontraron que la pérdida media anual por evapotranspiración de las cuencas subdesarrolladas del mundo oscilaba típicamente entre el 40 y el 60 % de la precipitación en regiones húmedas (dependiendo de la extensión de la cubierta forestal de la cuenca) hasta casi el 100 % en regiones áridas.

Por el contrario, las pérdidas por evaporación de las superficies impermeables son mucho menores y menos variables, y varían desde <10% en regiones húmedas a ~25% en zonas cálidas y áridas (Walsh et al., 2012). Donde la pérdida de bosque acompaña a la urbanización, la reducción de la evapotranspiración de las áreas permeables restantes puede explicar un aumento del caudal perenne (Roy et al., 2009). Por lo tanto, en zonas urbanas, un desafío principal para lograr un régimen de caudal previo al desarrollo es la pérdida de la escorrentía adicional de las superficies impermeables (y posiblemente el aumento de los caudales subterráneos de las áreas permeables) que no habrían llegado al arroyo en su estado previo al desarrollo.

Los gestores de aguas pluviales de América del Norte suelen estimar que una gran proporción de la lluvia se "pierde" por filtraciones profundas (p. ej., Perrin et al., 2009), por lo que también se asume que el agua infiltrada se pierde del balance hídrico general de la cuenca de estudio. Sin embargo, se debe considerar la hidrología y la función ecológica del acuífero receptor antes de infiltrar o inyectar aguas pluviales urbanas en él. El aumento del volumen de escorrentía de superficies impermeables significa que los sistemas de infiltración de aguas pluviales pueden aumentar los flujos hacia acuíferos libres, con posibles efectos negativos en las aguas abajo (Roy y Bickerton, 2012). Si el acuífero receptor se agota (p. ej., por extracciones), la adición de aguas pluviales urbanas podría

Facilitar su recarga. Sin embargo, si las extracciones y la recarga se realizan en la misma zona urbana, la demanda del acuífero podría reducirse directamente captando aguas pluviales urbanas en la fuente de lluvia, en lugar de seguir extrayendo al mismo ritmo del acuífero e intentar compensarlo infiltrando aguas pluviales.

Por lo tanto, mantener caudales casi naturales en arroyos y acuíferos requiere una cuidadosa consideración del balance hídrico, del estado del nivel freático y del régimen de caudal base (Bhaskar y Welty, 2012), lo que refuerza la importancia de minimizar la creación de zonas impermeables directamente conectadas como estrategia de primera instancia siempre que sea posible. La infiltración para proporcionar un régimen de caudal base adecuado es importante, pero dado el exceso de volumen de las zonas impermeables, los SCM también deberán promover pérdidas de agua, ya sea por evapotranspiración (p. ej., jardines de lluvia, captación de aguas pluviales para riego o refrigeración) o por otros usos donde se exporta al alcantarillado sanitario (p. ej., para cisternas de inodoros y agua caliente).

El aumento a largo plazo del volumen de escorrentía, abordado por este principio, no constituye un factor de estrés directo que impulse la degradación ecológica de los arroyos. Sin embargo, postulamos que eliminar el exceso de volumen de escorrentía y evitar que llegue al arroyo es necesario para mitigar los factores de estrés críticos resultantes, que se abordan en los dos principios siguientes.

Principio 3. Los SCM deben diseñarse para proporcionar caudales en un régimen de calidad y caudal que imite, en la medida de lo posible, los procesos hidrológicos dominantes previos al desarrollo.

En consonancia con el concepto de régimen de flujo natural propuesto por Poff et al. (1997), postulamos que la mejor posibilidad de proteger o restaurar la salud del ecosistema fluvial (sensu Karr 1999) es a través de regímenes de flujo y calidad del agua que sean lo más similares posible al régimen natural o previo al desarrollo.

El logro de regímenes de bajo caudal casi naturales puede verse complicado por la cantidad y la complejidad (y, por ende, la incertidumbre relativa) de los factores que influyen en las vías del caudal base (Price, 2011; Hamel et al., 2013; Bhaskar et al., 2016). (Seguimos la distinción de Hamel et al., 2013, según la cual el término «bajo caudal» se refiere a la magnitud del caudal, mientras que «caudal base» se refiere a las vías [subsuperficiales] por las que los flujos llegan al arroyo). Otros factores además de la escorrentía pluvial urbana, como los cambios en la vegetación de la cuenca y las fugas en la infraestructura de abastecimiento de agua y aguas residuales, pueden aumentar los caudales base en muchas cuencas urbanas (Smakhtin, 2001; Price, 2011; Bhaskar et al., 2016), pero la contribución de la lluvia que cae sobre superficies impermeables con drenaje convencional al caudal base se reduce o elimina por completo al evitar la infiltración por superficies impermeables y drenaje (Walsh et al., 2012). Estos factores interactuantes pueden producir resultados variables en diferentes áreas urbanas (Konrad y Booth 2005, Brown et al. 2009a).

Una vez que la frecuencia de la escorrentía sin tratar se ha limitado a niveles cercanos a los previos al desarrollo (véase el principio 4), los sistemas de gestión de residuos sólidos (SCM) deben diseñarse para generar el volumen y el patrón temporal de flujos que imiten lo que anteriormente se habría generado como flujo base desde el terreno ahora cubierto por superficies impermeables. El enfoque más obvio para lograr este objetivo es promover la infiltración de una cantidad de agua similar a la que se habría infiltrado en el estado previo al desarrollo (principio 2), reconociendo la incertidumbre sobre las vías y las pérdidas de los flujos infiltrados a medida que se desplazan hacia las aguas subterráneas y el cauce receptor (Hamel et al., 2013). Un enfoque alternativo consiste en utilizar sistemas cuidadosamente diseñados que buscan imitar los regímenes naturales de flujo base mediante descargas controladas (Hatt et al., 2009). Por ejemplo, DeBusk et al. (2011) sugieren que los sistemas de biorretención revestidos tienen el potencial de lograr regímenes de flujo base casi naturales.

La calidad del agua debe considerarse en paralelo con la provisión de regímenes de caudal adecuados. Para ello, es necesario considerar la naturaleza de las aguas receptoras. Por ejemplo, ¿poseen una gran capacidad de amortiguación (y, por lo tanto, se ven afectadas principalmente por cargas a largo plazo) o son sensibles a las variaciones de concentración a corto plazo? De la gama de SCM disponibles, los sistemas de biorretención quizás muestren el mayor potencial para brindar una calidad de agua que satisfaga las necesidades de las aguas receptoras sensibles (Hatt et al., 2009; Hunt et al., 2011). Otras técnicas basadas en la infiltración también pueden ofrecer niveles muy altos de tratamiento debido a las largas vías de filtración. La gestión óptima de la calidad del agua probablemente implicará una combinación de controles en la fuente y un tratamiento adecuado mediante SCM bien diseñados.

Principio 4. Los SCM deben diseñarse para evitar flujos sin tratar hacia los arroyos, salvo en raras tormentas de gran magnitud. Deben tener capacidad para almacenar la lluvia de eventos de hasta la magnitud de una tormenta que probablemente habría producido una escorrentía superficial generalizada y perturbado la biota fluvial en el estado previo al desarrollo.

En las cuencas naturales, es improbable que las precipitaciones de la magnitud necesaria para generar una escorrentía medible (normalmente, la gran mayoría de las precipitaciones) causen perturbaciones significativas debido al aumento de las descargas fluviales. Solo tormentas grandes o intensas serán suficientes para superar la «pérdida inicial» (la cantidad de lluvia necesaria para generar escorrentía superficial) en grandes porciones de las cuencas; aun así, es probable que el flujo superficial desde las tierras altas se reabsorba en zonas de mayor porosidad del suelo, ladera abajo, antes de llegar al arroyo (Tanaka et al., 1988). Estas tormentas poco frecuentes probablemente representen una perturbación natural importante para los ecosistemas fluviales y ribereños.

Por el contrario, las superficies impermeables conectadas suelen entregar altos caudales que transportan una variedad de contaminantes bajo casi cualquier cantidad de precipitación medible (con pérdida inicial

típicamente <1 mm) y al menos un orden de magnitud más frecuente que en el estado natural (Booth, 1991). Esta mayor frecuencia de perturbaciones es la causa de muchos de los factores de estrés que impulsan la degradación de los arroyos urbanos.

