

**UNIVERSIDAD METROPOLITANA  
ESCUELA GRADUADA DE ASUNTOS AMBIENTALES  
SAN JUAN, PUERTO RICO**

**ESTRATEGIA DE BIOFILTRO PARA EL MANEJO DE ESCORRENTIAS EN  
CENTRO URBANO DE AGUADILLA**

Requisito parcial para la obtención del  
Grado de Maestría en Planificación  
en Planificación Ambiental

Por  
Elvin Roldán Pérez

Fecha de entrega de Tesis

## DEDICATORIA

*Dedicada a los pacientes de cáncer.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecimientos por la ayuda y aportación Dr. Carlos M. Padín al trabajo realizado en especialmente en el desarrollo de la idea y el desarrollo de la misma. También se le agradece al Plan. Manuel Hídalgo y el Sr. William Sarriera por extender su conocimiento y profesionalismo como lectores para el proyecto desarrollado y aportar con sus opiniones en momentos durante el desarrollo de la investigación. Al Ing. Antonio Roldán por su asesoramiento, sugerencias y ayuda durante el trabajo de campo que se llevamos a cabo para que este proyecto se convirtiera en realidad. A mi familia por el apoyo y ayuda brindada durante el tiempo de investigación y los momentos difíciles que hubieron durante la misma y por último a Gustavo Oliveri, Sasha Montañez y Eric Calvente por estar en los momentos buenos y malos que se dieron durante el desarrollo del proyecto. Gracias a todos por la ayuda y materialización del proyecto realizado.

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	ii
LISTA DE FIGURAS .....	iii
RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vi
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
Trasfondo del problema de Planificación .....	1
Problema de Planificación .....	4
Justificación del Proyecto de Planificación .....	5
Preguntas de investigación.....	12
Meta.....	12
Objetivos.....	12
CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA .....	13
Trasfondo histórico .....	13
Marco conceptual o teórico.....	18
Estudios de casos.....	21
Marco legal .....	26
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	31
Introducción .....	31
Área de estudio.....	32
Objetivos.....	34
Fuente de datos.....	34
Diseño metodológico .....	34
Análisis de datos.....	35
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DEL PROBLEMA .....	40
CAPÍTULO V ALTERNATIVAS, ESTRATEGIAS Y PLAN DE ACCIÓN.....	45
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	50
LITERATURA CITADA .....	52

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de sólidos suspendidos totales en estación A .....	58
Tabla 2. Resultados de grasas y aceites en estación B.....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Foto aérea centro urbano de Aguadilla.....	61
Figura 2. Mapa inventario de entradas pluviales centro urbano de Aguadilla.....	62
Figura 3. Mapa de área de recolección de muestras en centro urbano de Aguadilla.....	63
Figura 4. Mapa cuadrángulo geológico en centro urbano de Aguadilla.....	64
Figura 5. Mapa de catastros de suelos en centro urbano de Aguadilla.....	65



## RESUMEN

Este proyecto de planificación expone la problemática de las descargas de sólidos suspendidos totales (TSS) y las grasas y aceites (O & G) que son arrastrados en las aguas de escorrentías durante eventos de lluvia en las áreas urbanas. En la investigación utilizamos los métodos analíticos SM 1060, SM 2540D y EPA 1664A para cuantificar los sólidos suspendidos totales y grasas y aceites en las descargas de las escorrentías en dos estaciones en el centro urbano de Aguadilla. Para el tratamiento de las aguas de escorrentías que se generan en centro urbano de Aguadilla propusimos el desarrollo de celdas de bioretención. Los biofiltros fueron diseñados utilizando los parámetros de diseños establecidos en la guía "*Storm Water Management Practice Design Guide, Vol 2: Vegetative Biofilters*" (2004). Además, incluimos recomendaciones para implantar y monitorear este tipo de estrategia de control de descargas de aguas pluviales.



## **ABSTRACT**

The planning project presents the issue associated with suspended solids (TSS) and oil and grease (O & G) that are carried in runoff water during rainfall events in urban areas. In the research we use the analytical methods SM 1060, SM 2540D and EPA 1664A to quantify total suspended solids and O & G in the discharge of runoff at two stations in the urban center of Aguadilla. For the treatment of the stormwater generated in the urban center of Aguadilla we propose the use of bio-retention cells. Biofilters were designed using the design parameters set in the directory "Storm Water Management Practice Design Guide, Vol 2: Vegetative biofilters" (2004). We also include recommendations to implement and monitor this type of control strategy storm water discharges.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### **Trasfondo del problema de planificación**

El mantener la calidad de los cuerpos de agua ha sido un reto para las ciudades, tanto en el pasado como hoy en día. Con el crecimiento de la ciudad y los avances industriales se han producido una serie de contaminantes que afectan la calidad de los cuerpos de agua. Se han creado diferentes leyes y reglamentos que regulan el manejo las descargas de contaminantes que llegan a los cuerpos de agua. Los contaminantes que llegan a los cuerpos de agua provienen de: (1) fuentes discretas; y (2) fuentes dispersas. Las fuentes discretas son definidas como sistemas de transporte discretos y confinados, que incluyen pero que no se limitan a tuberías, drenaje, canal, túnel, pozo, y contenedores entre otros. Las fuentes dispersas son aquellas difusas que no conllevan un punto de origen fijo o que no se introduce a un cuerpo de agua de un alcantarillado pluvial específico. Los contaminantes generalmente son cargados fuera de las superficies por las escorrentías de agua (Dodson, 1998).

En las décadas de los años 60 y 70 Puerto Rico crece hacia una cultura y sistema industrializado donde se pudo observar el crecimiento de la infraestructura. No obstante, la infraestructura no ha sido adaptada a las necesidades existentes causadas por el crecimiento de la población que se ha dado durante los pasados años. Se puede observar una gran deficiencia dentro de la habilidad de llevar acabo su función dentro de nuestros municipios. Una de las infraestructuras más importantes que tienen las ciudades hoy día son las de manejo de aguas de escorrentía de lluvia y las de manejo de agua sanitarias. Este proyecto de planificación se enfoca en un manejo alterno de las aguas de escorrentía en su espacio limitado como son las áreas urbanas. Las aguas de escorrentías de lluvia son la parte de la

precipitación o irrigación de agua que corre o se desplaza de los suelos a los ríos o aguas superficiales (Dodson, 1998).

Existen dos tipos de sistemas de recogido de agua; los sistemas separados y los sistemas combinados. Los *sistemas separados* se definen como un sistema de transporte (que incluye calles municipales, carreteras con sistema de drenajes, alcantarillas pluviales, drenajes entre otros) que es propiedad u operado por una ciudad, pueblo, distrito, municipio, asociación u otro cuerpo público que es diseñado o usado para la transportación de agua de escorrentía. Los *sistemas combinados* se definen como aquellos que cargan aguas usadas y aguas de escorrentías en un mismo sistema de alcantarillado. Normalmente la carga completa va a una planta de tratamiento, pero en eventos de lluvia fuertes el volumen de agua puede ser tan fuerte que puede causar desbordes de mezclas de aguas de escorrentía sin tratamiento y aguas crudas sanitarias hacia los cuerpos de agua (Dodson, 1998).

### **Crecimiento inteligente**

Las ciudades del mundo se están moviendo hacia los desarrollos sustentables o crecimientos inteligentes donde se crean ciudades sostenibles y funcionales donde halla un balance entre los factores económicos, sociales y ambientales (ICMA, 2002). Este tipo de desarrollo provee para cambiar la forma de crecimiento de ciudades que se lleva en estos momentos, no obstante hay ciudades implementando este tipo de crecimiento dentro de sus territorios en el presente. En tiempos pasados debido a que no había la disposición de tecnologías como en la actualidad, las ciudades eran sitios de usos mixtos y de transporte que no dependía del automóvil por tanto la adquisición de bienes se encontraba a una distancia accesible para las personas (Baker, 2003). Una vez el desarrollo de los avances tecnológicos de transporte que tenemos en el presente podemos observar las expansiones de las ciudades cada vez más. Con la posesión del automóvil los ciudadanos se desplazan de sector en sector

o de ciudad en ciudad de donde viven a donde se labora, como a ejemplo se ve que se tornan sectores especializados para usos perdiendo los usos mixtos en los mismos (Baker, 2003).

La teoría de crecimiento inteligente (*smart growth*) expone diferentes alternativas para desarrollar los suelos de una comunidad inteligentemente, asignando usos mixtos para lograr mayor provecho del suelo y promover la conservación de espacios abiertos (ICMA, 2002). Una dimensión del crecimiento inteligente puede ser la implementación de sistemas de infraestructura verde como lo son los sistemas de biofiltración para el manejo de las aguas de escorrentías. En el crecimiento inteligente de la ciudad se busca un balance y un uso inteligente de los recursos que se encuentran en la misma. Los recursos de agua son de los más esenciales y de los más que le interesan a las comunidades de hoy día. El manejo de las aguas de escorrentía es un aspecto importante dentro de la ciudad. Se busca conseguir un manejo efectivo de las aguas de escorrentías mientras se mejora la calidad de agua de los cuerpos de agua que nos rodean. Grandes ciudades como lo son Nueva York, Chicago, Milwaukee, Portland y Seattle se encuentran en la ejecución de planes de infraestructura verde para el manejo de las aguas de escorrentías usado como método de control para el manejo de la sobrecarga de sistemas combinados (DSC)(Hayland & Zuravnsky, 2008).

Estas ciudades poseen planes específicos para el manejo de los desbordes de sistemas combinados y aguas de escorrentías. Como mencionado antes la situación principal fue el crecimiento de la ciudad más los procesos industriales. Esto ha llevado a las ciudades antes mencionadas a tomar acción para mantener la calidad de sus cuerpos de agua dentro de los parámetros establecidos en las leyes estatales y federales. Dentro del ámbito de la planificación estas ciudades han optado por tomar un camino sustentable en donde incorporan la infraestructura verde dentro de sus planes para lidiar con los problemas de sus sistemas de manejo de agua. Dentro de los sistemas de infraestructura verde que las ciudades están adoptando los humedales urbanos, techos verdes, biofiltros y siembra de árboles entre otros (Hayland & Zuravnsky, 2008).

## **Problema de planificación**

Un reto para Puerto Rico al igual que para muchos países del mundo lo es el manejo de los usos del suelo. Particularmente en Puerto Rico se puede observar el uso ineficiente de los suelos el cual lleva al crecimiento de la huella sub-urbana que se caracteriza por la baja densidad en la periferia urbana y conocida como desparrame urbano (Juncos, 2009). Esto ha provocado un aumento en el flujo de agua de escorrentías que no necesariamente cuentan la infraestructura adecuada para manejar las mismas. Además, esta agua de escorrentías carga consigo misma una serie de contaminantes que están depositados en las superficies de las áreas impermeables por las actividades de día a día. Las aguas de escorrentías son un factor primario en la degradación de muchos cuerpos de aguas (USEPA, 2003).

El problema de planificación que aborda este proyecto de investigación es la factibilidad de los biofiltros para manejar el agua de escorrentía. La bioretención es una parte integral del desarrollo de bajo impacto (Hager 2003). La bioretención como método de manejo de aguas de escorrentías puede reducir potencialmente el volumen escorrentía, flujos picos, aumentar las recargas de agua subterráneas, aumentar la evotranspiración, y reducción de contaminantes entrantes a agua superficiales y subterráneas (Wossink and Hunt, 2003). Las aguas de escorrentías que se generan el centro urbano de Aguadilla son descargadas mediante el sistema separado de agua de escorrentía del municipio. No obstante el sistema que maneja la escorrentía no contiene mecanismos para la remoción de contaminantes que son arrastrados por las mismas. La escorrentía que se genera en el centro urbano arrastra consigo solidos suspendidos y grasas y aceites que son acumulados durante las actividades diarias. Estos contaminantes son descargados sin ser tratados contribuyendo a la degradación de cuerpos de agua. El manejo de la escorrentía mediante mecanismo estructurales de bajo impacto puede presentar una potencial mejora en la calidad de las aguas de escorrentías que son generadas en el centro urbano de Aguadilla.

