

Implementación de Facilidades de Bioretención como una Alternativa para el Manejo de Inundaciones Urbanas en Puerto Rico

Norah L. Pérez Cruz

Maestría en Ciencia y Tecnología Geoespacial

Supervisor: Prof. Raúl Matos Flores

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y Agrimensura

Universidad Politécnica de Puerto Rico

Resumen — *La impermeabilización de la zona metropolitana del país por medio del proceso de urbanización provoca que el problema de inundaciones urbanas sea cada vez más grave y recurrente. El desarrollo de proyectos sostenibles es necesario si se desea lidiar de forma más eficiente con los efectos provocados por las inundaciones urbanas. Los jardines de bioretención son Desarrollos de Bajo Impacto (LID por sus siglas en inglés) capaces de manejar de forma eficaz las aguas pluviales. Los mismos, además de reducir significativamente la escorrentía y contaminantes, son desarrollos que conllevan beneficios económicos y sociales. Con el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es posible identificar terrenos propicios para la creación de una red de facilidades de bioretención. Durante este estudio se desarrolló un método identificar espacios donde puedan desarrollarse facilidades de bioretención, prestando especial atención a la distribución espacial en los predios del centro comercial San Patricio.*

Palabras Clave — *Bioretención, Inundaciones Urbanas, Mitigación, Sistemas de Información Geográfica.*

INTRODUCCIÓN

La expansión urbana es un fenómeno que modifica nuestro entorno físico y social de manera significativa. Los cambios que resultan de dicho fenómeno suelen pasar desapercibidos por la mayoría debido, entre otras razones, al ritmo de vida acelerado que se experimenta en las ciudades. Sin embargo, cuando el desparrame urbano se combina con factores tales como la toma de decisiones de construcción desacertadas, la falta de mantenimiento de infraestructuras, entre otros, la

calidad de vida de los que residen y trabajan en las zonas metropolitanas del país se ve afectada.

Uno de los problemas más recurrentes y destructivos derivados de la expansión urbana son las inundaciones, problema que se hace evidente sólo después de haber generado pérdidas sociales y económicas. La falta de métodos de mitigación eficientes suele complicar el evento de inundación, prolongando el tiempo de recuperación luego del mismo.

“Este problema se agrava aún más debido a la naturaleza evolutiva del riesgo de inundación, en particular con respecto al clima y los cambios socioeconómicos. La gama plausible de futuros cambios climáticos incluye una incertidumbre significativa, que presenta a los encargados de la toma de decisiones grandes desafíos con respecto a la planificación a largo plazo.” [1]

Durante la revisión bibliográfica llevada a cabo para desarrollar esta investigación no se pudo detectar la existencia de propuestas para implementar proyectos sostenibles para la mitigación de inundaciones urbanas. Los estudios que se han llevado a cabo en la isla con respecto a este tema son escasos, y a menudo sólo presentan proyectos de ingeniería como alternativas de mitigación.

Ante la escasez de propuestas para resolver el problema de inundaciones urbanas en la isla, se recomienda la creación de un movimiento multidisciplinario y multisectorial para desarrollar proyectos sostenibles que logren una reducción parcial o total del problema de inundaciones. Por tal razón, el objetivo principal de este estudio es identificar áreas viables mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG), y proponer que en ellas se establezca una red de facilidades de bioretención como un método para

mitigar los daños producidos por los eventos de inundaciones urbanas en los predios y zonas adyacentes al centro comercial San Patricio.

FACTOR CLIMÁTICO

Debido a las características geográficas y climatológicas de la isla, los eventos de precipitación fuerte son parte del diario vivir de la mayoría de los puertorriqueños. Sin embargo, debido al desparrame urbano, al igual que la magnitud y recurrencia de los eventos de lluvia extrema, las inundaciones urbanas son cada vez más frecuentes.

Durante las cumbres internacionales sobre cambio climático se ha discutido la relación que existe entre el calentamiento global y el incremento en el riesgo de eventos extremos, entre éstos largos periodos de sequía e inundaciones [2]. Una posible evidencia del cambio climático en la región es la serie de eventos de gran intensidad registrados en la isla durante los últimos 5 años; tales como el evento de inundaciones ocurrido el 18 de julio de 2013, fenómeno que estableció récord de 9.23 pulgadas de lluvia en la zona del aeropuerto Luis Muñoz Marín [3], la sequía de 2015, cuando la isla experimentó uno de los periodos secos más severos en su historia [4] y el impacto del huracán Irma y María en septiembre de 2017.