Por lo tanto, retener la escorrentía de superficies impermeables para precipitaciones menores que las que habrían generado un flujo superficial generalizado en la cuenca predesarrollada es clave para mantener una frecuencia e intensidad de perturbación casi naturales (tanto hidráulicas como de calidad del agua) en los arroyos. La precipitación necesaria para producir escorrentía varía a lo largo de una cuenca natural y con la estación y la humedad del suelo antecedente, pero el análisis de los hidrogramas fluviales en cuencas naturales puede identificar las profundidades de lluvia típicas requeridas para generar escorrentía generalizada. Por ejemplo, en cuencas forestales del sureste de Australia, Hill et al. (1996) observaron con frecuencia la pérdida inicial de ~25 mm. Se reportaron pérdidas iniciales similares en laderas de un bosque de Nueva Zelanda (Graham et al., 2010). Se podrían obtener estimaciones regionales a partir del análisis de los registros de caudal en cuencas naturales, como propusieron Burns et al. (2013).

Principio 5. Los SCM deben aplicarse a todas las superficies impermeables en la cuenca del arroyo objetivo.

Los efectos negativos de la escorrentía de aguas pluviales urbanas en los arroyos son perceptibles incluso con niveles muy bajos de impermeabilidad conectada (Walsh y Kunapo, 2009; King y Baker, 2011; Walsh y Webb, 2016). Muchas agencias gubernamentales han buscado distribuir los SCM de manera oportunista (impulsados, por ejemplo, por actividades de renovación o mantenimiento urbano) en toda su jurisdicción, con el objetivo de minimizar costos y garantizar la equidad geográfica entre los propietarios de tierras y las comunidades (por ejemplo, Prosser et al., 2015). Sin embargo, un resultado inevitable de tales estrategias es el continuo predominio del drenaje de aguas pluviales convencional en la mayoría de las cuencas, con SCM que tratan la escorrentía de solo una parte de las superficies impermeables. El tratamiento incompleto puede, en parte, explicar la falta de respuesta ecológica observada en estudios diseñados para probar la eficacia ecológica de los SCM (Horner et al., 2001; May y Horner, 2002; Roy et al., 2014).

Los SCM deben diseñarse y ubicarse de manera que la escorrentía de todas las áreas impermeables de la cuenca se gestione de manera consistente con los principios anteriores. El Principio 5 destaca la importancia de la escala para proteger los arroyos de los efectos de las aguas pluviales urbanas. Desde cierta perspectiva, este principio podría parecer implícito en los principios anteriores, que están diseñados para lograr un régimen de caudal y calidad del agua en el arroyo receptor similar al del arroyo antes del desarrollo. Sin embargo, los principios 2 a 4 proporcionan orientación sobre los objetivos de diseño para los SCM que podrían construirse a diversas escalas. Argumentamos aquí que la implementación efectiva de estos principios requiere una aplicación en toda la cuenca, pendiente arriba del arroyo receptor. Por lo tanto, en casi todas las cuencas, se requerirán múltiples SCM para retener y tratar adecuadamente la escorrentía de todas las superficies impermeables.

RETOS PARA LA APLICACIÓN DE LOS PRINCIPIOS

Proponemos estos principios como necesarios para maximizar la posibilidad de proteger o restaurar la estructura y función ecológica de los arroyos en cuencas fluviales en proceso de urbanización (Paul y Meyer, 2001; Walsh et al., 2005). Nuestros principios buscan articular la gestión ideal de las aguas pluviales urbanas para la protección integral de los ecosistemas fluviales, reconociendo que es necesario superar los desafíos de implementación (Roy et al., 2008). Esta declaración de principios ideales busca fomentar la innovación en lugar de aceptar los impedimentos existentes y proponer objetivos subóptimos que aumentan el riesgo de degradación ecológica.

En esta sección, identificamos diversos desafíos técnicos, sociales, institucionales y de gobernanza para la implementación de nuestros principios (Tabla 1). Analizamos las posibles respuestas de los ecosistemas fluviales si ciertos elementos de los principios no se logran y abordamos cómo estas respuestas podrían diferir según el contexto fisiográfico.

Oportunidades insuficientes para la reducción del volumen

Podría decirse que el mayor desafío para aplicar nuestros principios de protección de los cursos de agua es encontrar maneras de perder (es decir, evitar que se convierta en flujo del curso de agua) el exceso de volumen de agua generado por la reducción de la evapotranspiración. Por ejemplo, en Melbourne, Australia, el exceso de volumen de escorrentía de aguas pluviales urbanas equivale a entre el 57% de la demanda total por persona en la parte más seca de la ciudad (400 mm/año de lluvia) y el 147% en la parte más húmeda (1200 mm/año) (Walsh et al. 2012). Por lo tanto, encontrar una demanda suficiente para el exceso de aguas pluviales urbanas en el contexto de los suministros de agua existentes es un desafío desde el principio. Es probable que otras ciudades del mundo con precipitaciones en un rango similar produzcan volúmenes similares de exceso de escorrentía. Sin embargo, quizás de forma contraria a la intuición, encontrar la demanda puede resultar más fácil en ciudades más densamente pobladas, donde la proporción de área impermeable por persona es menor.

Parte de la escorrentía pluvial puede perderse por evapotranspiración al regar la vegetación con agua de lluvia o mediante sistemas de infiltración con vegetación. Sin embargo, el área necesaria para perder todo el exceso de volumen por evapotranspiración probablemente sea prohibitiva en la mayoría de los entornos urbanos (Hamel et al., 2011, 2012). Las soluciones para la pérdida de agua requieren su almacenamiento, ya sea en el suelo, en sistemas de infiltración o en tanques. No obstante, si se encuentra una demanda suficiente (que no varíe estacionalmente), estos volúmenes de almacenamiento, y la ocupación de terreno necesaria para su almacenamiento, pueden ser pequeños (Mitchell et al., 2008; Walsh et al., 2014).

Las tecnologías para la captación de aguas pluviales están bien desarrolladas y se aplican en muchas partes del mundo (Fletcher et al., 2008). Sin embargo, el problema de encontrar suficiente demanda persiste, y se ve agravado por el desinterés o la resistencia generalizada de las autoridades hídricas a utilizar las aguas pluviales urbanas como fuente de agua. Estas barreras para encontrar demanda...

hacer que el principio 2 sea difícil de lograr en los marcos institucionales y de gobernanza actuales debido a la falta de oportunidades para reducir los volúmenes de escorrentía que llegan al arroyo.

Desafíos en el uso de tecnologías de infiltración y filtración para abordar la calidad y cantidad del agua

Las herramientas de infiltración y filtración (p. ej., cunetas de biofiltración, zanjas de infiltración, jardines de lluvia) se utilizan comúnmente para abordar simultáneamente los problemas de cantidad y calidad de las aguas pluviales (p. ej., Perrin et al. 2009, California Central Coast Regional Water Quality Control Board 2013). Incluso si los volúmenes de entrada a dichos sistemas se pueden reducir adecuadamente, persisten desafíos de diseño para la entrega de regímenes de flujo apropiados. Los sistemas de biorretención con descarga controlada muestran potencial (DeBusk et al. 2011), pero existen dificultades prácticas para proporcionar suficiente almacenamiento para imitar los largos tiempos de detención de los procesos naturales de flujo base y, al mismo tiempo, imitar el flujo más rápido que ocurre en el horizonte superior del suelo (Hamel et al. 2013). Una posible estrategia para ayudar a superar estos desafíos es preservar las vías de flujo de las tierras altas, que podrían, en el contexto urbano, actuar para recibir, transportar y amortiguar las contribuciones de los SCM aguas arriba.

Los sistemas de infiltración y filtración son eficaces para eliminar muchos contaminantes, pero las tecnologías de infiltración actuales no tratan adecuadamente varios contaminantes móviles, como el Cl- y ciertas clases de pesticidas, que no se eliminan mediante la sedimentación ni la atenuación del suelo. La eliminación inadecuada de contaminantes puede provocar la contaminación de aguas superficiales e incluso de aguas subterráneas poco profundas (Weiss et al., 2008; Foulquier et al., 2009). La sal para carreteras, un agente descongelante de uso común en climas fríos, puede aumentar la movilidad de los metales (Environment Canada y Health Canada, 2001) en los SCM. Además, la sal para carreteras puede perjudicar la eliminación de contaminantes en los SCM al disminuir el funcionamiento de la vegetación y los microbios del suelo (Environment Canada y Health Canada, 2001).