En el 1972 la Agencia de Protección Ambiental (EPA) establece el Programa de Sistema Nacional de Eliminación de Descarga de Contaminantes (NPDES) creado bajo la Sección 402 de la Ley de Agua Limpia (Clean Water Act). Bajo el programa de permisos NPDES se prohíben las descargas de contaminantes desde cualquier punto de origen a las aguas de la nación, salvo lo permitido por un permiso NPDES. El programa da a la EPA la autoridad para regular los vertidos a las aguas de la nación mediante el establecimiento de límites en el efluente que se pueden introducir en un cuerpo de agua de una facilidad en operación y debidamente permitida. Los permisos son otorgados normalmente por un período de 5 años.

La Fase I del programa de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. de las aguas pluviales se promulgó en 1990 bajo la Ley de Agua Limpia. La Fase I se basa en el Sistema Nacional de Eliminación de Descargas Contaminantes (NPDES) para hacer frente a la cobertura de la escorrentía de: (1) "medio" y "grande" los sistemas municipales independientes de drenaje pluvial (MS4s) medianos y grandes. En general aquellos MS4s que sirven a poblaciones de 100,000 o más; (2) las actividades de construcción que perturban 5 hectáreas o más de terreno; y (3) diez categorías de actividad industrial. En la Fase II se amplía la Fase I del programa exigiendo a los operadores de MS4s en áreas urbanizadas y a los operadores de pequeñas obras de construcción, a través del uso de los permisos NPDES, para implementar programas y prácticas para controlar el escurrimiento de aguas pluviales contaminadas. El programa de NPDES aplica a los municipios de Puerto Rico y los obliga a trabajar las aguas de escorrentías de una manera eficiente. Esto representa un gran reto para los municipios del país.

### **Justificación del proyecto de planificación**

Las aguas de escorrentías que son generadas en las áreas urbanas son consideradas fuentes de contaminación dispersas que transportan contaminantes como sólidos suspendidos,

metales pesados, nutrientes y bacterias (Zun, 2010). La impermeabilización de los suelos en las áreas urbanas ocasiona la alteración de los patrones de las aguas de escorrentía generadas produciendo volúmenes mayores de escorrentías que afectan los ecosistemas de los cuerpos de agua (Jacob, 2009). La descarga de estos contaminantes afectan la calidad de los cuerpos de agua física, química y biológicamente. De los problemas que causan las escorrentías de aguas son la contribución de sedimentos que destruyen el hábitat de peces, promueve el crecimiento de algas; y la descarga de metales pesados y contaminantes inorgánicos que resulta en peces que no pueden ser consumidos, en agua no potable, y el desplazo de especies acuáticas endémicas por especies más tolerantes a los contaminantes presentes y la descargas de patógenos que contribuyen al cierre de playas (Burton & Pitt, 2002). Los cuerpos de aguas son fuentes económicas, estéticas, recreativas importantes dentro de la sociedad para mantener la calidad de vida de los ciudadanos. Los ejemplos contaminante mencionados afectan grandemente la disposición de los cuerpos de agua y los usos de los mismo ante la sociedad.

### **Fuentes urbanas de aguas de escorrentías**

Hay una gran variedad de fuentes de aguas de escorrentías como lo son las construcciones, suelos impermeabilizados, techos, automóviles entre otros. Una de estas fuentes son las provenientes de las construcciones que son generadas por la exposición de suelos mientras las construcciones se encuentran activas. Otra fuente mayor de escorrentía es la urbanización de los suelos ya que la impermeabilización de los suelos impide la infiltración del agua evitando la recarga de acuíferos. La impermeabilización de los suelos aumenta la velocidad en la que el agua se traslada a través de las superficies contribuyendo así al arrastre de contaminantes que se encuentran en la misma. Los techos de las propiedades proveen para una fuente de escorrentía de agua de modo que son áreas de captación impermeables que depositan las aguas hacia desagües u otros mecanismos que probablemente no infiltren las

mismas. Estos tres ejemplos de fuentes de aguas de escorrentías se pueden observar dentro de las diferentes ciudades. De no tener mecanismos de tratamiento para estas fuentes de aguas de escorrentías se pueden convertir en potenciales fuentes de contaminación para los cuerpos de agua de las comunidades. La erosión proveniente de los proyectos de construcción contribuye a una cantidad significativa de los depósitos de sedimentos en los cuerpos de agua. El sedimento por peso es clasificado como el contaminante más grande de los cuerpos de agua.

El manejo e implementación de los mecanismos de erosión y sedimentación dentro de los proyectos de construcción constituye una gran variable de la calidad de escorrentía que provenga de los mismos. Además de la contribución de sedimentos que aportan este tipo de acción también es contribuyente a una gran porción de fósforo según estudios que se han llevado a cabo dentro de los Estados Unidos. Hay ciertos factores que contribuyen a la erosión que se experimenta en las diferentes áreas algunos de estos factores lo son la topografía, suelo, cantidad de lluvia local y las condiciones de manejo (Burton & Pitt, 2002). De acuerdo a los datos del Servicio del Congreso de los Estados Unidos el 50% de los problemas atribuidos a la contaminación de los cuerpos de aguas son provenientes de las aguas de escorrentías de superficies impermeables (Environment, 2007).

### **Contaminantes en aguas de escorrentías**

Dentro de la gama de contaminantes que se encuentran en las aguas de escorrentías están relacionados directamente a los usos de suelo asignados dentro de la ciudad. Dentro de las calificaciones asignadas dentro del territorio de la ciudad se encuentran las comerciales, agrícolas, residenciales, industriales y calificaciones especiales que se pueden tener dentro del Plan de Calificación de Suelo de una ciudad. Debido a estas calificaciones y asignación de usos se puede correlacionar los contaminantes que se pueden generar dentro de las mismas. Alguno de los contaminantes típicos que se pueden encontrar dentro de las aguas de



escorrentías son: sólidos suspendidos, fósforo, nitrógeno entre otros. Otro contaminante presente que se puede encontrar son metales pesados como el plomo, zinc, cobre y cromo (Burton & Pitt, 2002). Además se encuentran los derivados de hidrocarburos como lo son las grasas y aceites. Los metales pesados y las grasas y aceites mayormente son provenientes del uso del automóvil como método de transportación dentro de la periferia de la ciudad.

Los contaminantes mencionados pueden causar serios problemas de contaminación a los cuerpos de agua afectando la calidad de los mismos. La contaminación por metales pesados es un problema reconocido debido al tiempo de bio-acumulación que tienen los mismos en los organismos marinos y suelos. La acumulación de los metales pesados en los organismos puede causar daños a la salud humana de ser expuestos a los mismos mediante diferentes vías. Una de estas vías puede ser el consumo a través de crustáceos como fuente alimentaria. El nitrógeno es otro contaminante que representa grandes problemas en los cuerpos de agua. Los depósitos de nitrógeno contribuyen a la eutrofización de cuerpos de aguas como lo son los lagos debido al crecimiento excesivo de las plantas. La eutrofización provee crecimiento excesivo de los productores primarios en los sistemas acuáticos proveyendo para eventos de anoxia para la fauna disponible en el ecosistema debido a que cuando las plantas perecen la descomposición de las mismas exige oxígeno por lo tanto este proceso consume el oxígeno disuelto en el agua (Camargo & Alonso, 2006). Otro ejemplo que se va a mencionar es para los aceites y grasas los cuales son hidrocarburos derivados del petróleo. Estos contribuyen a contaminación de los cuerpos de agua mediante el depósito de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en las superficies. Los HAP's son un contaminante tóxico para los peces hasta en pequeñas cantidades también los mismos son asociados al cáncer o conocido como carcinógenos representando un problema grave para la salud humana. Estos contaminantes son provenientes de los aceites lubricantes de los vehículos de motor. Los mismos tienen una masa molecular baja y se depositan en los sedimentos de los cuerpos de agua.

## **Efectos a ecosistemas**

Las aguas de escorrentías tienen impactos a los diferentes ecosistemas en los cuales tienen contacto. Diferentes estudios han demostrado los impactos relacionados a las aguas de escorrentía. Para establecer una correlación de los impactos se estudian los diferentes organismos en los cuerpos de agua. Dentro de los estudios llevado a cabo se encontró la degradación de los ecosistemas debido a la toxicidad de los contaminantes como lo son los metales y los PAHs. Hay contaminantes que mediante las reacciones químicas que son llevadas a cabo en el suelo pueden transformarse en sustancias tóxicas. Muchos de los contaminantes son arrastrados por los sedimentos que llegan a los cuerpos de agua en donde los contaminantes se adhieren y luego son depositados en los cuerpos de agua afectando la flora y fauna del ecosistema. Los efectos que se pueden ver para este tipo de contaminación son la retención de contaminantes por los invertebrados, peces, crustáceos y algas marinas. La publicación "*Stormwater Effects Handbook*"(2002) expone que la señal más obvia de detectar contaminantes en los cuerpos de agua son los eventos de muerte de peces. Cabe la posibilidad que la fauna y flora que encontrada en los cuerpos de agua originalmente desaparezca o la misma sea desplazada por fauna y flora que se adapte a los contaminantes que se depositan en los cuerpos de agua. De modo que se puede observar un cambio en los ecosistemas debido a los contaminantes.

En Puerto Rico se han llevado a cabo estudios sobre los efectos de los sedimentos y nutrientes en los corales de Puerto Rico. Los corales proveen hábitat para diferentes comunidades de organismos, amortiguan la energía de las olas, son una fuente de carbonato para las playas y son una fuente de economía para el país ya sea por medios de pesca o recreación. Como se ha mencionado el volumen de las aguas de escorrentía ha aumentado drásticamente por las actividades del hombre. Dos de los contaminantes que actualmente afectan los corales de Puerto Rico son los sedimentos y los nutrientes, ambos encontrados en las descargas de aguas de escorrentías. Hay que aclarar que ambos contaminantes pueden

ser provenientes de diferentes fuentes dependiendo de la calificación del suelo y los usos que se otorgan en los mismos. Los sedimentos pueden cargar metales los cuales pueden bioacumularse en los organismos y los nutrientes pueden causar el crecimiento de los productores primarios como algas y esponjas tomando ventaja sobre el crecimiento de los corales. Los corales son organismos selectivos de su ecosistema los cuales tienen salinidad, luz, nutrientes, temperatura específica cuando estos factores son alterados los mismos entran estrés. De los resultados del estudio llevado a cabo en Puerto Rico por Larsen & Webb (2009) sobre los efectos potenciales de las aguas de escorrentías se concluyó que los sedimentos y nutrientes que son arrastrados y descargados contribuyen al desplazamiento de las poblaciones de corales por poblaciones de algas y esponjas que se nutren de los mismos. En general la degradación de las poblaciones de corales alrededor de la isla se está llevando a cabo debido a las actividades de las personas promoviendo la pérdida de los recursos bióticos encontrados en los cuerpos de agua. Como mencionado antes estas acciones que conllevan a estas descargas pueden afectar grandemente el aspecto recreativo y económico de la isla. Hay que implementar nuevas alternativas y mecanismos para la prevención de contaminantes en los cuerpos de agua.

### **Calidad de agua potable**

El valor más importante que tiene el agua como recurso es el mantener los organismos con vida. Los desarrollos de la era moderna han causado que muchas de las fuentes de agua usadas como recaudos de agua potable dentro de las ciudades se vean afectadas por los contaminantes que llegan a ellas. Los contaminantes pueden llegar de diferentes formas a las recargas de acuíferos de donde provienen nuestras fuentes de agua dulce. Algunas de las maneras que pueden llegar son en la infiltración a través del terreno o simplemente por la escorrentía que llega a los ríos y otros cuerpos de agua. La calidad de las aguas que son utilizadas pueden ser protegidas y preservadas de una manera relativamente sencilla y

utilizada en diferentes partes del mundo, mediante la implementación de biofiltros en diferentes áreas o puntos de la ciudad para la filtración de las aguas de escorrentías. La utilización de biofiltros dentro del casco urbano de la ciudad puede ser una alternativa eficiente para la filtración de los contaminantes acumulados en las superficies impermeables que puede mostrar ser costo efectiva para la ciudad. Las áreas de biofiltración son uno de los tipos de infraestructura verde utilizados hoy día para el manejo de las aguas de escorrentías. Estas áreas también conocidas como jardines de lluvia están compuestos de un medio el cual consiste de una mezcla de suelo, arena y mulch para capturar particulado y contaminantes disueltos promoviendo la infiltración. Los sistemas de biofiltración se están convirtiendo en uno de las Mejores Prácticas de Manejo (MPM) usada por las ciudades para el manejo de las aguas de escorrentías (Hoang, 2008). La utilización de los biofiltros para el manejo de las aguas de escorrentías representa una gran oportunidad para el municipio de atender esta situación y establecer áreas verdes dentro de la ciudad. Dentro de las leyes que nos protegen en el consumo de agua se encuentra el Ley de Agua de Consumo Segura o Safe Drinking Water Act por su nombre en inglés. El mismo provee estándares seguros para el consumo del agua dentro de los Estados y Territorios de los Estados Unidos.