Los fenómenos atmosféricos que causan la mayoría de los eventos de precipitación fuerte en la región son las ondas tropicales y el frente-frío. Los primeros coinciden con la llamada temporada de huracanes del Atlántico, entre mayo y noviembre. Dichos fenómenos provienen de la costa oeste de África, distancia que muchas veces favorece su fortalecimiento, llegando incluso a convertirse en tormentas y huracanes. Por su parte, los frente-frío ocurren entre los meses de noviembre a abril, siendo dos de sus características principales la precipitación y los eventos de marejada fuerte [5]. Estos datos reflejan de manera obvia que Puerto Rico está expuesto a condiciones climáticas adversas durante todo el año, razón por la cual se

debe crear un sistema integrado y multisectorial para la mitigación de inundaciones.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA METROPOLITANA Y SU VULNERABILIDAD ANTE INUNDACIONES URBANAS

A partir de la observación de los últimos eventos de inundaciones urbanas en el país, es evidente que algunos de los parámetros requeridos para realizar una buena toma de decisiones sobre desarrollo urbano tales como precipitación, topografía, drenaje, etc. son raramente considerados. Esto causa que la mayoría de nuestras ciudades sean propensas a inundaciones [6].

Las características geográficas, climatológicas y demográficas de la isla exigen de una manera u otra ser responsable a la hora de tomar decisiones sobre el desarrollo urbano, pues son muchas las pérdidas sociales y económicas que se registran cada vez que sucede un evento de inundación urbana (Fig. 1)



Figura 1
Inundación en el Estacionamiento de San Patricio Shopping Center, Guaynabo [7]

Según un estudio realizado en el 2011 por el Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico (que aún no ha sido publicado), las siete razones principales para este fenómeno en la Isla son:

- Planificación y diseño inadecuado.
- Constante desarrollo de la zona metropolitana y la disminución de áreas verdes.
- Topografía.
- Falta de capacidad hidráulica de cuerpos de agua receptores.

- Falta de capacidad hidráulica de sistemas de alcantarillado pluvial.
- Falta de capacidad de parrillas o aperturas de los registros pluviales.
- Falta de mantenimiento a los sistemas pluviales [8].

Si bien es cierto que todos los factores antes mencionados influyen en mayor o menor grado a la ocurrencia de inundaciones urbanas, la raíz del problema es el constante desarrollo urbano y la disminución y/o eliminación de áreas verdes. La impermeabilización de las ciudades sobrepasa por mucho las zonas verdes que permiten la percolación de la lluvia, ocasionando un aumento en la escorrentía. El historial de inundaciones urbanas recientes es razón suficiente para centrar el propósito de esta investigación en la necesidad que tiene la isla en crear e implementar un sistema integrado de mitigación de inundaciones, tomando en consideración el desarrollo de facilidades de bioretención. La inclusión de este tipo de desarrollo sostenible, como también otros BMP's (Best Management Practice por sus siglas en inglés) similares en los planes de mitigación de inundaciones urbanas de la isla promete ser uno efectivo, sobre todo por su potencial de ser utilizado en una gran variedad de ambientes [9].

La naturaleza es capaz de controlar los fenómenos que en ella se manifiestan con una capacidad que siempre excederá la intervención del ser humano. Por lo tanto, el problema de inundaciones urbanas puede y debe ser resuelto y/o controlado por la naturaleza misma. Mediante la integración de métodos sostenibles, el objetivo de disminuir y/o eliminar el impacto de las inundaciones urbanas podría convertirse en una realidad.

BIORETENCIÓN

Catalogado como un desarrollo de bajo impacto (LID, por sus siglas en inglés), las facilidades de bioretención, fueron desarrolladas a principios de los '90 por Larry Coffman y el Departamento de Recursos Naturales del Condado

Prince George, Maryland (CPG). Son considerados como los pioneros en diseñar, implementar y estudiar los beneficios asociados a la bioretención.