Se pueden implementar soluciones de diseño sencillas, como el uso de especies vegetales tolerantes a la salinidad, la ubicación de los SCM para evitar puntos críticos (Autoridad de Conservación de Toronto y la Región y Autoridad de Conservación de Credit Valley, 2010) y el dimensionamiento de los SCM para cumplir con los objetivos de rendimiento que consideran las variaciones estacionales del clima y el rendimiento (Roseen et al., 2009), para mantener gran parte de su funcionalidad. Sin embargo, estas estrategias no abordan los contaminantes urbanos móviles, para los cuales se requiere el control de la fuente (es decir, disponibilidad y uso restringidos) o, menos deseablemente, una filtración especializada.

Las variaciones extremas en la calidad y cantidad del agua también pueden dificultar el diseño de los SCM. Los eventos de caudal extremo son críticos para ciertos procesos de formación de cauces, pero los contaminantes asociados con los altos caudales en zonas urbanas son una fuente importante de deterioro de los cauces.

El tratamiento del deshielo es particularmente difícil, dado que la cantidad de nieve y el momento del deshielo primaveral son impredecibles temporal y espacialmente. El deshielo primaveral se asocia con niveles elevados de contaminantes, como metales y sal para carreteras, que se han almacenado en los mantos de nieve. La rápida liberación de contaminantes acumulados en el manto de nieve durante el deshielo genera tensiones en los arroyos que, de otro modo, no estarían presentes en entornos no urbanos.

En los casos donde el volumen de aguas pluviales no puede reducirse adecuadamente, los SCM basados en la infiltración pueden resultar en niveles freáticos elevados (Hamel et al. 2013, Liu et al. 2013), lo que puede, en algunos casos, movilizar contaminantes heredados que ya están en el agua subterránea, transportándolos hacia aguas superficiales receptoras (Roy y Bickerton 2012). El aumento de los flujos de infiltración, particularmente cuando se combina con otras fuentes de agua (como importaciones de agua e infraestructura con fugas) o la pérdida de bosques y la evapotranspiración reducida asociada, puede resultar en mayores flujos base (Price 2011, Hamel et al. 2013, Bhaskar et al. 2016). Este aumento en los flujos base puede resultar en que arroyos naturalmente intermitentes y efímeros se vuelvan perennes (Roy et al. 2009), lo que, a su vez, puede aumentar la riqueza de especies (Chadwick et al. 2012). Sin embargo, cualquier alteración de este tipo de comunidades bióticas en arroyos que anteriormente eran intermitentes probablemente tenga efectos perjudiciales para la biodiversidad nativa regional, en particular en regiones áridas con ríos intermitentes que albergan conjuntos específicamente adaptados al secado frecuente (Cooper et al. 2012, Steward et al. 2012).

Por lo tanto, los SCM de infiltración tienen el potencial de reducir los efectos de la urbanización sobre las aguas receptoras, pero su diseño debe considerar el contexto fisiográfico y el clima local, y deben usarse junto con otros SCM y herramientas de mitigación de la contaminación para proporcionar los regímenes de flujo y calidad del agua necesarios para la protección de los arroyos y su biota nativa.

Restricciones sociales, económicas, institucionales y de gobernanza

Persisten algunos desafíos técnicos para el logro de nuestros principios, pero los principales impedimentos para su adopción son sociales e institucionales (Brown y Farrelly, 2009). La gobernanza de las aguas pluviales urbanas puede ser difícil por diversas razones, como la resistencia al cambio, la financiación limitada, políticas obsoletas o inexistentes, la falta de liderazgo político y los limitados incentivos regulatorios (Brown, 2005; Roy et al., 2008). Los enfoques de diseño e implementación se arraigan en las organizaciones debido a su viabilidad y costos conocidos. Esto limita las oportunidades de utilizar tecnologías innovadoras, especialmente si las organizaciones son reacias al riesgo (Burns et al., 2015b). Los requisitos legislativos a menudo definen qué soluciones para aguas pluviales están permitidas y, por lo tanto, pueden limitar la innovación. Por ejemplo, la falta de directrices nacionales en EE. UU. sobre la captación en origen ha dado lugar a algunas...

códigos restrictivos que desalientan el uso del agua cosechada en interiores (Findlay 2008).

El proceso de desarrollo en la mayoría de las ciudades es una compleja red de códigos de transporte, drenaje, medio ambiente y construcción, que cuentan con medios y métodos arraigados que a menudo entran en conflicto entre sí. Todas las partes interesadas en el proceso compiten por espacio y dinero, por lo que es improbable que el establecimiento de prácticas de aguas pluviales que aumenten los costos o los requisitos de espacio tenga éxito sin un fuerte apoyo público para la protección de los ecosistemas fluviales o mandatos regulatorios estrictos. La percepción de los valores y servicios ecológicos que brindan los arroyos vecinales puede ser variable, pero su aceptación y apreciación se pueden mejorar mediante programas de participación y educación (Wagner 2008, Bos y Brown 2015). La percepción de los SCM como riesgos para la salud humana, ya sea por la exposición al agua contaminada o como atrayentes de plagas, como los mosquitos, se basa en gran medida en la forma en que se enmarcan cognitivamente los SCM y sus riesgos (Mankad et al. 2012). Nuestros principios podrían reformular los SCM al restar importancia a los grandes sistemas de final de proceso, como los humedales artificiales, que presentan ciertos riesgos (Jackson et al., 2009), y priorizar los sistemas de infiltración y captación a menor escala. Estos sistemas a pequeña escala también presentan riesgos —por ejemplo, la exposición a contaminantes por el uso directo de aguas pluviales o para la agricultura—, pero es probable que sean bajos y fáciles de gestionar (p. ej., Heyworth et al., 2006, Tom et al., 2013).

La implementación estratégica y generalizada de los MCS en las cuencas, como se describe en el principio 5, conlleva desafíos específicos. Dicha implementación requerirá la colaboración y el compromiso compartido de los distintos niveles de gobierno (Morison y Brown, 2010; Bos y Brown, 2012), la participación comunitaria generalizada (incluida la participación activa de los propietarios en la implementación de los MCS en sus propiedades; Bos y Brown, 2015), la combinación de actividades de modernización y planificación proactiva para garantizar la mitigación de los efectos del desarrollo futuro (Prosser et al., 2015) y un compromiso con programas a largo plazo, ya que el nivel de implementación necesario para obtener respuestas ecológicas tangibles probablemente tomará varios años.

Desde perspectivas institucionales y de gobernanza, la percepción de que la gestión de aguas pluviales para la protección de los cursos de agua conllevará mayores costos (de construcción y mantenimiento) y una mayor ocupación de tierras (Consejo Nacional de Investigación, 2009; Burns et al., 2015b) constituye uno de los principales obstáculos para la reforma. Los enfoques de gestión de aguas pluviales sugeridos en los principios son potencialmente costosos si se consideran de forma aislada de los beneficios que brindan (p. ej., provisión de fuentes de agua alternativas, mitigación de inundaciones, evitación de obras de restauración de cauces), y el costo potencial puede generar una gran oposición. Sin embargo, cualquier debate sobre los costos de dichos enfoques debe reconocer y, cuando sea posible, cuantificar los costos ambientales (debido a la falta de...

Servicios públicos y el costo de las obras de rehabilitación) de no implementar una gestión eficaz de las aguas pluviales. Nuestros principios podrían orientar dicho debate. En primer lugar, la ocupación de terrenos para los sistemas de captación se reduce con el aumento de la demanda, y la reducción del volumen, a su vez, reduce el tamaño requerido para los sistemas de infiltración (Walsh et al., 2014). En segundo lugar, los SCM dispersos, diseñados para cumplir con nuestros principios, pueden ofrecer diversos cobeneficios (que se analizan más adelante), lo que significa que el costo y el espacio para los SCM que protegen los arroyos pueden compartirse con otros beneficios.

OPORTUNIDADES DE COBENEFICIOS AL APLICAR LOS PRINCIPIOS

Muchos enfoques para la gestión de la escorrentía de aguas pluviales urbanas pueden proteger los arroyos y, al mismo tiempo, brindar beneficios adicionales a la comunidad (Walsh et al., 2012). Diversos investigadores han considerado los múltiples beneficios de la gestión integrada del agua urbana (p. ej., Jayasooriya y Ng, 2014). Sin embargo, al reorientar el enfoque de las SCM hacia escalas más pequeñas (en la fuente o cerca de ella) y priorizar la captación, nuestros principios ofrecen beneficios adicionales que, hasta la fecha, podrían haber sido subestimados en los análisis de costo-beneficio (Tabla 1). La consideración integral de estos beneficios adicionales podría influir en el equilibrio económico y favorecer enfoques de gestión de aguas pluviales que protejan los arroyos.