### **Efectos recreativos**

Uno de los efectos sociales que tiene la contaminación de los cuerpos de agua es que los mismos pierden su valor recreativo. Debido al clima tropical que se tiene en la isla la recreación en los cuerpos de agua es un factor importante a considerarse. El Reglamento de Estándares de Calidad de Agua de la JCA clasifica los cuerpos de agua costaneros en seis categorías; SA, SB, SC, SD, SE y SG. Cada una de las clasificaciones antes mencionadas contiene especificaciones para los usos que se pueden llevar a cabo en los cuerpos de agua debido a su clasificación. Los sólidos suspendidos, metales y fertilizantes pueden ser algunos de los contaminantes que pueden llegar a los cuerpos de agua durante los eventos de lluvia.

Una vez estos contaminantes llegan a los cuerpos de agua los mismos afectan la integridad de los mismos limitando los usos recreativos que se pueden adquirir de los mismos debido a la seguridad que se le debe brindar al público. Algunos de los usos recreativos que se pueden perder son la pesca y natación entre otros.

### **Preguntas del Proyecto de Planificación**

¿Serán los biofiltros un método estructural viable para el tratamiento de los sólidos suspendidos totales y las grasas y aceites acumulados en las superficies impermeables del centro urbano de Aguadilla?

### **Meta**

Evaluar la estrategia de biofiltro para el manejo de aguas de escorrentía en el centro urbano del Municipio Autónomo de Aguadilla.

### **Objetivos**

1. Analizar la escorrentía urbana para determinar la calidad de agua que se maneja en el centro urbano del Municipio Autónomo de Aguadilla.
2. Evaluar la viabilidad de ubicación de infraestructura verde (biofiltros) para el manejo de las escorrentías urbana.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### **Trasfondo histórico**

La creación del CWA en 1972 ha creado requisitos para las industrias públicas y privadas para el tratamiento de las aguas antes de ser descargadas a cuerpos de agua de los Estados Unidos. Estas acciones conlleva a la prevención de daños a los cuerpos de agua y la protección de la salud pública. Para cumplir con los requisitos se basa en cuatro criterios: primero, las aguas de los Estados Unidos; segundo, permisos de descargas; tercero, controles basados en tecnología y cuarto, controles de calidad de agua (Dodson, 1998).

La otorgación de permisos de descargas de a los cuerpos de agua de los Estados Unidos se lleva acabo bajo el Programa de Sistema Nacional de Eliminación de Descarga de Contaminantes (NPDES). El titulo IV de la CWA le da la autoridad delegar permisos de descargas a todas las fuentes en la nación. Este programa ha evolucionado en donde la EPA delega el programa a los Estados para el manejo del mismo dentro de sus territorios. De modo que los estados son los que emiten los permisos de descargas a los cuerpos de agua. Anteriormente el programa se enfocaba en las descargas de contaminantes por los procesos industriales y para el 1973 la EPA estableció su primera regulación de aguas de escorrentías (Dodson, 1998). Para el 1987 se llevo a cabo enmiendas al CWA conocidas como "*Water Quality Act of 1987*" estas enmiendas promueve a que los Estados tomen control del Programa de NPDES para que los mismos asuman responsabilidad de una porción del programa.

La Fase I del programa de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. de las aguas pluviales se promulgó en 1990 bajo la Ley de Agua Limpia. La Fase I se basa en el Sistema

Nacional de Eliminación de Descargas Contaminantes (NPDES) para hacer frente a la cobertura de la escorrentía de: (1) "medio" y "grande" los sistemas municipales independientes de drenaje pluvial (MS4s) medianos y grandes. En general aquellos MS4s que sirven a poblaciones de 100,000 o más; (2) las actividades de construcción que perturban 5 hectáreas o más de terreno; y (3) diez categorías de actividad industrial. En la Fase II se amplía la Fase I del programa exigiendo a los operadores de MS4s en áreas urbanizadas y a los operadores de pequeñas obras de construcción, a través del uso de los permisos NPDES, para implementar programas y prácticas para controlar el escurrimiento de aguas pluviales contaminadas.

Puerto Rico al igual que todo territorio en los EU es aplicable al Clean Water Act y debe llevar a cabo cumplimiento con el Programa de NPDES para su territorio. La mayoría de los municipios de Puerto Rico recaen bajo la Fase II del Programa el cual atiende a poblaciones menores de 100,000 personas. No obstante en Puerto Rico no se ha logrado ver aún un cambio significativo en la implementación de los programas de NPDES por los municipios. Una de las alternativas que se puede utilizar o que se esta utilizando en las ciudades para el manejo de las aguas de escorrentía como una Mejor Práctica de Manejo (MPM) son los biofiltros como método estructural.

### **Biofiltros para manejo aguas de escorrentías**

Dentro de la clasificación de biofiltros se encuentran los siguientes: celdas de bioretención, zanjas de infiltración, filtros de arena, humedales urbanos, resortes ribereños y terrenos bajos reforzados. Para efectos de esta investigación, se estará proveyendo una descripción de los biofiltros antes descritos para tener una visión de la eficiencia de los mismos en diferentes ambientes o entornos.

### **Celdas de bioretención.**

Los biofiltros o áreas de bioretención son áreas estructurales con el propósito de la filtración de las aguas de escorrentías mediante la infiltración y retención del agua. Las celdas de bioretención también son conocidos como jardines de lluvia y los mismos se enfocan en dos variables particulares la estética y la calidad de agua. Su enfoque es trabajar como un área del paisaje para el tratamiento de las aguas de escorrentías. El área de bioretención es una depresión o un cuenco que temporariamente retiene el agua en oposición a que la misma se escurra de área (Hunt, 2000). Las celdas de bioretención contiene vegetación que es tolerante a la lluvia o que le gusta la lluvia. Las áreas de bioretención pueden construirse de varios tamaños dependiendo del área que escurre o se filtra hacia la misma. Es considerado una alternativa de infraestructura verde que se puede implementar como una parte integral del desarrollo de bajo Impacto (LID por sus siglas en inglés) (Hunt & Smith, 2008). Los LID incorpora una serie de diseño y plan para la implementación de practicas de mejor manejo estructurales para el manejo de las aguas de escorrentía (Brown & Hunt, 2010). Estos tipos de sistemas buscan reproducir el efecto de hidrología cuando el lugar no ha sido desarrollado o pre-desarrollado (Davis, 2008). Alguno de los beneficios demostrados en este tipo de sistema son: deducir el volumen de escorrentía, minimiza los flujos altos, recarga de agua subterránea, aumenta la evapotranspiración y reduce la entrada de contaminantes a los cuerpos de agua. Dentro de los contaminantes que se han probado que remueve se encuentran las grasas y aceites, bronce, plomo y zinc. La remoción de los contaminantes se lleva acabo por mecanismos biológicos, químicos y físicos. Específicamente utilizan absorción, acción microbiana, sedimentación, filtración y adquisición de plantas (Hunt & Smith, 2008).

Se toma un interés particular en los biofiltros debido a los potenciales beneficios que se pueden adquirir de los mismos al igual que son estéticamente agradables para las áreas urbanas como áreas de espacios abiertos. Los mismos tienen un gran potencial de remoción de contaminantes encontrados en las aguas de escorrentías. Este tipo de infraestructura esta



siendo implementada en diferentes lugares a través del mundo. Un ejemplo del uso y la investigación de biofiltros son comunidades en Carolina del Norte como Charlotte (Hunt & Lord, 2006). Los mismos están siendo estudiados en el ámbito de remoción de contaminantes y la efectividad de los mismos. Al igual que la costo efectividad para los mismos en este tipo de proceso.

### **Zanjas de infiltración.**

Las zanjas de infiltración son mecanismos que trabajan mayormente para la infiltración de agua a través del terreno para la recarga de acuíferos o de aguas subterráneas. El mismo esta compuesto de un área especifica en donde los mismos se rellena con pedazos de piedra grandes en la superficie y un medio de filtración el cual esta compuesto por gravilla, tela de filtración, piedra y arena. Los materiales mencionados componen el orden del medio por el cual el agua de esorrentía será filtrada mediante lleva a cabo su descenso hacia la recarga del acuífero. Hay pocos estudios para este tipo de mecanismo y la eficiencia que tiene el mismo para la remoción de contaminantes (Hunt, 2000). No obstante el mismo es utilizado como un mecanismo estructural de manejo para las aguas de esorrentías.

### **Filtros de arena.**

Los mecanismos estructurales de filtros de arena fueron adoptados de las prácticas de filtración de agua para consumo humano. Los filtros de arena se componen de dos secciones la primera sección se compone de la cámara de sedimentación donde se excluye escombros y otros tipo de residuo que pueda llegar en la esorrentía y la cámara de arena en donde el agua pasa para ser filtrada. Este tipo de mecanismo se está utilizando para la filtración de áreas impermeables como lo son las calles y estacionamientos. Los filtros de arena tienen una eficiencia de remoción de contaminantes de alta para sólidos suspendidos y metales (Hunt, 2000).

### **Humedales urbanos.**

Los Humedales para el recogido de las aguas de escorrentías son construidos en espacios que no poseían estas características. Los humedales artificiales para el recogido de estas aguas trabajan similar a las charcas de retención a diferencia que los mismos no son profundos. La cantidad de agua que poseen estos humedales es alrededor de un 1 a 1 ½ pies. Las características similares que tienen los humedales artificiales a las charcas de retención es el almacenamiento de agua y que poseen para el depósito de los sedimentos y los contaminantes. También los humedales tienen unos niveles sugeridos para el depósito del agua y una extensa vegetación que ayuda a la remoción de los contaminantes.

### **Resortes ribereños.**

Los resortes ribereños son áreas abiertas cubiertas de vegetación al lado de ríos o quebradas para la remoción de contaminantes. El sistema de resorte ribereño funciona con la dispersión del agua lentamente a través de la vegetación produciendo que las partículas de sedimento se queden atrapadas y que parte del agua infiltre a través de la tierra. Se ha demostrado que este tipo de mecanismo remueve una gran parte de los contaminantes los cuales incluye sedimento, nitrógeno y fósforo (Hunt, 2000). Una desventaja que tiene este tipo de sistema es que requiere una gran porción de terreno para que el agua pase lo cual significa un aumento en el costo de implementación.

### **Terrenos bajos reforzados.**

Los terrenos bajos reforzados son una serie de canales que conllevan grama. Los mismos proveen remoción de contaminantes, pero es una muy baja pero significativa. Este tipo de canal puede ser modificado para aumentar la eficiencia de remoción y la carga de agua que puede pasar por el mismo sin afectar la estructura. Este tipo de mecanismo es usado para áreas de menor desarrollo urbano. Como todos los mecanismos antes mencionados se necesita un mantenimiento adecuado para mantener la eficiencia de remoción de contaminantes.