El propósito principal de los Desarrollos de Bajo Impacto (LID) es asemejar las condiciones hidrológicas pre-existentes en una zona desarrollada. Por tal razón la bioretención se define como “una práctica terrestre de control de la calidad y cantidad del agua que utiliza las propiedades químicas, biológicas y físicas de las plantas, microbios y suelos para eliminar los contaminantes de las escorrentías de aguas pluviales” [10]. El diseño de los jardines de bioretención varía de acuerdo a su propósito; infiltración, filtración, recarga y/o una combinación de éstos.

El Departamento de Recursos Naturales de CPG se dio a la tarea de desarrollar un manual que contiene las especificaciones de los diferentes tipos de facilidades de bioretención, y describe detalladamente las características estructurales de cada uno basado en lo que se quiere lograr al implementarlos y los beneficios que éstos suponen:

- **Facilidad de Infiltración / Recarga:** es recomendado en áreas donde la recarga de los acuíferos sería beneficiosa.
- **Facilidad de Filtración / Recarga Parcial:** es recomendado en áreas donde un alto nivel de filtración y recarga parcial de la escorrentía sería beneficioso.
- **Facilidad de Infiltración / Filtración / Recarga:** es recomendado en lugares donde una alta concentración de nutrientes (particularmente nitratos) son anticipados.
- **Facilidad de Filtración:** es recomendado para áreas conocidas como “hotspots” (gasolineras, talleres automotrices, etc.)

Según se expone en el Manual del CPG, algunos de los beneficios ambientales y sociales de los sistemas de bioretención son:

- Reducir la cantidad de escorrentía.
- Mejorar la calidad del agua y del aire.
- Reducir el efecto del “urban heat island”.
- Reducir la contaminación por ruido.
- Reducir los niveles de CO².

- Proveer hábitat para la vida silvestre y especies de plantas nativas.
- Incrementar el valor de los bienes raíces hasta un 20% al utilizar paisajismo estéticamente agradable.
- Establecer un sentido único de pertenencia (sobre todo cuando se presentan plantas nativas).
- Promover la administración ambiental y el orgullo de la comunidad.
- Reduce y/o elimina infraestructura de drenaje pluvial.
- Reduce y/o elimina la necesidad de área de tierra para controlar las aguas pluviales al utilizar facilidades de bioretención dentro del lote.

En ciertos casos, el mantenimiento de las facilidades de bioretención puede ser manejado y cambiado del gobierno local al propietario, entre otros beneficios [11].

Debido a la situación económica del país, la costo-efectividad de este tipo de BMP es uno de los aspectos más importantes a la hora de considerarlo como un método de mitigación de inundaciones. El manual del CPG señala algunas de las ventajas económicas que ofrece la bioretención:

Sin duda alguna los jardines de bioretención ofrecen una gran variedad de beneficios ambientales, sociales y económicos, sin embargo, para efectos de este estudio, la importancia de los mismos radica en su capacidad para reducir la escorrentía, pues es ésta característica la que podría ayudar a mitigar los daños provocados por las inundaciones urbanas. Al considerar la bioretención como una opción de tratamiento de aguas pluviales, es de suma importancia identificar las áreas donde convenga localizar dichas facilidades, prestando especial atención a la distribución espacial de los mismos, así como también a otros elementos de igual importancia.

- Reduce significativamente la complejidad y costos de proyectos para el manejo de aguas pluviales.
- Reduce los factores de riesgo y seguridad durante la construcción, mantenimiento y operación de las facilidades.
- Reduce los costos de instalación al utilizar un diseño no-estructural.