Suministro de agua

El ochenta por ciento de la población mundial vive en países donde la seguridad hídrica se ve amenazada (Vörösmarty et al., 2010). Las aguas pluviales urbanas tienen un gran potencial para reducir estas amenazas mediante el aumento del suministro de agua urbana. Este potencial debería crecer junto con la población mundial, ya que las nuevas superficies impermeables producen un exceso de escorrentía pluvial que debería captarse y aprovecharse. Las aguas pluviales urbanas ya se utilizan ampliamente para el riego de jardines y espacios abiertos, así como para usos no potables, como la lavandería y el inodoro (Mitchell et al., 2008). Estos enfoques pueden reducir sustancialmente la demanda de agua potable en las ciudades, pero generalmente se requieren mayores demandas para reducir adecuadamente los volúmenes destinados a la protección de los cursos de agua (Walsh et al., 2014). Estas demandas podrían satisfacerse, y la demanda de agua potable podría reducirse aún más sustancialmente en muchos contextos urbanos, si las aguas pluviales captadas se trataran hasta alcanzar un estándar de potabilización e incorporaran al suministro de agua potable (Wong et al., 2012). En resumen, la escorrentía de aguas pluviales urbanas presenta una oportunidad de suministro de agua hasta ahora subvalorada que podría proporcionar simultáneamente un servicio a la población humana y a los ecosistemas receptores de agua (Walsh et al. 2012).

Mitigación de inundaciones

Las inundaciones causadas por aguas pluviales pueden ser un problema importante en las cuencas urbanas. Con los enfoques convencionales de gestión de aguas pluviales, estas inundaciones suelen mitigarse.

(y potencialmente mitigado) al aumentar el tamaño de la infraestructura de aguas pluviales, como las cuencas de detención, donde la escorrentía se almacena temporalmente y se libera a tasas que se aproximan a la capacidad de las tuberías de aguas pluviales aguas abajo. Estos caudales a menudo superan los umbrales de erosión del canal (Mc-Cuen 1979) y, por lo tanto, agravan los efectos negativos de las aguas pluviales urbanas en los arroyos. Investigaciones recientes sugieren que la aplicación a pequeña escala de SCM es un enfoque viable y alternativo para la gestión de inundaciones. De hecho, Burns et al. (2015a) predijeron que la aplicación extensiva de tanques de agua de lluvia y zanjas de infiltración en una pequeña cuenca urbana podría mitigar las inundaciones relacionadas con las aguas pluviales incluso para tormentas relativamente infrecuentes (intervalo de recurrencia anual de 20 años). A escalas espaciales pequeñas (p. ej., <1 ha), estos eventos tienden a ser de corta duración y profundidad y podrían ser retenidos por SCM que cumplan con nuestros principios para la protección de arroyos. Por ejemplo, en Melbourne (Australia), la mayor parte de la lluvia se concentra en eventos discretos (separados por períodos secos) con una profundidad inferior a 25 mm (Oficina de Meteorología, 2015), similar en tamaño a las tormentas consideradas en el principio 3. Se requieren estudios futuros para evaluar los efectos de los SCM en inundaciones a gran escala, pero su potencial para mitigar los riesgos de inundación localizados es evidente. Los SCM que reducen el riesgo de inundación también pueden reducir la erosión y mantener los cauces aguas abajo, promoviendo la conectividad entre las zonas ribereñas y las llanuras aluviales (procesos importantes para la protección de los ríos, según el principio 1) (Hawley y Vietz, 2016).

Biodiversidad terrestre

Además de su utilidad para la gestión de caudales y la restauración de arroyos urbanos, los SCM pueden aumentar la biodiversidad terrestre en entornos urbanos. Los SCM afectan la biodiversidad directamente al imitar el hábitat perdido y proporcionar refugios para especies raras (Kadas 2006, Dearborn y Kark 2010, Madre et al. 2014) o indirectamente al servir como "trampolines" biológicos que aumentan la conectividad entre regiones fragmentadas de hábitat natural (Goddard et al. 2009, Braaker et al. 2014, Briers 2014). Los techos verdes, que pueden ser medidas útiles para el control de aguas pluviales, especialmente cuando se combinan con tecnologías de cosecha e infiltración (p. ej., Hilten et al. 2008), proporcionan una de las mejores evidencias de los cobeneficios de los SCM para la biodiversidad. Se ha reportado una alta diversidad de insectos en techos verdes (Oberndorfer et al. 2007). Los techos verdes también pueden ser particularmente útiles para restablecer hábitats de suelos poco profundos, como pavimentos rocosos, laderas de pedregal y acantilados, en climas templados. Estos hábitats son: 1) focos de diversidad vegetal y endemismo, y 2) propensos a persistir bien en condiciones adversas de los techos, que incluyen vientos fuertes, temperaturas extremas, radiación solar intensa y estrés hídrico (Oberndorfer et al., 2007). Dada la utilidad de los jardines y paisajes urbanos nativos para promover la conectividad (en particular, de las aves; White et al., 2005), las medidas de gestión de la conectividad distribuida y vegetada, como los jardines de lluvia y los espacios verdes bien irrigados por...

Es probable que las aguas pluviales acumuladas brinden beneficios similares en entornos urbanos.

Refrigeración urbana

Imitar los flujos previos al desarrollo urbanístico requiere la pérdida de grandes volúmenes de aguas pluviales de la cuenca (véase el principio 2). Parte de este excedente podría utilizarse para regar parques, jardines y arbolado urbano, mejorando así las zonas verdes de las ciudades. Los sistemas de infiltración también tienen el potencial de funcionar como jardines bien irrigados. En conjunto, estas acciones pueden reducir las temperaturas estivales y mejorar el confort térmico mediante la reposición de la humedad del suelo y el mantenimiento de la salud de los árboles, lo que resulta en un aumento de la evapotranspiración, la provisión de sombra y el enfriamiento de la superficie (Coutts et al., 2013). Los posibles efectos sobre la salud humana asociados con el enfriamiento urbano son considerables (M. Loughnan et al., 2010, ME Loughnan et al., 2010).

Resiliencia al cambio climático

Es probable que el cambio climático reduzca las precipitaciones y, por consiguiente, la escorrentía en muchas partes del mundo (Arnell, 1999). La reducción de los volúmenes de escorrentía de las cuencas permeables será mayor que la de las superficies impermeables. Por lo tanto, la escorrentía de aguas pluviales urbanas debería ser una fuente de agua más fiable ante los cambios a largo plazo en los patrones de precipitaciones. Además, las comunidades vegetales perennes, diversas y de raíces más profundas, que se generan con espacios verdes urbanos bien irrigados, también podrían mostrar una mayor resistencia, al estar protegidas de las inclemencias de un clima cada vez más riguroso.

Agricultura urbana

Los jardines bien irrigados, plantados con especies nativas y ornamentales, pueden atraer más polinizadores, lo que podría mejorar la productividad de la agricultura urbana a pequeña escala. Los jardines de lluvia, además de su función como SCM, tienen el potencial de ser fuentes productivas para la agricultura (Tom et al., 2013).

bienestar humano

Además de los beneficios directos que los espacios verdes aportan a la salud (van den Berg et al., 2010), la mayor biodiversidad que ofrece la retención de más agua en el paisaje urbano (para riego y en los SCM) también puede ser importante psicológicamente para los habitantes de las ciudades. La biodiversidad de plantas y aves se correlaciona positivamente con indicadores del bienestar humano, como la reflexión (capacidad de pensar y obtener perspectiva), el apego (vínculos emocionales con un espacio verde) y la identidad distintiva (sentirse único por la asociación con un espacio verde) (Fuller et al., 2007). Esta evidencia sugiere que los beneficios para la biodiversidad de la infraestructura verde de aguas pluviales tienen el potencial de ser de gran alcance y de mejorar la calidad de vida urbana, así como...

Preservación de especies locales, conectividad del hábitat y servicios ecosistémicos.

CONCLUSIÓN

Nuestro principal objetivo en este documento es articular cómo se debe gestionar el suelo y el agua urbana para maximizar las posibilidades de proporcionar a las ciudades y a sus habitantes arroyos saludables que sustenten la estructura y función ecológicas, y que proporcionen servicios ecosistémicos que, de otro modo, se degradarían con el drenaje pluvial urbano convencional. Nuestro interés en los resultados se centra en el arroyo, pero casi todos nuestros principios se centran en la cuenca, ya que es allí donde se genera el problema y, por lo tanto, donde deben encontrarse las soluciones. Los múltiples factores de estrés derivados de la escorrentía pluvial urbana se originan en cada tejado, calle y aparcamiento de nuestras ciudades, y la manera más eficaz de mitigarlos es mediante sistemas de gestión de aguas pluviales (SCM) adecuadamente diseñados y ubicados cerca de dichas fuentes.