## **Marco teórico**

### **Teoría de planificación**

La planificación es un campo multi-disciplinario el cual se enfoca en el proceso para resolver situaciones asignando dirección al resultado deseado mediante la creación de metas y objetivos (Brooks, 2002). La teoría de planificación es un tema complejo debido a que no hay una ciencia exacta para practicar la planificación. Según Campbell y Fainstein (2007) definir la teoría de planificación no es fácil debido a cuatro factores: primero que la teoría de planificación traslapa todas las ciencias sociales lo dificulta precisar el territorio específico de la planificación. Segundo, entre planificadores y otros profesionales expone que los planificadores no solo planifican, los otros profesionales también planifican. Tercero, el campo de la planificación se divide por áreas de especialización tales como ambiental, económica, social y urbana, entre otras más específicas, cuando otros profesionales simplemente trabajan mediante el proceso de toma de decisiones. Cuarto, mucho de los campos son definidos por metodologías específicas el campo de la planificación toma prestado metodologías de diferentes campos por lo cual dificulta definir una metodología exacta para el mismo. No obstante el análisis de problemas dentro del campo de la planificación utiliza el método científico para la búsqueda de posibles alternativas al problema que se trabaja. El proceso de planificación racional se compone de 6 pasos o variables. La identificación del problema, metas y objetivos, diseño y curso de acción, selección de estrategias, implementación del plan de acción y retroalimentación (Friedman, 1987). Otro dilema con el que tiene que trabajar el planificador es la posición que asume.

En la teoría de planificación, el planificador se encuentra en el medio de los personajes, o sea, el mercado privado, el público y los ciudadanos. La función del planificador es brindar la información como herramienta para cambiar los sucesos de un acto presente. Esto es el propósito de planificar según lo expone Campbell y Fainstein (2007). Debido a que el entorno de las ciudades cambia todos los días a consecuencias de las decisiones diarias lo convierte

en un sistema vivo y evolutivo. A consecuencia de esto el método racional de planificación termina en retroalimentación para evaluar los resultados y llevar ajustes de ser necesario en el momento.

Según Friedman la *planificación* es la práctica profesional que busca conectar formas de conocimiento a formas de acción en el dominio público. El mismo nos provee esta definición con el propósito de ver la planificación como algo que no es ingeniería en donde se establece un sistema y ruta para los personajes. Hay una serie de ideas para como debe ser la planificación, la planificación debe de ser normativa, innovadora, política, transitiva y basada en el aprendizaje social. Estos cinco elementos son los componentes para llevar una planificación no euclidiana según Friedman. De nuevo, como mencionado antes el entorno es uno que esta en constante cambio por lo tanto se debe de ser flexible al planificar para poder llevar acabo cambios y adaptaciones.

### **Teoría de planificación urbana**

En fundamento la teoría de planificación urbana sigue el mismo proceso de la teoría de planificación a diferencia que la misma se enfoca en las áreas urbanas de la ciudad y su comportamiento. Muchos de los temas bajo la teoría de la planificación urbana son relacionados directamente a la funcionalidad de la misma. La ciudad como sistema debe albergar características como los son movilidad, espacios públicos, infraestructura, usos mixtos, entre otros. A través del pasar de los años se ha visto como las ciudades han perdido su función como sistemas urbanos. Una de las razones principales para esto ha sido la homogenización de sectores los cuales son sólo para un uso en específico privando a la ciudad de usos mixtos. La economía es un gran factor en la función y expansión de las ciudades. En tiempos pasados la fuente principal de economía era la manufactura en donde se observó un crecimiento de la ciudad debido a que las personas se ubicaban en la misma para ejercer su profesión. Mediante los avances de tecnología se puede observar que la manufactura ha

desaparecido como fuente principal de economía. Otro factor importante en el desarrollo de las áreas urbanas lo son las políticas creadas para el funcionamiento de la misma. Una de las políticas creada inicialmente con el crecimiento de las ciudades son las políticas de saneamiento para el control y prevención de enfermedades. Por último el factor cultural de la población influye en las políticas creadas para la ciudad. Al pasar de los tiempos se reestructura la economía y las funciones de las ciudades, lo cual estos cambios influyen en las mismas positiva o negativamente. La globalización de las ciudades a llevado al cambio de los trabajos principales en la economía evolucionando los mercados y trayendo cambios en la creación de trabajos y servicios. Esto tiene efecto en la configuración espacial de la ciudad debido a que hay que reacomodar los usos de los suelos a la demanda por los mismos.

En la sección de teoría de Planificación se menciona el efecto que tiene la tecnología de transportación en las ciudades. La adquisición de mejores métodos de transportación por las personas le han permitido la expansión hacia las afueras de la ciudad creando conurbaciones a lo largo de la ciudad (Campbell &, Fainstein 2001a). Esto ha creado que los patrones de crecimiento de la ciudad sean alterados no necesariamente siguiendo el crecimiento esperado por el diseño original de la ciudad. Como antes mencionado las políticas creadas dentro de la ciudad son una parte esencial para la función de la ciudad. Las políticas permiten ciertos estándares de manejo de los suelos dentro de la ciudad, la expansión del área urbana y en el orden que se debe llevar la misma. No obstante estas políticas pueden cambiar debido a la evolución del entorno. Estas políticas permiten una visión de la imagen que se quiere adquirir sobre la ciudad.

### **Teoría de planificación ambiental**

La planificación ambiental se enfoca en el manejo de los recursos disponibles que se encuentran en la ciudad para el uso de la comunidad. Uno de los temas más evidentes en la planificación ambiental es la creación de ciudades sostenibles o sustentables. El dilema del

planificador en teoría de planificación ambiental está en que se conoce como el triángulo del planificador el cual contiene en cada uno de las puntas refleja un factor en la ciudad; el crecimiento de la economía, justicia social y protección del ambiente (Campbell & Fainstein, 2007b). El producir un equilibrio entre estas tres perspectivas produce un desarrollo sustentable. Acompañando estas tres perspectivas hay tres conflictos los cuales son el conflicto de desarrollo, el conflicto de propiedad y el conflicto de recursos. Para el conflicto de propiedad se encuentra el dilema de la propiedad privada pero con alguna intervención del gobierno para controlar los desarrollos que se llevan a cabo en el área. Un ejemplo de intervención del gobierno como interés público se puede llevar a cabo en zonificaciones que especifiquen el uso en áreas específicas de la ciudad. El conflicto de recursos tiene como paradigma la utilización de los mismos como materia prima versus la conservación de los mismos. Aquí se puede observar que la creación de políticas de manejo para los recursos es resistida por la industria privada pero la misma necesita de la regulación para mantener el recurso como materia prima. El conflicto de desarrollo es un balance entre los dos conflictos anteriormente discutidos en donde se trata de alcanzar ambos conflictos a la vez. En donde se trata de crear crecimiento de la economía, alcanzar igualdad social mediante se protege los recursos naturales (Campbell & Fainstein, 2007c). Esto es parte de lo que el planificador debe atender en los procesos de planificación de ciudades, el buscar un equilibrio entre las partes triángulo brindando la información necesaria y actuando como negociador en el proceso de planificación.

## **Estudios de casos**

### **Charlotte, Carolina del Norte.**

En la ciudad de Charlotte, Carolina del Norte al igual que en muchas partes de los Estados Unidos se investigan alternativas para el manejo de las aguas de escorrentías y el tratamiento de los contaminantes que cargan con ellas. En este estudio de caso se presenta un biofiltro que trata las aguas de escorrentías provenientes de un estacionamiento para

automóviles el cual es usado por el Departamento de Uso de Terrenos y Servicios Ambientales del Condado de Mecklenburg. El área del estudio de caso consiste de un área de escurrimiento de 0.37 hectáreas. El biofiltro utilizado en este estudio fue instalado entre el estacionamiento y una vía de tren abandonada. El biofiltro fue implementado en el 2003 y fue construido bajo las especificaciones del Manual de Diseño de Mejores Prácticas de Manejo para Aguas de escorrentías de Carolina del Norte. El monitoreo del biofiltro comenzó en febrero de 2004 hasta marzo de 2006 para un período de monitoria de 2 años para la cantidad de 23 eventos de lluvia. Las muestras para el monitoreo de las aguas de escorrentías se llevaron a cabo mediante muestras compuestas adquiridas mediante instrumentos de muestreo automático (ISCO 673) y procedimiento manual (*grab samples*). Los contaminantes que fueron identificados de las muestras de agua fueron nitrógeno total (TN), nitrato y nitrito como nitrógeno ( $\text{NO}_{2-3} -\text{N}$ ), amonía como nitrógeno ( $\text{NH}_4 -\text{N}$ ), sólidos suspendidos totales (TSS), zinc (Zn), cobre (Cu) y plomo (Pb). Los resultados obtenidos para nitrógeno demostraron que no hubo una reducción significativa de  $\text{NO}_2 -\text{N}$  debido a que el sistema no tenía un área de saturación o de almacenamiento interno, el estudio de caso expone que en estudios pasados de sistemas de biofiltración que tenían áreas de almacenamiento interno se experimento una reducción significativa de  $\text{NO}_2 -\text{N}$ . Para TN, y  $\text{NH}_4 -\text{N}$  se obtuvo una reducción significativa de ( $p < 0.05$ ). Para el fósforo se obtuvo que las concentraciones que entraban al biofiltro no eran grandes cantidades por lo tanto la reducción de fósforo no fue tan significativa.

Según los resultados de la investigación para los sólidos y los metales se obtuvo que una reducción de 60% en la salida de las aguas de escorrentías demostrando una reducción significativa para los sólidos y los metales. Como se puede observar este caso se trabajó con una gama amplia de los contaminantes encontrados en las aguas de escorrentías y se obtuvieron resultados positivos de reducción para sólidos y metales pero para nitrógeno y fósforo el diseño del biofiltro podía mejorar la remoción de nitrógeno para llevar acabo una

remoción significativa y para el fósforo las cantidades que llegaban al biofiltro no eran significativas por lo tanto la remoción mostró los mismo.

### **Portland, Oregon.**

La ciudad de Pórtland le brinda servicio a alrededor de 614,000 clientes mediante Biuro de Servicios Ambientales. Los mismos llevan acabo varios proyectos como lo son la separación de alcantarillados, túneles de dos ramas y ahora ha incorporado infraestructura verde para el manejo de las aguas de escorrentías. El estudio de caso en Oregon estipula que en el futuro aproximadamente 40% de los alcantarillados combinados y alrededor de un 50% de los alcantarillados separados se manejarán usando infraestructura verde. Dentro de los proyectos para el control de los desbordes de alcantarillados (CSO) se encuentra un programa de desconexión de tuberías de techo, medidas para la infiltración de agua y tratamiento de las aguas de escorrentías con charcas y humedales artificiales.

Dentro de los proyectos futuros de infraestructura verde que se consideran para la ciudad de Oregon son los jardines de lluvia en las intersecciones de las calles y estacionamientos, pavimento permeable y techos verdes. Como iniciativa la ciudad de Oregon llevo a cabo una inversión de 15,000 dólares para la instalación de bordes vegetativo en la calle de Siskiyou para la captura de las aguas de escorrentías. Los muestreos que se llevaron acabo en esta instalación demuestran una reducción en flujo de 88% y un 85% de reducción del flujo dirigido a los sistemas combinados. Además hay empresas privadas que se han unido a la implementación y beneficiado a través de los proyectos de Infraestructura verde como el Museo de Ciencia de Oregon, el cual llevó una inversión de 78,000 dólares en la implementación de terrenos bajos reforzados en sustitución de sistemas tradicionales de recolección de aguas de escorrentías. El estacionamiento de Centro de Libertad implementó plantadores de infiltración para la recolección de las aguas de escorrentías de 32,000 pies cuadrados aproximadamente recolectando el volumen de una tormenta de 2 años. Otra iniciativa que se está investigando en Portland es el sistema de créditos para aguas de escorrentías, donde créditos se pueden ganar



por el manejo de las aguas o se pueden comprar créditos para añadir capacidad de manejo de las aguas de escorrentías de un lugar que no tenga la capacidad. Se puede observar que la ciudad de Portland tiene la iniciativa de moverse a un manejo de las aguas de escorrentías de manera sostenible mediante la implementación de infraestructura verde y programas que impulsen el movimiento.