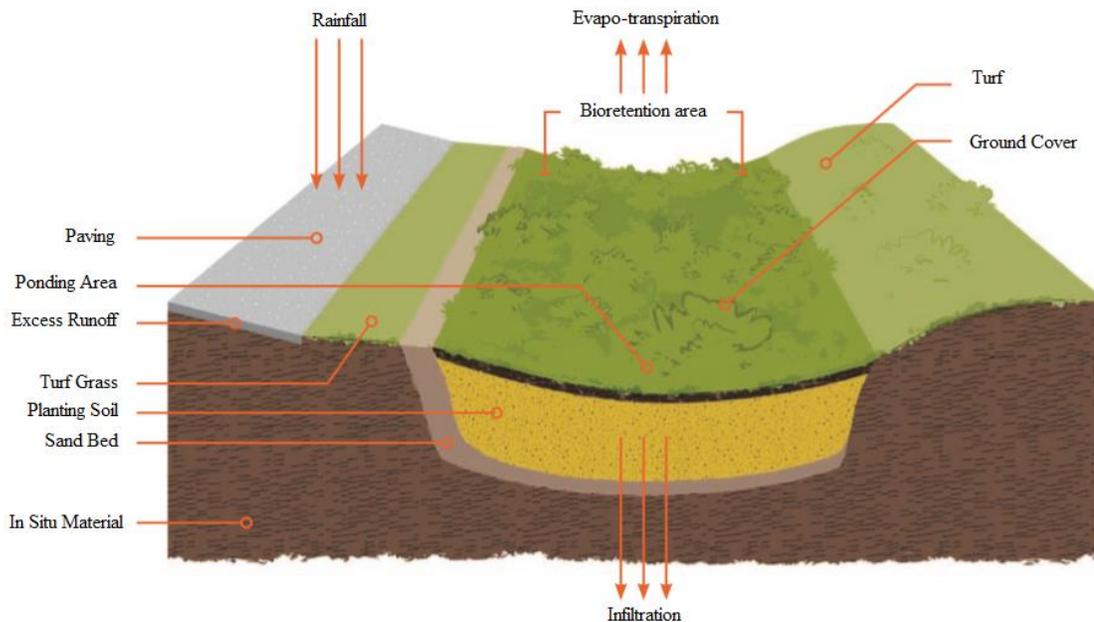


Figura 2
Facilidad de Bioretención que Funciona como una Cuenca de Infiltración [10]

ZONA PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE JARDINES DE BIORETENCIÓN

La zona de estudio seleccionada para la viabilidad de la implementación de una red de facilidades de bioretención es la zona de San Patricio Shopping Center. El área escogida pertenece al barrio Pueblo Viejo del municipio de Guaynabo, el cual tiene una población aproximada de 23,816 habitantes. La densidad poblacional promedio por milla cuadrada es de 5,143 personas y el promedio de unidades de vivienda por milla cuadrada es de 2,348 [12]. La urbanización masiva y el pobre drenaje en el área han provocado que la misma sea considerada como un área especial de peligro de inundaciones AE (SFHA por sus siglas en inglés) por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA). Esta clasificación se refiere a las áreas que están sujetas a inundación con un período de recurrencia de 100 años, las cuales tienen un 1% de ser igualadas o excedidas en cualquier momento. Las zonas clasificadas de esta manera requieren que los residentes y comerciantes adquieran obligatoriamente un seguro contra inundaciones, lo que representa una carga económica adicional.

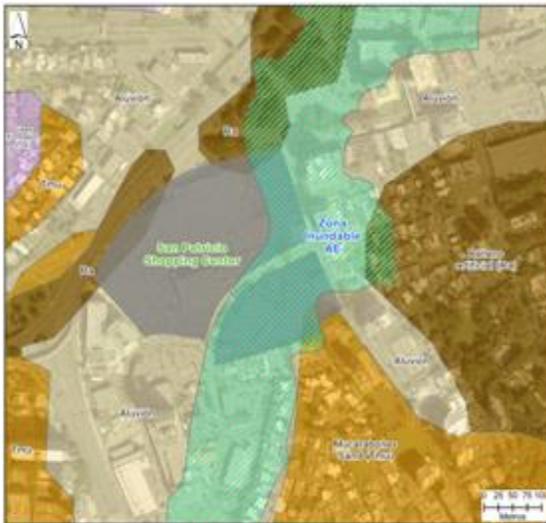


Figura 3
Geología y Zona Inundable del Área de Estudio

La zona inundable de San Patricio Shopping Center pertenece a la cuenca hidrográfica del estuario de la bahía de San Juan, específicamente en la desembocadura del río Puerto Nuevo, teniendo como principal afluente a la quebrada Margarita. La zona se caracteriza por ser un pequeño valle compuesto por la formación geológica “Mucarabones sand”, aluvión y relleno artificial (Fig. 3). Dicho valle tiene una elevación promedio de 10 metros snm, y está rodeado por cotas de nivel un poco más elevadas que no sobrepasan los 25-30 metros snm. Como se puede apreciar en la fig. 4, el flujo de las aguas pluviales de la zona discurre mayormente hacia el nort-noreste, acumulándose en los predios del centro comercial antes mencionado.