Persisten desafíos técnicos que requieren soluciones innovadoras, en particular en lo que respecta a los sistemas de infiltración que pueden imitar adecuadamente la calidad del agua y los procesos hidrológicos de las cuencas predesarrolladas. Las innovaciones de diseño que maximizan múltiples beneficios sociales, incluyendo la protección de los cursos de agua, presentan desafíos (y oportunidades) secundarios. Desafortunadamente, los SCM se implementan cada vez más principalmente por esos otros beneficios, como la reducción en la demanda energética proporcionada por los techos verdes, sin una preocupación principal por su efecto en las aguas abajo (p. ej., la estrategia de construcción sostenible de Glasgow, analizada por Jones y Macdonald, 2007). Argumentamos que los SCM no deberían implementarse para obtener cobeneficios sin una evaluación coincidente de sus probables efectos en las aguas abajo. Por lo tanto, nuestros principios se presentan con el objetivo de reenfoque el diseño y la implementación de los SCM en la protección de los cursos de agua, al tiempo que reconocemos que los cobeneficios pueden ayudar a superar las barreras de implementación.

Sin embargo, los mayores desafíos para lograr dicho resultado son sociales y políticos. Por lo tanto, la mayor necesidad de innovación reside en los ámbitos de la gobernanza, la economía y la participación social. Dicha innovación requiere una clara articulación de los valores de los ecosistemas fluviales saludables y las acciones de gestión necesarias para lograrlos. Proponemos nuestros principios de gestión de aguas pluviales con este espíritu.

EXPRESIONES DE GRATITUD

Este documento surgió de una sesión de discusión en la 3ª Simposio sobre Urbanización y Ecología de Arroyos en Portland, Oregón, en mayo de 2014, financiado en parte por la subvención DEB 1427007 de la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (NSF). Los autores agradecen el apoyo financiero de las Asociaciones de la NSF para la Investigación y la Educación Internacionales (OISE-1243543, MAR); la subvención EPSCoR IIA 1208732 (RLH) de la NSF; la Ingeniería y la Física del Reino Unido.

Subvención EP/K013661/1 del Consejo de Investigación de Ciencias Médicas (LNH); Melbourne Water, a través de la Asociación de Investigación y Práctica de la Vía Navegable de Melbourne (CJW, MJB, TDF); y la Beca Futura del Consejo de Investigación Australiano (FT10010044, TDF). El uso de nombres comerciales, de empresas o de productos es solo con fines descriptivos y no implica el respaldo del Gobierno de los Estados Unidos.

LITERATURA CITADA

- Arnell, NW 1999. Cambio climático y recursos hídricos globales. *Cambio ambiental global* 9:531–549.
- Bhaskar, AS, L. Beesley, MJ Burns, TD Fletcher, P. Hamel, CE Oldham y AH Roy. 2016. ¿Aumentará o disminuirá? Gestión de los efectos complejos de la urbanización en el caudal base. *Freshwater Science* 35:293–310.
- Bhaskar, AS, y C. Welty. 2012. Balances hídricos a lo largo de un Gradiente urbano-rural del área metropolitana de Baltimore, 2001–2009. *Environmental and Engineering Geoscience* 18:37–50.
- Booth, DB 1991. Urbanización y el sistema de drenaje natural. Sistema: impactos, soluciones y pronósticos. *Northwest Environmental Journal* 7:93–118.
- Booth, DB, AH Roy, B. Smith y KA Capps. 2016. Perspectivas globales sobre el síndrome del arroyo urbano. *Freshwater Science* 35:412–420.
- Bos, DG y HL Brown. 2015. Superar las barreras a la comunicación. Participación comunitaria en un experimento a escala de cuenca: Generando confianza y cambiando comportamientos. *Freshwater Science* 34:1169–1175.
- Bos, JJ y RR Brown. 2012. Experimentación de gobernanza y factores de éxito en las transiciones sociotécnicas en el sector del agua urbana. *Pronóstico tecnológico y cambio social* 79:1340–1353.
- Braaker, S., J. Ghazoul, M. Obrist y M. Moretti. 2014. Habitabilidad: La conectividad de los tat configura las comunidades urbanas de artrópodos: el papel clave de los techos verdes. *Ecología* 95:1010–1021.
- Briers, RA 2014. Comunidades de invertebrados y medio ambiente- Condiciones ambientales en una serie de estanques de drenaje urbano en el este de Escocia: implicaciones para la biodiversidad y el valor de conservación de los SUDS. *Clean – Soil, Air, Water* 42:193–200.
- Brown, LR, TF Cuffney, JF Coles, F. Fitzpatrick, G. McMahon, J. Steuer, AH Bell y JT May. 2009a. Arroyos urbanos en Estados Unidos: lecciones aprendidas de estudios en nueve áreas metropolitanas. *Revista de la Sociedad Bentológica Norteamericana* 28:1051–1069.
- Brown, RR 2005. Impedimentos para la gestión integrada de aguas pluviales urbanas. *Gestión: la necesidad de una reforma institucional. Gestión Ambiental* 36:455–468.
- Brown, RR y MA Farrelly. 2009. Lograr un desarrollo sostenible. Gestión del agua urbana: una revisión de los obstáculos que enfrentamos. *Ciencia y Tecnología del Agua* 59(5):839–846.
- Brown, RR, N. Keath y THF Wong. 2009b. Agua urbana. Gestión del agua en las ciudades: regímenes históricos, actuales y futuros. *Ciencia y Tecnología del Agua* 59(5):847–855.
- Oficina de Meteorología. 2015. Intensidad de las precipitaciones, frecuencia y duración. Sistema de datos de precipitación. Oficina de Meteorología, Melbourne, Australia. (Disponible en: <http://www.bom.gov.au/water/design/Rainfalls/revise-ifd/>)
- Burns, MJ, TD Fletcher, CJ Walsh, AR Ladson y B. Hatt. 2013. Establecer objetivos para la restauración hidrológica: desde escala de sitio a escala de cuenca (Objectifs de restauration hydrologique: de l'échelle de la parcelale à celle du bassin versant). En *discoenj.-L. Bertrand-Krajewski y T. Fletcher* (editores). NOVATECH 2013. GRAIE, Lyon, Francia.
- Burns, MJ, TD Fletcher, CJ Walsh, AR Ladson y BE Hatt. 2012. Deficiencias hidrológicas de la gestión convencional de aguas pluviales urbanas y oportunidades de reforma. *Landscape and Urban Planning* 105:230–240.
- Burns, MJ, JE Schubert, TD Fletcher y BF Sanders. 2015a. Evaluación del impacto de la gestión de aguas pluviales en origen sobre las inundaciones urbanas mediante la combinación de modelos de propagación de redes y canales. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 2:291–300.
- Burns, MJ, E. Wallis y V. Matic. 2015b. Desarrollo de capacidades en la gestión del drenaje de bajo impacto mediante la colaboración en investigación. *Freshwater Science* 34:1176–1185.
- Control de calidad del agua regional de la costa central de California Junta. 2013. Resolución n.º R3-2013-0032, que aprueba los requisitos de gestión de aguas pluviales posteriores a la construcción para proyectos de desarrollo en la Región de la Costa Central. Junta Regional de Control de Calidad del Agua de California, San Luis Obispo, California. (Disponible en: http://www.waterboards.ca.gov/centralcoast/water_issues/programs/stormwater/docs/lid/hydromod_lid_docs/2013_0032resolution_signed.pdf)
- Chadwick, MA, JE Thiele, AD Huryn, AC Benke y DR Dobberfuhl. 2012. Efectos de la urbanización sobre los macroinvertebrados en afluentes del río St. Johns, Florida, EE. UU. *Ecosistemas urbanos* 15:347–365.
- Cooper, SD, PS Lake, S. Sabater, JM Melack y JL Sabo. 2012. Efectos de los cambios de uso del suelo en arroyos y ríos en climas mediterráneos. *Hidrobiología* 719:383–425.
- Coutts, AM, NJ Tapper, J. Beringer, M. Loughnan y M. Demuzere. 2013. Riego de nuestras ciudades: la capacidad del diseño urbano sensible al agua para favorecer la refrigeración urbana y mejorar el confort térmico humano en el contexto australiano. *Progress in Physical Geography* 37:2–28.
- Dearborn, DC, y S. Kark. 2010. Motivaciones para la conservación Biodiversidad urbana. *Biología de la Conservación* 24:432–440.
- DeBusk, KM, WF Hunt y DE Line. 2011. Biorretención. Flujo de salida: ¿imita el flujo superficial de una cuenca hidrográfica no urbana? *Revista de Ingeniería Hidrológica* 16:274–279.
- Doyle, MW, y ES Bernhardt. 2011. ¿Qué es un arroyo? *Ciencia y Tecnología Ambiental* 45:354–359.
- Elmore, AJ y SS Kaushal. 2008. Desaparición de cabeceras: Patrones de enterramiento fluvial debido a la urbanización. *Fronteras en Ecología y Medio Ambiente* 6:308–312.
- Medio Ambiente Canadá y Salud Canadá. 2001. Medio Ambiente Canadiense Ley de Protección Ambiental de 1999—Informe de Evaluación de la Lista de Sustancias Prioritarias—Sales para Carreteras. Gatineau, Quebec, Canadá. (Disponible en: http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/contaminants/psl2-lsp2/road_salt_sels_voierie/index-eng.php)
- Findlay, D. 2008. Recolección de agua de lluvia, legislación hídrica y clima. Cambio: una avalancha de problemas a punto de ocurrir. *Revista de Derecho y Tecnología de Carolina del Norte* 10:74–95.
- Fletcher, TD, A. Deletic, VG Mitchell y BE Hatt. 2008. Reutilización de la escorrentía urbana en Australia: una revisión de los avances recientes y los desafíos pendientes. *Revista de Calidad Ambiental* 37:5116–5127.