### **Northern Kentucky.**

En el distrito No. 1 de saneamiento (*Fort Wright*) se contemplaba la expansión de las facilidades. Los mismos decidieron que las facilidades no debían de ser facilidades convencionales, que las mismas debían de demostrar la eficiencia de Mejores Prácticas de Manejo de las aguas de escorrentía. Hoy día el distrito hace demostración de una docena de Mejores Prácticas de Manejo con una inversión de 3 millones para un área de 5.7 hectáreas los cuales son equivalentes a 14 acres. Los tipos de infraestructura que lleva el lugar son techos con vegetación, cisternas de recogido de agua, pavimento poroso, separador de agua y aceite, bosque urbano, humedales artificiales, biofiltros, charcas de retención, terrenos bajo reforzados. El propósito de la implementación de estos mecanismos además de la filtración de agua y la remoción de contaminantes es la demostración a los desarrolladores que la implementación de este tipo de infraestructura es funcional para el manejo de las aguas de escorrentía. Además de lo antes discutido la facilidad se ha convertido en centro de aprendizaje con un programa educativo para las escuelas que cubren educación sobre las aguas de escorrentías y la calidad de agua. Además se creó un programa para los estudiantes que demuestra el transcurso del agua a través de las facilidades en los diferentes mecanismos. Esta facilidad eventualmente asumirá los sistemas de alcantarillado pluvial para 35 municipios en los tres condados. La facilidad está en proceso de planificación para la monitoria de los mecanismos implementados en la facilidad para visualizar la eficiencia, costo, ahorros y data de mantenimiento que necesitan los desarrolladores para la construcción de estos mecanismos en Kentucky. Para este caso de estudio se puede ver la transformación de las facilidades

industriales del distrito No. 1 en una facilidad sostenible que con el uso de la infraestructura verde lleva el manejo de las aguas de escorrentías para una población de 320,000 personas exitosamente y han creado un programa alterno de educación sobre el manejo y la calidad de agua para los estudiantes del distrito creando una nueva forma de pensar sobre el manejo de las aguas de escorrentías.

### **Ciudad de Bellingham, Washington.**

La ciudad de Bellingham llevo acabo la instalación de dos biofiltros para el manejo de las aguas de escorrentías para la prevención de la contaminación de los cuerpos de agua. El primer biofiltro esta localizado en el centro de la ciudad en la Alcaldía y el segundo esta localizado en Parque Bloedel Donovan. La ciudad decidió tomar una iniciativa en la implementación de biofiltros como infraestructura para el manejo de las aguas de escorrentías. Bajo las alternativas de manejo de aguas de escorrentías la instalación de biofiltros resultó ser una muy costo efectiva para la ciudad de referencia en donde ahorran de un 75% a 80% del costo tradicional de infraestructura utilizado. Además al costo de instalación que es beneficioso se buscaban alternativas para el tratado de las aguas debido al daño que se a experimentando en los ecosistemas específicamente por los contaminantes que son arrastrados por las aguas de escorrentía que han perjudicado a las poblaciones de salmón y crustáceos del área.

El primer biofiltro localizado en la alcaldía de la ciudad fue creado de tres espacios de estacionamiento de los 60 disponibles y el segundo biofiltro fue construido en un área de 550 pies cuadrados de una sección del estacionamiento del parque. Las aguas de este estacionamiento drenaban hacia el Lago Whatcom. Los mismos fueron construidos bajo las especificaciones del *Manual Para el Manejo de Aguas de Escorrentías del Oeste de Washington*. El manual proveyó para los tamaños, tipo de media y vegetación a utilizarse. La ciudad de Bellingham monitorea los biofiltros instalados para comparar el funcionamiento de los mismos mediante el porciento de infiltración y la remoción de los contaminantes, estos resultados serán comparados con los de las aguas no tratadas por los biofiltros.

## **Burnsville, Minnesota.**

Este estudio de caso de la ciudad Burnsville llevó a cabo la implementación de biofiltros en áreas residenciales debido a que los mismos reconocieron que durante las décadas pasadas el Lago Cristal de Burnsville ha disminuido en la claridad del mismo a causa del incremento en fósforo que entra al lago. Reconociendo las descargas de aguas de escorrentías provenientes de los vecindarios cercanos. Una situación particular es que estos vecindarios son vecindarios de más de 20 años los cuales no tenían espacios para mecanismos tradicionales de manejo de aguas de escorrentías por lo cual optaron por la implementación de biofiltros en las áreas residenciales. Los llevaron estudios de las aguas de escorrentías para un área de 5.3 acres con un total de 17 biofiltros. El costo de los biofiltros fue alrededor de unos 7,500 dólares por biofiltro con un costo de 500 en plantas. La información recogida para los biofiltros demuestra una reducción de 80% del volumen de agua en 49 eventos de lluvia. Se ha demostrado una retención en agua y contaminantes en los biofiltros instalados y una aceptación favorable de los residentes hacia los mismos lo cual ha sido un factor importante en el éxito de los mismos.

## **Marco Legal**

Las leyes aplicables a esta investigación son principalmente la Clean Water Act (1972), la Ley de Política Pública Ambiental conocida como la Ley 416 (2004) y el Reglamento de Estándares de Calidad de Agua de Puerto Rico (2010).

## **Clean Water Act**

El CWA se enfoca en la protección de los cuerpos de agua de los Estados Unidos. La misma tiene como objetivo restaurar y mantener la integridad física, química y biológica de los cuerpos de agua de la nación. La misma establece los Programas de Sistema Nacional de Eliminación de Descarga de Contaminantes (NPDES) el programa de dragar y rellenar y de plantas de

agua de tratamiento municipales para prevenir y controlar la descarga de contaminantes a las aguas navegables de los Estados Unidos.

La CWA que se conoce hoy en día da origen en las enmiendas que se llevaron a cabo a la Federal Pollution Control Act (FWPCA) en 1972. Estas enmiendas requirieron a EPA establecer límites de descargas de contaminantes para los cuerpos de agua provenientes de fuentes industriales y plantas de tratamiento municipales de aguas sanitarias. Además se le requirió a la EPA a que estableciera límites de efluente más estrictos para fuentes particulares o grupos en particulares donde era necesaria la protección de porciones específicas de los cuerpos de agua. Estas provisiones; los límites de efluentes, los requerimientos de calidad de agua y el programa de NPDES son la base de la CWA (Sullivan, 2007).

El CWA tiene objetivo, metas y políticas establecidas para el funcionamiento de las misma. La meta del CWA es eventualmente eliminar todas las descargas de contaminantes a las aguas navegables de la nación. Algunas de las políticas que tiene el CWA son “la descarga de contaminantes en cantidades tóxicas” y “que sean desarrollados e implementados programas de para el manejo de la contaminación proveniente de fuentes no estacionarias de manera que las metas de la acta se cumplan mediante el manejo de las fuentes de contaminación estacionarias y no estacionarias (Sullivan, 2007).

La CWA tiene mecanismos para cumplir con los estatutos de la ley algunos de estos mecanismos son los siguientes:

1. Prohibición de descargas, excepto en cumplimiento con el CWA;
2. Un programa de permiso que autoriza las descargas en cumplimiento con el CWA;
3. Un sistema para determinar las limitaciones en descargas autorizadas y reguladas;
4. Un programa de permiso para el control de dragado y relleno en los cuerpos de agua de la nación;
5. Procedimiento para prevenir, reportar y responder a derrames en las agua de la nación.

6. Procedimiento de cooperación entre el Gobierno Federal y Gobierno local que permita la implementación de la ley;
7. Mecanismo de fuerte cumplimiento

### **Ley de Política Pública de Puerto Rico**

Dentro de las leyes estatales del país se encuentra la Ley de Política Pública Ambiental conocida como la Ley 416 enmendada de la Ley sobre Política de Pública Ambiental del 22 de septiembre de 2004, según enmendada.. El motivo principal de la Ley 416 es la protección del ambiente dentro de Puerto Rico a la cual aplica su jurisdicción. Los motivos expuestos en la ley es la necesidad de actualizar la misma hacia los tiempos actuales para proveer la mayor eficaz protección del ambiente y asegurarse que los aspectos ambientales sean integrados y tomados en consideración en todo esfuerzo gubernamental para satisfacer las necesidades sociales y económicas para las generaciones presentes y futuras de puertorriqueños. Mediante la creación de la Junta de Calidad Ambiental como Agencia responsable del cumplimiento de la ley de referencia en Puerto Rico. La misión derogada hacia la JCA por la Asamblea Legislativa de Puerto Rico fue la de proteger el ambiente mediante el control de la contaminación del aire, las aguas, el suelo y la contaminación por ruido; así como utilizar todos los medios y medidas prácticas para crear y mantener las condiciones bajo las cuales el hombre y la naturaleza puedan existir en armonía productiva y cumplir con las necesidades sociales económicas y cualesquiera otras puedan surgir con las presentes y futuras generaciones.

### **Reglamento de Estándares de Agua**

El Reglamento de Estándares de Calidad de Agua (2010) tiene como propósito la protección de los cuerpos de agua reconociendo que la contaminación de las aguas es detrimental para la salud y el bienestar público, crea estorbos públicos, es perjudicial para la

fauna y vida acuática e impide el uso doméstico, agrícolas, industriales, recreativos y otros usos de las aguas.

La meta de la JCA por medio de la creación de este Reglamento es la preservación, conservación, y restauración de la calidad de agua de Puerto Rico. De manera que las mismas sean compatibles con las necesidades sociales, ambientales y económicas de Puerto Rico. Los propósitos del reglamento de referencia son: designar los usos para los cuales la calidad de los cuerpos de agua de Puerto Rico deberá ser mantenida y protegida, prescribir los estándares de calidad de agua para conservar los usos designados, identificar otras reglas y reglamentos aplicables a las fuentes de contaminación que puedan afectar la calidad de las aguas y prescribir medidas adicionales para mantener y alcanzar la calidad del agua.

El Reglamento de Estándares de Calidad de Agua clasifica como diferentes cuerpos de agua de acuerdo a sus valores ecológicos y usos. Las clasificaciones presentadas son: aguas costaneras y estuarinas, aguas superficiales y aguas subterráneas. Dentro de estas tres clasificaciones se encuentran una serie de sub-clasificaciones que definen los tipos de aguas que se encuentran dentro de ellas. Para las aguas costaneras y estuarinas hay tres clasificaciones que son Clase SA, SB y SC, para las aguas superficiales se encuentran las clase SD, SE para las aguas subterráneas se encuentran las clases SG y SG2. Cada una de estas clasificaciones toma en cuenta una variedad de cuerpos de agua en específico con sus respectivas características y usos para efectos de esta investigación no se estarán discutiendo las clasificaciones en detalle.

El artículo 3 del Reglamento de Estándares de Agua expone las cantidades de contaminantes especificados que se pueden descarga para cada una de las clasificaciones de cuerpos de agua antes descritas en la parte anterior. Para los efectos de esta investigación trabajaremos con los estándares de grasas y aceites y sólidos suspendidos para aguas costaneras y aguas estuarinas. Los estándares de calidad de agua establecidos en el Reglamento de Calidad de Agua son narrativos para TSS como para O & G. El parámetro

narrativo para los sólidos suspendidos totales (TSS) según la Regla 1303.1.E establece; “Los sólidos provenientes de fuentes de aguas usadas no deberán ocasionar asentamientos, o perjudicar los usos existentes o designados de los cuerpos de agua”. Para las grasas y aceites (O & G) la Regla 1303.1.H establece lo siguiente; “Las aguas de Puerto Rico deberán estar substancialmente libres de aceites y grasas flotantes no derivados del petróleo así como de aceites y grasas derivados del petróleo”. Como se menciono los parámetros establecidos para ambos contaminantes son narrativos para los cuales no se contiene un parámetro numérico para los mismos.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

El propósito de esta investigación fue evaluar la estrategia de biofiltros para el manejo de las aguas de escorrentía para el centro urbano de Aguadilla para la remediación de contaminantes depositados en las superficies impermeables de las área de investigación. La implementación de este tipo de infraestructura resultaría en la reducción de los contaminantes que son descargados en el Océano Atlántico mediante las aguas de escorrentías que se producen en los evento de lluvia.

La alternativa de biofiltros es evaluada en diferentes países para el manejo de las aguas de escorrentías. La utilización de este tipo de mecanismos para el manejo de escorrentía se ha convertido en una de foco de estudio en diferentes naciones. En Canadá se considera la alternativa de biofiltros para el manejo de los sedimentos provenientes de las construcciones como mecanismos de mejores practicas en los proyectos. En estudios realizados por la Universidad de Guelsh en Canadá los biofiltros compuestos de composta han demostrado ser efectivos en experimentos removiendo entre el 60% y 80% de los sedimentos provenientes de proyectos de construcción (Gharabagni & Rudra, 2008).