Actualmente la zona de estudio tiene un gran porcentaje de impermeabilización, lo que impide que se desarrollen jardines de bioretención en su tamaño máximo de 2 acres. Sin embargo, las áreas verdes dentro y en los alrededores del centro comercial pueden habilitarse como un sistema a menor escala de jardines de bioretención, descargando sus aguas hacia el sistema de alcantarillado de aguas pluviales, de manera tal que ayuden a minimizar el impacto de las inundaciones urbanas de la zona (fig. 5).

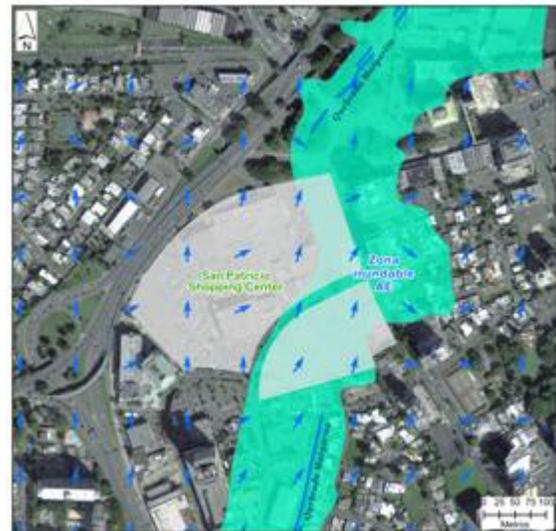


Figura 4
Dirección del Flujo de la Escorrentía e Hidrografía en las Inmediaciones del San Patricio Shopping Center

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Según el manual de bioretención de Maryland, el mínimo de características físicas necesarias para la identificación de terrenos viables para desarrollar facilidades de bioretención son:

- **Tipos / Condiciones del Suelo:** El suelo debe tener una tasa de infiltración superior a media pulgada / hora (por ejemplo: sand, loamy sand, sandy loam or loam).
- **Topografía:** Las pendientes adyacentes a las áreas de bioretención propuestas deben ser menos del 20% pero al menos 2% para asegurar un flujo positivo.
- **Patrones de drenaje existentes:** Cuando sea posible, use los patrones de flujo existentes [11].

Para llevar a cabo este ejercicio se descargaron varias capas de información del portal de datos geográficos del gobierno, FEMA y USGS. El programa utilizado para el procesamiento de las mismas fue ArcGIS Pro 2.1.0. Utilizando la herramienta de pendiente (Slope), se calculó el porcentaje de pendiente del Modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) de la zona y

luego se reclasificó su valor para mostrar las áreas que cumplen con el requisito mínimo de 2% - 20%.

Por otro lado, la capa de información geológica se procesó utilizando primero la herramienta “feature to raster” y luego se procedió a reclasificar sus valores para que sólo mostrara las zonas donde se presentan las formaciones geológicas de aluvión y arena Mucarabones, las cuales cumplen con la tasa mínima de infiltración. Hecho esto, se utilizó la herramienta de calculadora de capas raster (Raster calculator) para así lograr identificar las áreas que cumplen con ambos requisitos.



Figura 5
Ejemplo de una Facilidad de Bioretención en un Estacionamiento en Estados Unidos