- Fletcher, TD, W. Shuster, WF Hunt, R. Ashley, D. Butler, S. Arthur, S. Trowsdale, S. Barraud, A. Semádeni-Davies y J.-L. Bertrand-Krajewski. 2015. SUDS, LID, BMP, WSUD y más: la evolución y aplicación de la terminología relacionada con el drenaje urbano. *Urban Water Journal* 12:525–542. Foulquier, A., F. Malard, S. Barraud y J. Gibert. 2009. Ther- Influencia negativa de la recarga de aguas subterráneas urbanas desde cuencas de infiltración de aguas pluviales. *Procesos Hidrológicos* 23:1701–1713.
- Fuller, RA, KN Irvine, P. Devine-Wright, PH Warren y KJ Gaston. 2007. Los beneficios psicológicos de los espacios verdes aumentan con la biodiversidad. *Biology Letters* 3:390–394. Goddard, MA, AJ Dougill y TG Benton. 2009. Escalamiento. Desde los jardines: conservación de la biodiversidad en entornos urbanos. *Tendencias en Ecología y Evolución* 25:90–98.
- Graf, WL 1977. Características de la red en la suburbanización Arroyos. *Investigación de Recursos Hídricos* 13:459–463.
- Graham, CB, RA Woods y JJ McDonnell. 2010. Ladera Respuesta umbral a la lluvia: (1) un enfoque forense de campo. *Journal of Hydrology* 393:65–76.
- Greenway, M. 2010. Humedales y estanques para el tratamiento de aguas pluviales. Gestión de la biodiversidad en Australia subtropical: ¿su eficacia para mejorar la biodiversidad y la calidad del agua? *Revista de Investigación y Educación Contemporánea del Agua* 146:22–38.
- Groffman, PM, DJ Bain, LE Band, KT Belt, GS Brush. JM Grove, RV Pouyat, IC Yesilonis y WC Zipperer. 2003. Junto al río: ecología urbana ribereña. *Fronteras en Ecología y Medio Ambiente* 1:315–321.
- Hale, RL, M. Scoggins, NJ Smucker y A. Suchy. 2016. Efectos del clima en la expresión del síndrome del arroyo urbano. *Freshwater Science* 35:421–428.
- Hamel, P., E. Daly y TD Fletcher. 2013. Control de fuente Gestión de aguas pluviales para mitigar los impactos de la urbanización en el caudal base: una revisión. *Journal of Hydrology* 485:201–211.
- Hamel, P., TD Fletcher, E. Daly y J. Beringer. 2012. Agua Retención de agua por jardines de lluvia: implicaciones para la humedad del suelo y los flujos de agua a escala local. Páginas 137–144 en WSUD 2012: Diseño urbano sensible al agua; Construyendo la comunidad sensible al agua; 7ª Conferencia Internacional sobre Diseño Urbano Sensible al Agua. Engineers Australia, Barton, Territorio de la Capital Australiana, Australia.
- Hamel, P., TD Fletcher, CJ Walsh, J. Beringer y E. Plessis. 2011. Balance hídrico de los sistemas de infiltración en relación con su entorno operativo. 12ª Conferencia Internacional sobre Drenaje Urbano (ICUD), Porto Alegre, Brasil. Asociación Internacional del Agua, Londres, Reino Unido.
- Hatt, BE, TD Fletcher y A. Deletic. 2009. Eliminación de contaminantes. Rendimiento de sistemas de biofiltración de aguas pluviales a escala de campo. *Ciencia y Tecnología del Agua* 59.8:1567–1576.
- Hawley, RJ y GJ Vietz. 2016. Abordando el flujo urbano Régimen de perturbación. *Freshwater Science* 35:278–292.
- Heyworth, JS, G. Glonek, E. Maynard, P. Baghurst y J. Finlay-Jones. 2006. Consumo de agua de lluvia de cisterna sin tratar y gastroenteritis en niños pequeños de Australia Meridional. *Revista Internacional de Epidemiología* 35:1051–1058.
- Hill, PI, U. Maheepala y RG Mein. 1996. Análisis empírico Análisis de datos para derivar pérdidas para la estimación de inundaciones en el sureste de Australia. Informe 96/5. Centro de Investigación Cooperativa. Hidrología de Cuencas, Melbourne, Australia. (Disponible en: <http://www.ewater.com.au/archive/crcch/archive/pubs/pdfs/technical199605.pdf>)
- Hilten, RN, TM Lawrence y EW Tollner. 2008. Modelo-Escorrentía de aguas pluviales de techos verdes con HYDRUS-1D. *Revista de Hidrología* 358:288–293.
- Horner, R., C. W. May, E. Livingston, D. Blaha, M. Scoggins, J. Tims y J. Maxted. 2001. Mejores prácticas de gestión (BMP) estructurales y no estructurales para la protección de arroyos. Páginas 60–77 en B. Urbonas (editor). Vinculación del diseño y el rendimiento de las BMP para aguas pluviales con la mitigación del impacto en las aguas receptoras. Conferencia de la Fundación de Investigación en Ingeniería. Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, Snowmass, Colorado.
- Hunt, WF, AP Davis y RG Traver. 2011. Reunión hidro-Objetivos lógicos y de calidad del agua mediante un diseño de biorretención específico. *Revista de Ingeniería Ambiental* 138:698–707. Jackson, CR, DS Leigh, SL Scarbrough y JF Chamblee. 2014. Vegetación riparia herbácea versus arbolada: hábitat fluvial estrecho y simple versus amplio, leñoso y diverso. *Investigación y Aplicaciones Fluviales*. doi:10.1002/rra.2783
- Jackson, MJ, JL Gow, MJ Evelyn, NE Meikleham, TJS McMahon, E. Koga, TJ Howay, L. Wang y E. Yan. 2009. Culex Mosquitos, virus del Nilo Occidental y la aplicación de una gestión innovadora en el diseño y la gestión de estanques de retención de aguas pluviales en Canadá. *Revista de Investigación sobre la Calidad del Agua de Canadá* 44:103–110.
- Jarvis, N. 2007. Una revisión del flujo de agua en desequilibrio y Transporte de solutos en los macroporos del suelo: principios, factores de control y consecuencias para la calidad del agua. *Revista Europea de Ciencias del Suelo* 58:523–546.
- Jayasooriya, V. y A. Ng. 2014. Herramientas para el modelado de tormentas. Gestión del agua y economía de las prácticas de infraestructura verde: una revisión. *Contaminación del agua, el aire y el suelo* 225:1–20.
- Jones, P. y N. Macdonald. 2007. Creando espacio para la indisciplina Agua: sistemas de drenaje sostenibles y control de la escorrentía superficial. *Geoforum* 38:534–544.
- Kadas, G. 2006. Invertebrados raros que colonizan techos verdes en Londres. *Hábitats urbanos* 4:66–86.
- Karr, JR 1999. Definición y medición de la salud de los ríos. *Agua dulce-ter Biología* 41:221–234.
- Karvonen, A. 2011. Políticas de escorrentía urbana: naturaleza, tecnología, y la ciudad sostenible. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. Condado de King. 1990. Manual de diseño de aguas superficiales. Condado de King. Departamento de Obras Públicas, División de Gestión de Aguas Superficiales, Seattle, Washington. (Disponible en: http://your.kingcounty.gov/dnrp/library/water-and-land/stormwater/1990_SWDM.pdf)
- King, RS y ME Baker. 2011. Una visión alternativa de la ecología. Umbrales de la comunidad cal y análisis apropiados para su detección: comentario. *Aplicaciones Ecológicas* 21:2833–2839. Konrad, CP y DB Booth. 2005. Cambios hidrológicos en Arroyos urbanos y su importancia ecológica. *Simposio de la Sociedad Americana de Pesca* 47:157–177.
- Liu, G., F. W. Schwartz y Y. Kim. 2013. Flujo base complejo en arroyos urbanos: un ejemplo del centro de Ohio, EE.UU. *Environmental Earth Sciences* 70:3005–3014.
- Loughnan, M., N. Nicholls y N. Tapper. 2010. Mortalidad-Umbrales de temperatura en diez importantes centros de población de la zona rural de Victoria, Australia. *Health and Place* 16:1287–1290.