La búsqueda de métodos alternos de tratamiento para el agua de escorrentías es practicada alrededor del mundo. La identificación de los contaminantes arrastrados por las escorrentías de agua ha puesto en perspectiva y ha influido en un mejor manejo de los flujos de agua producidos en áreas impermeables. La biofiltración es una alternativa que se esta utilizando en varios países como solución a las descargas de contaminantes. La misma promueve la retención de las aguas para la remoción de los contaminantes antes que descarguen a los cuerpos de agua. Se busca la remoción eficiente de contaminantes que



puedan llegar a los cuerpos receptores de las descargas de los sistemas pluviales del Municipio Autónomo de Aguadilla. La implementación de los biofiltros en el Municipio Autónomo de Aguadilla se puede utilizar como MPM para el Permiso de Descarga NPDES MS4 que sostiene el municipio en la actualidad. La eficiencia de la remoción de los contaminantes debe de aumentar la calidad de agua del cuerpo recipiente protegiendo los mismo como recurso económico, estético y social para el municipio.

### **Área de estudio**

El área de estudio (Figura 1) para esta investigación fue el centro urbano del Municipio Autónomo de Aguadilla. Las actividades principales en centro urbano de Aguadilla son el comercio y residencias. Según el estimado de viviendas para el año 2010 en Aguadilla hay alrededor de 25,998 unidades de vivienda con 19,983 unidades de viviendas ocupadas (Censo, 2010).

Mediante eventos de lluvia se perseguirá la escorrentías de agua para identificación de los flujos y direcciones para dos áreas del Centro Urbano de Aguadilla. Utilizando el Sistema de Información de Geográfica se analizará en el Centro Urbano de Aguadilla los patrones de las aguas de escorrentías a las entradas al sistema pluvial donde se llevara análisis de sólidos suspendidos y grasas y aceites. Utilizando el Mapa de Infraestructura del Municipio Autónomo de Aguadilla se obtuvo que hay 116 entradas pluviales al sistema separado pluvial municipal.

El área de estudio tiene como clasificación, suelo urbano y tiene las siguientes calificaciones dentro de su suelo: (1.) Dotacional General (DT-G), (2.) Dotacional Parque (DT-P), (3.) Comercial intermedio (C-I), (4.) Residencial Comercial Mixto (RC-M), (5.) A mejorarse (M), (6.) Residencial Intermedio (R-I). El lugar de estudio tiene seis usos mixtos complementando las diferentes actividades que se llevan a cabo dentro del suelo urbano del área.

La topografía del área es llana debido a los desarrollos del área. Según el cuadrángulo topográfico de Aguadilla la misma tiene una elevación de 1 a 5 metros sobre el nivel del mar (USDA, 1960). La geología o formaciones geológicas disponible en el área de estudio según el Cuadrángulo Geológico de Puerto Rico son; Depósitos de Arena y Alluvium. *Alluvium* es descrito como arena arcillosa y barro arenoso con pedazos pequeños de piedra volcánica que se encuentran regados en algunas áreas. Los *Depósitos de Arena* consisten en una mezcla de cuartos finos y medianos de arcilla arenosa de color marrón claro moderada. Todo el material identificado en esta categoría se encuentra de 5 metros a 50 metros. Los suelos presentes en el área de investigación según el Catastro de Suelo del Departamento de Agricultura es Arena Catano (Cd) el mismo tiene la descripción de un suelo casi llano que ocurre en franjas a lo largo de la costa en áreas cercanas al mar de permeabilidad es rápida y capacidad de retención y fertilidad baja (USDA, 1975).

El área del estudio es una desarrollada con usos mixtos en donde no existe vegetación y la mayoría de los suelos han sido impermeabilizados por hormigón y asfalto en el desarrollo de edificios, aceras y carreteras. El área de estudio se comporta mayormente como una comercial y residencial según el censo poblacional (Censo, 2010)

El propósito de esta investigación es el análisis de viabilidad de biofiltros en el Centro Urbano de Aguadilla para el manejo de las aguas de escorrentías que son generadas en los eventos de lluvias. Las aguas de escorrentías arrastran consigo contaminantes que llegan a los cuerpos de agua afectando la calidad de los mismos. La alternativa de biofiltros para la filtración de sólidos suspendidos y grasas y aceites para dos sub-cuencas del Centro Urbano de Aguadilla tiene el potencial de mejorar la calidad de las aguas de escorrentías que son generadas en el Centro Urbano de Aguadilla.

## Objetivos

1. Analizar la escorrentía urbana para determinar la calidad de agua que se maneja en el centro urbano del Municipio Autónomo de Aguadilla.
2. Evaluar la viabilidad de ubicación de infraestructura verde (biofiltros) para el manejo de las escorrentías urbana.

## Fuente de datos

Para la investigación identificamos las entradas pluviales utilizando el Mapa de Infraestructura del Municipio Autónomo de Aguadilla. Identificamos 164 entradas pluviales elegiremos dos entradas para el recogido y análisis de las muestras. Para la calidad de agua se recogimos datos primarios utilizando como referencia el manual de "*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*" (2005) con los métodos 1060 B para la recolección de muestras, 2540 D para el análisis de sólidos suspendidos totales, 1664 A de la EPA para el análisis de grasas y aceites.

Utilizando el análisis espacial y recorridos físicos durante eventos de lluvia se identificara los flujos y direcciones de las escorrentías se identificaron dos áreas de estudio dentro del centro urbano de Aguadilla. Utilizando la guía de diseño de la EPA "*Stormwater Best Management Practice Design Guide, Vol. 2: Vegetative Biofilters*", (2004) se calculara coeficiente volumétrico ( $R_v$ ), volumen de calidad de agua ( $V_{wq}$ ) y el área de la superficie de la cama de sembrado ( $A_r$ ) para los biofiltros propuestos en las áreas de estudio.

## Diseño metodológico

El diseño metodológico para la investigación de referencia se sub-divide en tres secciones la primera sección que desarrollamos fue el análisis de las entradas al sistema pluvial dentro del Centro urbano de Aguadilla. Esta información provee una idea general de los puntos de recolección de agua de escorrentía a través del área de estudio. La segunda sección del estudio conlleva la recolección de muestras en dos puntos escogidos para identificar las

características cuantitativas para sólidos suspendidos y grasas y aceites. La tercera sección es la calculación de las aguas de escorrentía para el área propuesta para la instalación de biofiltros. La sección final es la elección del diseño de biofiltro adecuado para el área de la investigación. Las tres secciones antes mencionadas serán discutidas en detalle a continuación.

### **Inventario de entradas pluviales.**

Para el inventario de entradas pluviales dentro del Centro urbano de Aguadilla utilizaremos la información de la infraestructura provista por el Municipio Autónomo de Aguadilla. Llevaremos un análisis detallado de las entradas pluviales que se encuentran dentro del Casco Urbano de Aguadilla. De los puntos identificados en el Mapa de Infraestructura del municipio analizaremos y elegiremos dos localizaciones para el análisis de sólidos suspendidos y grasas y aceites dentro del centro urbano. La elección de las localizaciones se basará primordialmente en su localización, accesibilidad y tipos de actividades llevadas en las áreas de acuerdo sus respectivas calificaciones. Los puntos de recolección de muestras serán marcados con el sistema de posición geográfica (GPS) marca Trimble modelo Geo Explorer 2008.

### **Análisis de muestras**

#### **Método estándar 1060: colección y preservación de muestras.**

Para la colección de muestras utilizaremos el método 1060 según descrito por *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2005). Este método especifica el manejo, almacenamiento y la preservación de las muestras en términos generales. El mismo incluye requerimientos generales, consideraciones de seguridad, tipos de muestras, procedimientos de cadena de custodia, métodos de muestreos, contenedores y volumen de muestras.

Para esta investigación dentro de los temas antes mencionados utilizaremos la toma de muestreos manuales. El tipo de muestra es clasificada como muestras agarradas o *grab samples* por su termino en inglés. Para las muestras recolectadas se creara una hoja de cadena de custodia para el almacenamiento, transporte y entrega al laboratorio. Para las muestras recolectadas utilizaremos los tamaños de muestras y contenedores especificados en cada uno de los métodos especificados para cada contaminante en consideración con el método de referencia.

Para esta investigación recolectaremos un total de 28 muestras en total con 20 muestras para sólidos suspendidos totales y 8 muestras para grasas y aceites. La recolección de muestras la llevaremos a cabo durante eventos de lluvia separados en donde se podrá comparar cuantitativamente las descargas para los contaminantes mencionados durante un período de tiempo. Como descrito los métodos de referencia la muestras fueron recogidas en contenedores de un volumen de 1000 mL según procedimiento establecido por cada método utilizado. Para las muestras recolectadas calcularemos; máximo, mínimo, promedio, media, desviación estándar y varianza.

#### **Método estándar 2540 D: sólidos suspendidos totales**

El método estándar 2540 D conlleva la evaporación del líquido para adquirir el residual de la muestra el cual es los sólidos suspendidos en la misma. La evaporación del líquido la llevaremos a cabo calentando la muestra en un horno entre las temperaturas de 103 a 105 ° C. Luego de haber evaporado el líquido presente en la muestra llevaremos a cabo peso de los sólidos suspendidos presentes en la misma. Para el cálculo de los sólidos suspendidos en la muestra se utiliza la formula  $\text{mg total sólidos/litro} = \frac{[(A-B)1000]}{\text{volumen de la muestra}}$ . El texto antes mencionado es una explicación general del método especificado según *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2005).

Para el análisis de los sólidos suspendidos totales en el agua de escorrentías utilizaremos una botella plástica de 1000 mL. Una vez la muestra este lista para ser recogida

en el punto de muestreo documentaremos la fecha, hora y número de control en la etiqueta asignada al contenedor, la información mencionada se apuntará en la cadena de custodia. La muestra recogida será transportada bajo refrigeración a una temperatura de 4° C. El almacenamiento de la muestra será a la temperatura antes mencionada y no excederá un período de 7 días entre la recolección y traslado hacia el laboratorio. El procedimiento antes descrito repetiremos para las 20 muestras recogidas para el análisis de sólidos suspendidos.

**Método EPA 1664 A: grasas y aceites.**

El método para el análisis de las grasas y aceites (n-hexano) fue creado por la EPA y es utilizado por la misma para las monitorias llevadas a cabo para el CWA y el Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) dentro de la agencia. En términos generales el procedimiento consiste en acidificar una muestra de 1L a un pH < 2 y extraer en serie tres veces n- hexano en un embudo por separado. El extracto es secado en sulfato de sodio. Luego el solvente es destilado del extracto y n- hexano es pesado para concluir sobre el resultado del contenido de la muestra. La fórmula utilizada para calcular el peso de las grasas y aceites es la siguiente  $HEM = (W_n/V_s)$ , donde  $W_n$  representa el peso del material extraído y  $V_s$  representa el volumen de la muestra.

Para el análisis de las grasas y aceites (O & G) utilizaremos contenedores de cristal de 1000 mL limpios. La toma de las muestras la llevaremos a cabo manualmente para cada evento de lluvia en la entrada pluvial elegida. La toma de la muestra la llevaremos a cabo en la entrada pluvial mediante la suspensión del contenedor en el flujo de agua de escorrentía que se encuentra entrando en la entrada pluvial. Para la muestra recogida documentaremos la fecha, hora y número de control en la etiqueta asignada al contenedor, la información mencionada será documentada en la cadena de custodia por igual. La muestra recogida será transportada bajo refrigeración a una temperatura de 4° C. El almacenamiento de la muestra será a la temperatura antes mencionada y no excederá un período de 28 días entre la

recolección y traslado hacia el laboratorio. El procedimiento antes descrito lo repetiremos para las 8 muestras recogidas para el análisis de sólidos suspendidos.