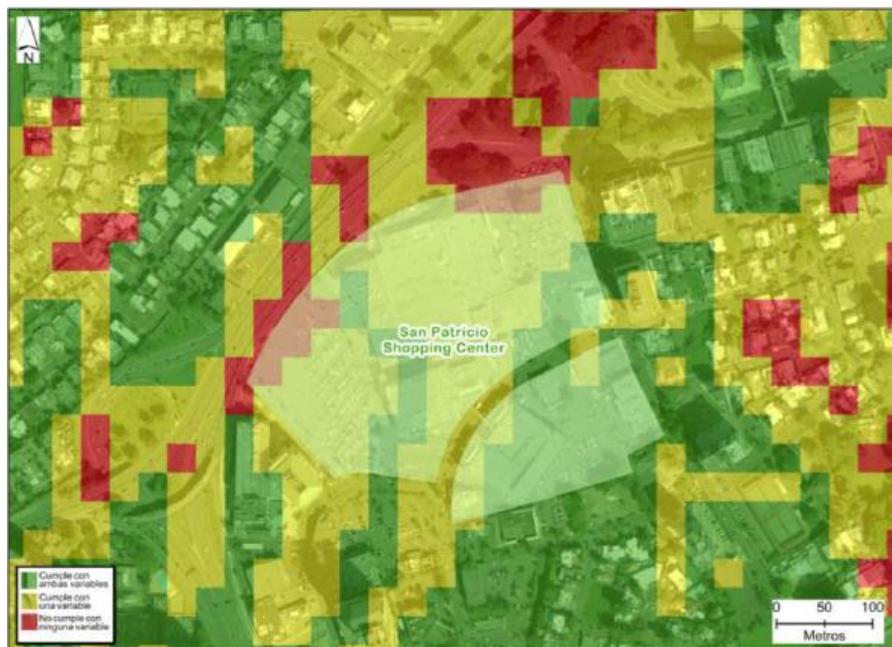


Figura 6
Resultado de la Ejecución de la Calculadora Raster utilizando las Capas Geología y Pendiente

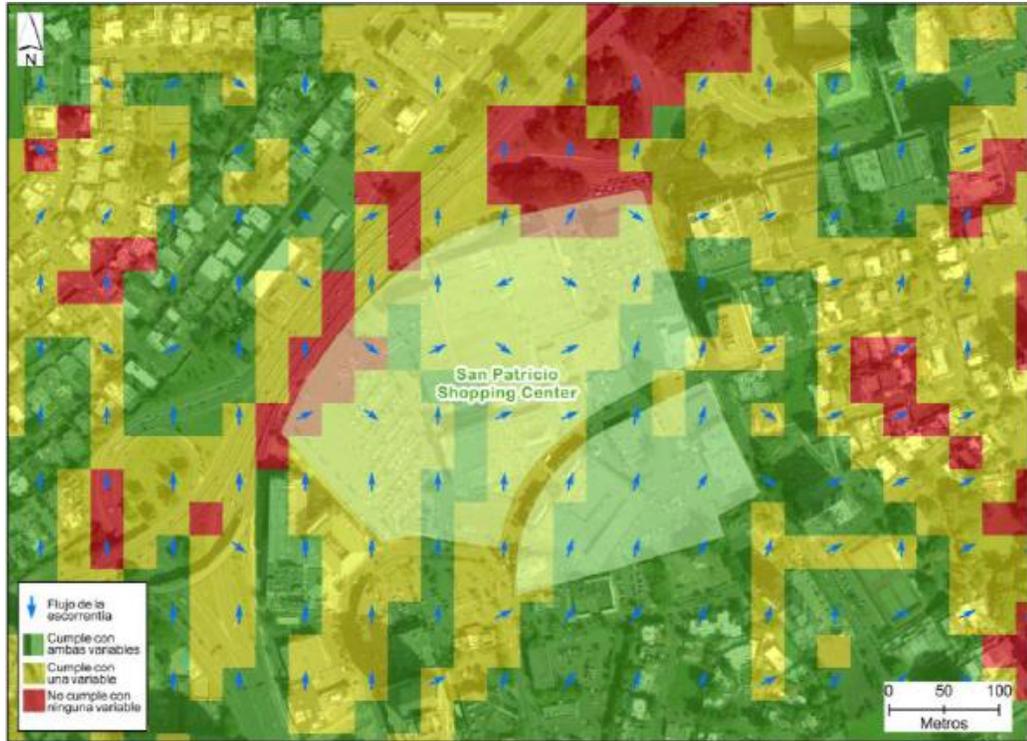


Figura 7A

Resultado de la Calculadora Raster junto con el Mapa de Flujo de la Escorrentía



Figura 7B

Localización Ideal para la Red de Jardines de Bioretención en las Inmediaciones y Zonas Adyacentes al San Patricio Shopping Center