- Loughnan, ME, N. Nicholls y NJ Tapper. 2010. El efecto Efectos de la temperatura estival, la edad y las circunstancias socioeconómicas en los ingresos por infarto agudo de miocardio en Melbourne, Australia. *Revista Internacional de Geografía de la Salud* 9:41.
- Madre, F., A. Vergnes, N. Machon y P. Clergeau. 2014. Verde Techos como hábitat para especies vegetales silvestres en paisajes urbanos: primeros hallazgos de un muestreo a gran escala. *Paisaje y Planificación Urbana* 122:100-107.
- Mankad, A. 2012. Sistemas de agua descentralizados: influencia emocional Influencias en la toma de decisiones sobre recursos. *Environment International* 44:128-140.
- Martín, P., B. Turner, K. Waddington, C. Pratt, N. Campbell, J. Payne y B. Reed. 2000. *Sistemas de drenaje urbano sostenible: manual de diseño para Escocia e Irlanda del Norte*. C521. CIRIA, Londres, Reino Unido.
- May, CW y RR Horner. 2002. Las limitaciones de la mitigación-Gestión de aguas pluviales basada en la gestión de aguas pluviales en el noroeste del Pacífico y el potencial de una estrategia de conservación basada en principios de desarrollo de bajo impacto. Páginas 1-16 en EW Strecker y WC Huber (editores). 9ª Conferencia Internacional sobre Drenaje Urbano, Soluciones Globales para el Drenaje Urbano, Portland, Oregón. Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, Reston, Virginia. McClain, ME, EW Boyer, CL Dent, SE Gergel, NB Grimm, P. M. Groffman, S. C. Hart, J. W. Harvey, C. A. Johnston, E. Mayorga, W. H. McDowell y G. Pinay. 2003. Puntos calientes biogeoquímicos y momentos calientes en la interfaz de los ecosistemas terrestres y acuáticos. *Ecosistemas* 6:301-312. McCuen, R. H. 1979. Efectos aguas abajo de la gestión de aguas pluviales. Cuencas de abastecimiento. *Revista de la División de Hidráulica. Actas de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles* 105:1343-1356.
- Meyer, J. L. y J. B. Wallace. 2001. Enlaces perdidos y estructuras lóaticas. *Ecología: redescubriendo los pequeños arroyos*. Páginas 295-317 en MC Press, NJ Huntly y S. Levin (editores). *Ecología: logros y desafíos*. Blackwell Science, Londres, Reino Unido.
- Mitchell, VG, D. McCarthy, A. Deletic y TD Fletcher. 2008. Sensibilidad de las relaciones entre capacidad de almacenamiento, fiabilidad y rendimiento de la captación de aguas pluviales urbanas a la selección del método de análisis del comportamiento. *Environmental Modelling and Software* 23:782-793.
- Morison, PJ y RR Brown. 2010. Evitando la presunción- Errores de política ambiental en programas intergubernamentales de planificación: un análisis de caso de planificación de la gestión de aguas pluviales urbanas. *Revista de Planificación y Gestión Ambiental* 53:197-217. Consejo Nacional de Investigación. 2009. *Gestión de aguas pluviales urbanas. miento en los Estados Unidos*. The National Academies Press, Washington, DC.
- Oberndorfer, E., J. Lundholm, B. Bass, RR Coffman, H. Doshi, N. Dunnett, S. Gaffin, M. Köhler, KK Liu y B. Rowe. 2007. Techos verdes como ecosistemas urbanos: estructuras, funciones y servicios ecológicos. *BioScience* 57:823-833.
- Palmer, MA, ES Bernhardt, JD Allan, PS Lake, G. Alex-Ander, S. Brooks, J. Carr, S. Clayton, CN Dahm, J. Follstad-Shah, DL Galat, S. G. Loss, P. Goodwin, DD Hart, B. Hassett, R. Jenkinson, G. M. Kondolf, R. Lave, J. L. Meyer, T. K. O'Donnell, L. Pagano y E. Sudduth. 2005. Estándares para una restauración fluvial ecológicamente exitosa. *Journal of Applied Ecology* 42:208-217.
- Palmer, MA, S. Filoso y RM Fanelli. 2014. De los ecosistemas A los servicios ecosistémicos: la restauración de arroyos como ingeniería ecológica. *Ingeniería Ecológica* 65:62-70.
- Parr, TB, NJ Smucker, CN Bentsen y MW Neale. 2016. Posibles funciones de las características de urbanización pasadas, presentes y futuras en la generación de respuestas fluviales variadas. *Freshwater Science* 35:436-443.
- Paul, MJ, y JL Meyer. 2001. Arroyos en el paisaje urbano. *Revista Anual de Ecología y Sistemática* 32:333-365. Perrin, C., L. Milburn, L. Szpir, W. Hunt, S. Bruce, R. McLendon, S. Job, D. Line, D. Lindbo, S. Smutko, H. Fisher, R. Tucker, J. Calabria, K. Debusk, K.C. Cone, M. Smith-Gordon, J. Spooner, T. Blue, N. Deal, J. Lynn, D. Rashash, R. Rubin, M. Senior, N. White, D. Jones y W. Eaker. 2009. *Desarrollo de bajo impacto: una guía para Carolina del Norte*. AG-716. Servicio de Extensión Cooperativa de Carolina del Norte, Universidad Estatal de Carolina del Norte, Raleigh, Carolina del Norte. (Disponible en: <http://www.ncsu.edu/WECO/LID>)
- Poff, NL, JD Allan, MB Bain, JR Karr, KL Prestegard, BD Richter, RE Sparks y JC Stromberg. 1997. El régimen de flujo natural. *BioScience* 47:769-784.
- Price, K. 2011. Efectos de la topografía de las cuencas hidrográficas, los suelos y el uso de la tierra, y el clima en la hidrología del caudal base en regiones húmedas: una revisión. *Progreso en Geografía Física* 35:465-492. Departamento de Medio Ambiente del Condado de Prince George, Maryland Recursos. 1999. *Estrategias de diseño para desarrollos de bajo impacto: un enfoque de diseño integrado*. Departamento de Recursos Ambientales, Condado de Prince George, Largo, Maryland. (Disponible en: <http://water.epa.gov/polwaste/green/upload/lidnatl.pdf>) Prosser, T., P.J. Morison y R.A. Coleman. 2015. Integración Gestión de aguas pluviales para la restauración de un arroyo: perspectivas desde una autoridad de gestión de vías fluviales. *Freshwater Science* 34:1186-1194.
- Pusey, BJ y AH Arthington. 2003. Importancia de la ribera-Zona costera para la conservación y el manejo de peces de agua dulce: una revisión. *Investigación Marina y de Agua Dulce* 54:1-16. Roseen, RM, TP Ballester, JJ Houle, P. Avellaneda, J. Briggs, G. Fowler y R. Wildey. 2009. Variaciones estacionales del rendimiento de los sistemas de gestión de aguas pluviales en climas fríos. *Journal of Environmental Engineering* 135:128-137.
- Roy, AH, AL Dybas, KM Fritz y HR Lubbers. 2009. La urbanización afecta la extensión y la permanencia hidrológica de los cursos de agua de cabecera en un área metropolitana del medio oeste de Estados Unidos. *Revista de la Sociedad Bentológica de Norteamérica* 28:911-928.
- Roy, AH, LK Rhea, AL Mayer, WD Shuster, JJ Beaulieu, ME Hopton, MA Morrison y AS Amand. 2014. ¿Cuánto es suficiente? Respuestas mínimas de la calidad del agua y la biota fluvial a la modernización parcial de la gestión de aguas pluviales en un barrio suburbano. *PLoS ONE* 9:e85011. Roy, AH, SJ Wenger, TD Fletcher, CJ Walsh, AR Ladson. WD Shuster, HW Thurston y RR Brown. 2008. Impedimentos y soluciones para la gestión sostenible de aguas pluviales urbanas a escala de cuencas hidrográficas: lecciones de Australia y Estados Unidos. *Gestión Ambiental* 42:344-359.
- Roy, JW y G. Bickerton. 2012. Contaminación tóxica de las aguas subterráneas. Invertebrados: ¿un factor infravalorado del síndrome del arroyo urbano? *Environmental Science and Technology* 46:729-736.