### **Diseño de biofiltro**

Para el diseño del biofiltro se estará utilizando el manual “*Storm Water Management Practice Design Guide, Vol 2: Vegetative Biofilters*” (2004) para calcular el coeficiente volumétrico de escorrentía ( $R_v$ ), el volumen de calidad de agua ( $V_{wq}$ ) y el área de superficie del biofiltro ( $A_f$ ). Para calcular coeficiente volumétrico de escorrentía utilizaremos la formula  $R_v = 0.05 + 0.009(I)$  donde utilizaremos las variables ya dadas para la formula sobre el porcentaje de área impermeable ( $I$ ) que se encuentra en el área de estudio. Luego de calcular  $R_v$  calcularemos el volumen de agua a tratar ( $V_{wq}$ ) utilizando la formula  $V_{wq} = (P)(R_v)(1in/12ft)(A)$  ( $43,560ft^2/acre$ ) donde la precipitación es ( $P$ ), coeficiente volumétrico ( $R_v$ ). Por último calcularemos el área de biofiltro ( $A_f$ ) utilizando la formula  $A_f = (V_{wq})(d_b) / (k)(h_f + d_b)(t_f)$  donde utilizaremos el volumen de agua a tratar ( $V_{wq}$ ), la profundidad de la cama de sembrado ( $d_b$ ), coeficiente de permeabilidad ( $k$ ), altura de la cama ( $h$ ) y tiempo requerido para filtrado a través de la cama de sembrado ( $t_f$ ). Las variables  $d_b$ ,  $k$ ,  $h$  y  $t_f$  son dadas como parte del diseño del biofiltro según la publicación utilizada para los cálculos de referencia.

Para la adquisición de coeficiente de escorrentía utilizaremos los coeficientes dados en la referencia antes mencionada para diferentes tipos de materiales impermeables, para esta investigación los materiales impermeables principales lo son el concreto y el asfalto para los cuales serán utilizados los coeficientes para los mismos. Como último la variable  $A$  para el área de escorrentía que atribuye al área de estudio lo adquiriremos por dos medios (1) observación directa en el campo del flujo de escorrentía a los puntos elegidos y (2) delimitación y medición de área por medio de GIS. Una vez calculado el tamaño de la escorrentía en el área de estudio diseñaremos el biofiltro propuesto utilizando los diseños conceptuales de la literatura “*Storm Water Management Practice Design Guide, Vol 2: Vegetative Biofilters*” (2004).

## Técnicas de análisis

La investigación de referencia utilizaremos técnicas de análisis espaciales, analíticas y estadísticas. Como mencionado en secciones anteriores delimitaremos dos áreas de estudio del centro urbano de Aguadilla utilizando el análisis espacial para el marcado de los flujos de agua que son producidos como escorrentía. El mapa producido marcará la dirección de los flujos contribuyentes a los puntos de descargas de recolección de muestras. Utilizando el Mapa de Infraestructura del Municipio Autónomo de Aguadilla elegiremos dos puntos de recolección de muestras de acuerdo a su localización y accesibilidad. Utilizando las técnicas de analíticas método 1060 B para la recolección de muestras, 2540 D para el análisis de sólidos suspendidos totales y el método 1664 A de la EPA para el análisis de grasas y aceites se analizará el agua de escorrentía para los parámetros mencionados. Para los resultados cuantificados llevaremos análisis estadístico de máximo, mínimo, promedio y mediana,. A partir del análisis espacial y delimitación de las sub-cuencas dentro del centro urbano de Aguadilla aplicaremos las formulas presentadas en la publicación "*Storm Water Management Practice Design Guide, Vol 2: Vegetative Biofilters*" (2004) para calcular coeficiente volumétrico de escorrentía ( $R_v$ ), el volumen de calidad de agua ( $V_{wq}$ ) y el área de superficie del biofiltro ( $A_f$ ). Una vez se halla cuantificado el área de los biofiltros propuestos haremos un análisis físico-espacial para posibles ubicaciones para el tratamiento de las aguas de escorrentías.



## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DEL PROBLEMA**

Las aguas de escorrentías representan un impacto adverso a los cuerpos de agua receptores de estas descargas. Las mismas están reguladas y requieren el establecimiento de estrategias de acción para manejar las mismas. Este proyecto de planificación evaluó la situación actual de las descargas en el centro urbano de Aguadilla y con esta información y con las características físicas del área de estudio diseñaremos un biofiltro. Estos biofiltros tiene la capacidad de manejar en forma muy eficiente los contaminantes que arrastran las escorrentías urbanas.

Las aguas de escorrentías arrastran consigo una serie de contaminantes que se encuentran depositados en las superficies impermeables. Estos contaminantes llegan a los cuerpos de agua afectando la calidad de los mismos por lo tanto afectando sus propiedades químicas y físicas, ecosistemas y los usos de los cuerpos de agua. Una alternativa que se está utilizando en diferentes ciudades son los biofiltros, los cuales contiene como función la filtración del agua mediante un medio compuesto por materiales orgánicos donde parte de los contaminantes son removidos y evo-transpirados hacia la atmosfera como parte del ciclo hidrológico. Esta alternativa como método de planificación de ciudades puede mitigar problemas de inundaciones, infraestructura y contaminación como método de mitigación dentro los antes mencionados. Como problema de planificación investigamos la opción de biofiltros como tratamiento para las descargas de sólidos suspendidos y grasas que se llevan a cabo de las superficies impermeables en el área de investigación.

Para esta investigación utilizamos el inventario de infraestructura del municipio de Aguadilla. El inventario de infraestructura provisto por el municipio de aguadilla indica que en el área del Centro urbano de Aguadilla hay 116 entradas pluviales. Luego del análisis de la

localización de las entradas llevaremos a cabo la elección de los puntos pluviales tomando en consideración los criterios de usos o calificaciones del área, accesibilidad, superficies impermeables, tránsito y actividades realizadas alrededor de las entradas. Los puntos escogidos para la recolección de las muestras son descritos con sus coordenadas en North American Datum (NAD 83). Las coordenadas para la estación A son: Latitud 18° 25' 36.13" N y Longitud 67° 09' 19.81" W; para la estación B la Latitud 18° 25' 40.84" N y la Longitud 67° 09' 17.62" W (Figura 3).

Recolectamos un total de 20 muestras para los sólidos suspendidos totales y un total de 8 muestras para las grasas y aceites. La recolección de las muestras de sólidos suspendidos totales llevaremos a cabo en dos períodos del año, el primer período recolectamos 8 muestras y las llevamos a cabo entre el 13 y 27 de septiembre del 2010 el cual es el período seco o de baja precipitación en Puerto Rico y el segundo período recolectamos 12 muestras y las llevamos a cabo entre mayo 12 y 13 del 2011 el cual representa el período de alta precipitación.

De las 20 muestras recolectadas para sólidos suspendidos totales (TSS) calculamos un promedio de muestra de 267.63 mg/L representando el centro de los datos recolectados. La mediana obtenida para este grupo de resultados fue 216.5 mg/L. De las 20 muestras recolectadas para TSS obtuvimos un máximo de 1033 mg/L y un mínimo de 68.7 mg/L por muestra. El "*Reglamento de Estándares de Calidad de Agua de Puerto Rico*" (2010) establece para los cuerpos de agua clasificados como SC tienen un parámetro de 10 NTU. El equivalente a 1 NTU es 0.13 mg/L.. Dado que el parámetro sería de 1.3 mg/L para TSS indirectamente obtenido del parámetro establecido para turbiedad, se obtiene que los resultados obtenidos para TSS se encuentran por encima de los límites de descarga establecidos.

El segundo contaminante analizado en la investigación fue las grasas y aceites. Para el muestreo de las grasas y aceites llevamos a cabo la recolección de 8 muestras para 8 eventos de lluvias diferentes. La fecha de recolección de muestras la llevamos a cabo entre los

períodos de 22 de septiembre 2010 al 11 de octubre de 2010. La recolección y preservación de muestras la llevamos a cabo utilizando el procedimiento provisto en el método EPA 1664 A. Para el grupo de muestras recolectadas obtuvimos un promedio de 2.7 mg/L y una mediana de 2.5 mg/L. Para las 8 muestras recolectadas se obtuvimos un máximo de 6 mg/L y un mínimo de 0 mg/L. El “*Reglamento de Estándares de Calidad de Agua de Puerto Rico*” (2010) establece un parámetro O & G para los cuerpos de agua de Puerto Rico.

Las cantidades detectadas para TSS y O & G exceden los parámetros establecidos representando daños potenciales a los cuerpos de agua mediante las descargas de los mismos. La descarga de los contaminantes mencionados puede afectar la calidad de los cuerpos de agua de manera física, química y biológica. Además estos efectos afectan los usos de los cuerpos de agua de manera recreativa y económica.

Como mencionado en el capítulo anterior para el diseño del biofiltro calcularemos el coeficiente volumétrico de escorrentía ( $R_v$ ), volumen de calidad de agua ( $V_{wq}$ ) y área de superficie de cama sembrado ( $A_r$ ). Para la Estación A calculamos que tiene un área de 3,611 m<sup>2</sup> y para la Estación B un área de 1,787 m<sup>2</sup>. Para las áreas de estudio se utilizara la precipitación promedio de 2.5 pulgadas (in) para un evento 10 años de la publicación de Atlas 14.

Luego del análisis de múltiples biofiltros proponemos que para las áreas de investigación el biofiltro más adecuado es uno de tipo de bioretención. Los biofiltros de bioretención son utilizados mayormente en áreas ya impactadas por el crecimiento de las ciudades y son recomendadas para áreas con necesidad de remediación dentro de las mismas. Este tipo de biofiltro posee las características adecuadas para utilizarse en las áreas de centro urbano debido a que son espacios ya desarrollados sin mecanismos de tratamiento de aguas de escorrentías contemplados en el inicio del desarrollo del mismo.

Para diseñar el biofiltro de bioretención se utilizaremos la guía “*Storm Water Management Practice Design Guide, Vol 2: Vegetative Biofilters*” (2004). Los parámetros que se utilizaron para este computo son: coeficiente volumétrico ( $R_v$ ), volumen de calidad de agua ( $V_{wq}$ ) y área del biofiltro ( $A_f$ ). El coeficiente volumétrico ( $R_v$ ) el cual representa x cantidad de lluvia que se convierte en agua de escorrentía. El mismo fue calculado utilizando la formula  $R_v = 0.05 + 0.009 (I)$  donde (I) representa el porcentaje de área impermeable dentro del área. Para el área de la estación A calculamos que tiene un coeficiente volumétrico de escorrentía de 0.86 pulgadas para un área impermeable de 90%. Donde para el área de la estación B calculamos que hay un coeficiente volumétrico de escorrentía 0.94 pulgadas para un área impermeable de 99%.

El volumen de calidad de agua representa el volumen de agua que se debe de tratar en las áreas de estudios para esta investigación. Utilizando la formula  $V_{wq} = (P)(R_v) (1\text{in}/12\text{ft})(A)$  ( $43,560\text{ft}^2/\text{acre}$ ) calculamos el volumen de agua a tratarse para ambas áreas. Para el área de la estación A calculamos un volumen de agua a tratar de  $6,946\text{ft}^3$ . Para la estación B calculamos que hay un volumen de agua a tratar de  $3,753\text{ft}^3$ . Luego de obtener el volumen de agua a tratar para ambas áreas genera el dato necesario para utilizar en la calculación del área del biofiltro requerida.

Para el cálculo del área del biofiltros utilizamos la formula  $A_f = (V_{wq}) (d_b) / (k) (h_f + d_b) (t_f)$ . Para el área de la estación A se calculamos que debemos de instalar un biofiltro de un área de  $4,361\text{ft}^2$ . Para el área de la estación B se calculamos que debemos de instalar un biofiltro de un área de  $2,356\text{ft}^2$ . Según diferentes publicaciones investigadas durante esta investigación incluyendo “*Storm Water Management Practice Design Guide, Vol 2: Vegetative Biofilters*” los biofiltros tienen una eficiencia de remoción de 80% para los sólidos suspendidos totales. Para la estación A obtuvimos un promedio de 267 mg/L TSS donde si calculamos el 80% como número base de eficiencia de remoción de TSS para el promedio obtenido en los resultados de las muestras tendría una reducción de 213 mg/L. Estimamos que para las grasas y aceites los

biofiltros tienen una eficiencia de 96% en la remoción de las mismas para la Estación B obtuvimos un promedio de 2.7 mg/L. Si aplicamos un 96% de remoción para el promedio de grasas y aceites que se obtuvimos de las muestras recolectadas tendríamos una reducción de 2.2 mg/L en el mismos.