La capa de información creada luego de ejecutar esta operación se muestra en la figura 6, donde los píxeles de color rojo muestran áreas que no cumplen con los requisitos, amarillo para aquellos que cumplen con una sola característica y verde para los terrenos que cumplen con ambas variables. Con el resultado obtenido del álgebra de mapas como fondo, se procedió a activar el mapa de patrones de flujo de la escorrentía para marcar con puntos los terrenos que cumplen con el mínimo de características necesarias para asegurar que una facilidad de este tipo sea beneficiosa para el área y comunidad adyacente (fig. 7A).

El resultado final de este estudio se muestran en la figura 7B, donde los puntos de color verde brillante identifican dichos terrenos. Sin embargo, hay que tomar en consideración las restricciones específicas de cada localización, como por ejemplo la vegetación existente, drenaje, localización de las utilidades, estética, entre otros, lo que se logra visitando personalmente las áreas de interés.

NOTAS

La información aquí expuesta se limita a la descripción general de las facilidades de bioretención y sus ventajas como un BMP para mitigar los efectos de las inundaciones urbanas en Puerto Rico. Sin embargo, es un tópico abarcador que contempla otras variables, como por ejemplo el tema de diseño (hábitat de bosque, zona de transición, jardín ornamental, etc), espacio disponible, tamaño de la facilidad de bioretención, vegetación existente, utilidades, entre otros.

REFERENCIAS

- [1] M. Woodward, *et al.*, "Adaptive Flood Risk Management Under Climate Change Uncertainty Using Real Options and Optimization," *Risk Analysis*, vol. 34, no. 1, 2014.
- [2] M. Hurlbert, *et al.*, "Adaptive Governance, Uncertainty, and Risk: Policy Framing and Responses to Climate Change, Drought, and Flood," in *Risk Analysis*, vol. 36, no. 2, 2016.
- [3] G. S. Votaw, *et al.* (2013, July 18). *An historic Rainfall in San Juan Puerto Rico* [Online]. Disponible: https://www.weather.gov/media/sju/hydrology/RecordRainfall_July18_2013.pdf. Recuperado el 28 de marzo de 2017.
- [4] National Oceanic Atmospheric Administration. (2015). *National Drought Overview* [Online]. Disponible: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/201507#det-reg-pr>. Recuperado el 28 de marzo de 2017.
- [5] F. Gómez, *et al.*, "Hydrogeology of Puerto Rico and the outlying islands of Vieques, Culebra, and Mona: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3296", 40 p. plus 2 pls. Disponible: <http://dx.doi.org/10.3133/sim3296>.
- [6] H. S. Saini, "Urban Flooding: Can it be ignored any further?" in *Current Science*, vol. 91, no. 10, November 25, 2006.
- [7] Primera Hora. (2013). *Fotogalería virtual del periódico Primera Hora* [Online]. Disponible: http://rec-eph.gfrcdn.net/images/2013/07/18/778515_2.jpg. Recuperado el 18 de abril de 2017.
- [8] Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico (CIAPR). (2013, Sept. 30). *Reactivan comisión para estudiar inundaciones* [Online]. Disponible: <http://www.ciapr.org/ponce/index.php/actividades-sp-466066031/profesionales/2-general/articulos/262-20120310semvisitaportugues>. Recuperado el 31 de marzo de 2017.
- [9] A. Roy-Poirier, *et al.*, "Review of Bioretention System Research and Design: Past, Present and Future," in *Journal of Environmental Engineering*, September 2010.
- [10] Bioretention Manual. Environmental Services Division. Department of Environmental Resources. The Prince George's County, Maryland, Revised December 2007.
- [11] "Bioretention: A Guide for Stormwater Retention & Water Quality Improvement," *Developed as part of a partnership between USFW, EPA and Maryland Department of Natural Resources*, 2007.
- [12] Negociado del Censo de los EE.UU. *Censo de Población y Vivienda del 2010, Recuentos de Población y Unidades de Vivienda*, CPH-2-53SP, Puerto Rico, Imprenta del Gobierno de los EE.UU., Washington, DC, 2012.