- Schueler, TR 1987. Control de la escorrentía urbana: una gestión práctica Estándares para la planificación y el diseño de Mejores Prácticas de Gestión (BMP) urbanas. Consejo Metropolitano de Gobiernos de Washington, Washington, D. C.
- Smakhtin, V. 2001. Hidrología de bajo caudal: una revisión. *Revista de Hidrología* 240:147-186.
- Smith, RF, RJ Hawley, MW Neale, GJ Vietz, E. Díaz-Pascacio, J. Herrmann, AC Lovell, C. Prescott, B. Rios-Touma, B. Smith y RM Utz. 2016. Renovación de arroyos urbanos: incorporación de objetivos sociales para lograr mejoras ecológicas. *Freshwater Science* 35:364-379.
- Steward, AL, D. von Schiller, K. Tockner, JC Marshall y SE Bunn. 2012. Cuando el río se seca: valores humanos y ecológicos de los cauces secos. *Fronteras en Ecología y Medio Ambiente* 10:202-209.
- Tanaka, T., M. Yasuhara, H. Sakai y A. Marui. 1988. El Estudio de la Cuenca Experimental de Hachioji: Procesos de escorrentía pluvial y su mecanismo de generación. *Revista de Hidrología* 102:139-164.
- Taylor, GD, TD Fletcher, THF Wong, PF Breen y HP Duncan. 2005. Composición del nitrógeno en la escorrentía urbana: implicaciones para la gestión de aguas pluviales. *Water Research* 39: 1982-1989.
- Tom, M., PJ Richards, DT McCarthy, TD Fletcher, C. Farrell, NS Williams y K. Milenkovic. 2013. Convertir el agua (de lluvia) en alimentos: beneficios y riesgos de los huertos pluviales. 8ª Conferencia internacional sobre técnicas y estrategias sostenibles en la gestión del agua urbana. NOVA-TECH 2013. GRAIE, Lyon, Francia.
- Autoridad de Conservación de Toronto y la Región y Credit Valley Autoridad de Conservación. 2010. Guía de planificación y diseño para la gestión de aguas pluviales en desarrollos de bajo impacto. Toronto, Ontario, Canadá. (Disponible en: <http://sustainabletechnology.ca/wp/publications/publications-low-impact-development>) van den Berg, AE, J. Maas, RA Verheij y PP Groe-Newegen. 2010. Los espacios verdes como amortiguador entre eventos vitales estresantes y la salud. *Ciencias Sociales y Medicina* 70:1203-1210. Comité de Aguas Pluviales de Victoria. 1999. Aguas pluviales urbanas: la mejor opción. Directrices prácticas de gestión ambiental. CSIRO, Melbourne, Australia.
- Vietz, G., M. Stewardson, CJ Walsh y TD Fletcher. 2012. Otra razón por la que los arroyos urbanos están congestionados: historia geomorfológica, desafíos y oportunidades. Páginas 110-115 en JR Grove e ID Rutherford (editores). *Actas del 6ª Conferencia Australiana de Gestión de Arroyos, Gestión para Extremos*. Sociedad de Gestión de Cuencas Fluviales, Canberra, Australia. Vörösmarty, CJ, P. Green, P. B. McIntyre, M. O. Gessner, D. Dudgeon, A. Prusevich, P. Green, S. Glidden, SE Bunn, CA Sullivan, CR Liermann y PM Davies. 2010. Amenazas globales a la seguridad hídrica humana y la biodiversidad fluvial. *Nature* 467:555-561.
- Wagner, MM 2008. ¿Aceptación por conocimiento? La con- Texto sobre las zonas de amortiguamiento ribereño urbano como práctica recomendada para la gestión de aguas pluviales. *Sociedad y Recursos Naturales* 21:908-920.
- Walsh, CJ 2004. Impactos de los humedales de tratamiento de aguas pluviales en Macroinvertebrados fluviales: estudio de cuatro humedales construidos por Melbourne Water en arroyos del este de Melbourne. Centro de Estudios del Agua, Universidad de Monash, Melbourne, Australia. (Disponible en: http://www.urbanstreams.unimelb.edu.au/cwalsh/docs/NHT_wetland_bugs_Final_report.pdf)
- Walsh, CJ, RL Eddy, TD Fletcher y M. Potter. 2014. Viabilidad y costo de la gestión de aguas pluviales para la protección de arroyos a nivel de propiedad, calle y distrito. Informe Técnico 14-1 de la Asociación de Investigación y Práctica de Vías Fluviales de Melbourne. Universidad de Melbourne, Melbourne, Australia. (Disponible en: http://www.urbanstreams.unimelb.edu.au/MWRPPDocs/14.1_Scaled_stormwater_management_-_Summary.pdf)
- Walsh, CJ, TD Fletcher y MJ Burns. 2012. Urbano Escorrentía de aguas pluviales: una nueva clase de problema de flujo ambiental. *PLoS ONE* 7:e45814.
- Walsh, CJ y J. Kunapo. 2009. La importancia de las tierras altas Trayectorias de flujo en la determinación de los efectos urbanos en los ecosistemas fluviales. *Revista de la Sociedad Bentológica Norteamericana* 28:977-990.
- Walsh, CJ, AH Roy, JW Feminella, PD Cottingham, PM Groffman y R. P. Morgan. 2005. El síndrome del arroyo urbano: conocimiento actual y la búsqueda de una cura. *Revista de la Sociedad Bentológica Norteamericana* 24:706-723.
- Walsh, C. J. y J. A. Webb. 2016. Efectos interactivos del arroyo urbano. Drenaje de aguas pluviales, desmonte y régimen de caudal en conjuntos de macroinvertebrados fluviales en una gran región metropolitana. *Freshwater Science* 35:324-339.
- Weiss, PT, G. LeFevre y JS Gulliver. 2008. Contaminación del suelo y las aguas subterráneas debido a prácticas de infiltración de aguas pluviales: una revisión bibliográfica. Proyecto de Evaluación de Aguas Pluviales de la Universidad de Minnesota, Minneapolis, Minnesota. (Disponible en: <http://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/115341/pr515.pdf?sequence=1&isAllowed=y>)
- Whelans, C., HG Maunsell y P. Thompson. 1994. Planificación y directrices de gestión para el diseño urbano (residencial) sensible al agua. Departamento de Planificación y Desarrollo Urbano de Australia Occidental, Perth, Australia.
- White, JG, MJ Antos, JA Fitzsimons y GC Palmer. 2005. Asociaciones de aves no uniformes en entornos urbanos: la influencia de la vegetación urbana. *Paisaje y Planificación Urbana* 71:123-135.
- Wong, THF, R. Allen, J. Beringer, RR Brown, A. Deletic, TD Fletcher, L. Gangadharan, W. Gernjak, C. Jakob, T. O'Loan, M. Reeder, N. Tapper y CJ Walsh. 2012. *Blueprint2012: gestión de aguas pluviales en una ciudad sensible al agua*. Centro para Ciudades Sensibles al Agua, Universidad de Monash, Melbourne, Australia.
- Woods-Ballard, B., R. Kellagher, P. Martin, C. Jefferies, R. Bray, y P. Shaffer. 2007. *El manual SUDS*. CIRIA, Londres, Reino Unido.
- Zhang, L., WR Dawes y GR Walker. 2001. Respuesta de Cambios en la evapotranspiración media anual y la vegetación a escala de cuenca. *Water Resources Research* 37:701-708.