En resumen pudimos observar que las muestras recolectadas tanto para TSS y O & G exceden los parámetros establecidos en el Reglamento de “*Estándares de Calidad de Agua de Puerto Rico*” (2010). Los resultados mostrados exaltan la necesidad para el tratamiento de las aguas de escorrentías. Los biofiltros como mecanismos de tratamiento presenta el potencial para el manejo de las aguas de escorrentías generadas en el centro urbano de Aguadilla.

## **CAPÍTULO V**

### **ESTRATEGIAS**

Un plan es una afirmación de política en la forma de texto, mapas, graficas utilizada para guiar al sector publico y privado en las acciones que afectan el futuro .Un plan provee a los que toman decisiones con la información que necesitan para tomar decisiones informadas que afecten decisiones a largo plazo de índole social, económica y crecimiento físico de una comunidad (Steiner & Butler, 2007). Este capítulo presenta las estrategias desarrolladas para el manejo de las aguas de escorrentías del centro urbano de Aguadilla. Las estrategias presentadas enfocan el desarrollo de la implementación de biofiltros para el tratamiento de los contaminantes arrastrados por las aguas de escorrentías. Este plan de acción incluye los objetivos y estrategias necesarias para la implementación de biofiltros como mecanismo de mitigación.

#### Objetivos:

1. Evaluar calidad de escorrentía de agua en centro urbano de Aguadilla.
2. Utilizar biofiltros estructurales para el manejo del agua de escorrentía.
3. Evaluar funcionamiento de biofiltros implementados en centro urbano de Aguadilla.

#### Estrategias:

1. Recolección de muestras de escorrentía de agua en punto establecidos para la medición de TSS y O & G.
2. Desarrollar celdas de biofiltración optimas para el tratamiento de TSS y O & G en centro urbano de Aguadilla.

3. Desarrollo de protocolo de mantenimiento para biofiltros establecidos en centro urbano de Aguadilla.

Acciones:

1. Recolección de muestras para TSS y O & G en puntos de entrada a sistema pluvial separado de centro urbano de Aguadilla.
2. Análisis de muestras recolectadas para TSS y O & G.
3. Crear y analizar áreas para construcción de biofiltros en centro urbano de Aguadilla.
4. Establecer el diseño de biofiltro a utilizarse en las áreas de centro urbano de Aguadilla.
5. Establecer especificaciones de materiales y plantas a utilizarse en construcción de biofiltros para el tratamiento de TSS y O & G.
6. Construcción de biofiltro para áreas en centro urbano de Aguadilla utilizando especificaciones establecidas por el municipio.
7. Análisis cuantitativo de remoción de TSS y O & G por biofiltros establecidos.
8. Reparación de componentes de biofiltro según requerido para optimizar y mantener funcionamiento de biofiltro como mantenimiento rutinario.

La asignación de las responsabilidades para la implementación de las estrategias presentadas es una parte fundamental para el éxito de la acción propuesta. A continuación se describen las estrategias y se asignan personal del Municipio Autónomo de Aguadilla para la implementación de las estrategias presentadas en este capítulo.

#### Estrategia 1

La estrategia 1 se compone de la recolección de muestras de escorrentía de agua en puntos de recolección designados en el centro urbano de Aguadilla. La recolección de muestras de escorrentía de agua es una parte esencial en la determinación de TSS y O & G

que se transporta a través del sistema separado pluvial del Municipio de Aguadilla. La recolección de muestras cuantificara los TSS y O & G en los diferentes eventos de lluvia en el centro urbano. A partir de los resultados de la recolección se puede determinar los periodos en que las áreas son mas susceptibles a descargas mayores de TSS y O & G. Establecer las descargas es importante para el entendimiento del efecto de la calidad de agua por el escurrimiento de contaminantes en la escorrentía de agua.

### Estrategia 2

La estrategia 2 es dirigida al desarrollo de diseños estandarizados de biofiltros para ser utilizados en el centro urbano de Aguadilla. El diseño estandarizado para los biofiltros a utilizarse debe de ser capaz de adaptarse en diferentes áreas del centro urbano de Aguadilla. El diseño a utilizarse establecerá los materiales en la construcción del biofiltro de acuerdo a los códigos de construcción establecidos en las regulaciones vigentes del país. Además de los códigos, se especificara especies de plantas a utilizarse en la cama de sembrado. El diseño de biofiltros solamente será adaptado al volumen de agua que debe de ser manejado en la área de implementación. Las especificaciones de construcción establecerá los procedimientos específicos de construcción para el biofiltro a utilizarse. El diseño estandarizado facilitara la implementación de biofiltros en el centro urbano de Aguadilla para la remoción de TSS y O & G a su misma vez proveyendo homogeneidad en diseño y métodos de construcción.

### Estrategia 3

La estrategia 3 comprende el mantenimiento y funcionamiento de biofiltros implementados en centro urbano de Aguadilla esta estrategia es dirigida al desarrollo del protocolo de mantenimiento para los biofiltros que sean implementados. El protocolo se compone de 2 acciones: 1. El análisis cuantitativo de remoción de TSS y O & G por los biofiltros construidos en el centro urbano de Aguadilla 2. Los procedimientos de reparación del biofiltro para



optimizar y mantener el funcionamiento del biofiltro. La recolección de muestras de escorrentía de agua luego de eventos de lluvia tratadas por los biofiltros es fundamental para analizar la función llevada a cabo por los mismos en la remoción de TSS y O & G. Las muestras recolectadas luego de ser procesadas por el biofiltro serán procesadas para la cuantificación de TSS y O & G. La reparación del biofiltro se constituirá de la reparación de la cama de sembrado y remplazo de la plantas. La cama de sembrado constituida por los diferentes medios (mulch, tierra, arena, gravilla) que pueden haber perdido sus propiedades durante la filtración de escorrentía de agua. Estos componentes deberán ser de ser remplazados por materiales nuevos para restituir el funcionamiento del biofiltro construido. El mantenimiento del biofiltro se debe de llevar a cabo en periodo de tiempo no mayor de 6 meses para asegurar el funcionamiento correcto.

<b>Objetivos</b>	<b>Estrategias</b>	<b>Acciones</b>	<b>Dependencia</b>	<b>Expectativa</b>
Utilizar biofiltros estructurales para el manejo del agua de escorrentía.	Identificar áreas potenciales para ubicar biofiltros para el tratamiento de TSS y O & G.	Crear y analizar áreas para construcción de biofiltros en centro urbano de Aguadilla.	Oficina de Planificación y Administración de Proyectos, Oficina de Urbanismo	Preparación de áreas para instalación de biofiltros en centro urbano de Aguadilla.
	Desarrollar diseños celdas de biofiltración optimas para el tratamiento de TSS y O & G en el centro urbano de Aguadilla.	Establecer el diseño de biofiltro a utilizarse en las áreas del centro urbano de Aguadilla.	Oficina de Planificación y Administración de Proyectos	Preparación de diseño estándar de biofiltro en utilizarse en centro urbano de Aguadilla

		Establecer especificaciones de materiales y plantas a utilizarse en construcción de biofiltros para el tratamiento de TSS y O & G.	Oficina de Planificación y Administración de Proyectos	Inventario de materiales de construcción y plantas a utilizarse en construcciones de biofiltros en centro urbano de Aguadilla.
		Construcción de biofiltro para áreas en centro urbano de Aguadilla utilizando especificaciones establecidas por el municipio.	Contratista privado	Diseño de estándar de biofiltro para implementación en centro urbano de Aguadilla.
Evaluar funcionamiento de biofiltros implementados en centro urbano de Aguadilla.	Desarrollo de protocolo de mantenimiento de para biofiltros establecidos en centro urbano de Aguadilla.	Análisis cuantitativo de remoción de TSS y O & G por biofiltros establecido.	Contratista privado	Reducción de TSS y O & G en escorrentía de agua por biofiltros construidos.
		Reparación de componentes de biofiltro según requerido para optimizar y mantener funcionamiento de biofiltro como mantenimiento rutinario .	Oficina de Edificios Públicos, Secretaria de Obras Publicas Municipal o Contratista privado	Optimización de biofiltros para remoción efectiva de TSS y O & G.

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La investigación de referencia presentó la problemática de las descargas de TSS y O&G arrastrados por las aguas de escorrentías que son generadas mediante las superficies impermeables del centro urbano de Aguadilla. Según los resultados obtenidos para la investigación de referencia se pudo observar la presencia de TSS y O & G en las aguas de escorrentías que son manejadas por el sistema pluvial del centro urbano de Aguadilla lo cual representa un reto para el manejo de los mismos. Según los resultados obtenidos para las muestras recolectadas de TSS obtuvimos un promedio de 267.63 mg/L y para las O & G un promedio de 2.7 mg/L.

Debido a la delimitación el centro urbano de Aguadilla se recomienda que la escorrentía pluvial sean manejadas con biofiltros en los puntos seleccionados. Los biofiltros tienen la capacidad de remoción de un 80% para los TSS y un 96% para O & G por lo que son una alternativa eficiente para la mitigación de estos contaminantes en la escorrentía pluvial.

Para la investigación desarrollada se tienen tres recomendaciones. La primera recomendación para la investigación es el desarrollo de parámetros para las descargas que se llevan a cabo al sistema pluvial separado del Municipio Autónomo de Aguadilla. Establecer parámetros brindaría un mecanismo legal para desarrollar diversos controles que promuevan la eliminación de descargas de contaminantes provenientes de las aguas de escorrentías. La segunda recomendación que establecemos es el desarrollo de un manual de infraestructura verde específico para el municipio de Aguadilla que considere las necesidades espaciales de las áreas existentes dentro del territorio. Establecer un manual de este tipo adaptado a las necesidades de los espacios del municipio puede probar ser efectivo para el establecimiento de la infraestructura por proponentes debido a que los mismos tendrán modelos y especificaciones

para la infraestructura a desarrollarse. Por ultimo la tercera recomendación para el manejo de la escorrentía pluvial es el establecimiento de un “*impuesto por impacto*”. Este “*impuesto por impacto*” se establecerá para los usos en el centro urbano de Aguadilla en donde se. El establecimiento del impuesto se puede llevar a cabo mediante la nueva competencia “Exacción por Impacto” establecida en la Ley de Municipios Autónomos también conocida como la Ley 81.

En resumen el proyecto llevado a cabo identificó mediante análisis de muestras las descargas de TSS y O & G que son descargadas por el sistema pluvial del Municipio Autónomo de Aguadilla y presenta una alternativa de desarrollo de bajo impacto para la mitigación de las mismas utilizando los espacios del centro urbano de Aguadilla mediante la implementación de bio-filtros para el manejo de la escorrentía de agua que es generada.

## LITERATURA CITADA

- Asleson, B. Nestingen, R. Gulliver, J. (2007). Cost and Pollutant Removal of Stormwater Treatment Practices. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 133(3):218-219.
- Asleson, B. Nestingen, R. Gulliver, J. (2009). Performance Assessment of Rain Gardens. *Journal of the American Water Resource Association*. 45(4): 1019-1031.
- Baker, L. (2003). Balanced Growth – What It Is Why We Should Care. *Journal of Housing and Community*, vol 60: no6
- Barr Engineering Company. (2006). Burnsville Stormwater Retrofit Study. Minnesota, Estados Unidos. Barr Engineering Company.
- Brooks, P. (2002). *Planning Theory for Practitioners*. 1<sup>ra</sup> edición. American Planning Association.
- Burton Jr GA, Pitt R (ed.). 2002. *Stormwater effects hand-book: a toolbox for watershed managers, scientists and engineers*. Lewis Publishers, CRC Press.
- Camargo JA, Alonso A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment. *Environ Int*. 2006;32:831–849. doi: 10.1016/j.envint.2006.05.002.
- Campbell, C. Fainstein, S. (2002a). Regulation Theory, Post – Fordism and Urban Politics. *Readings in Urban Theory 2<sup>da</sup> edición*. . Reino Unido. Blackwell Publishing Ltd.
- Campbell, C. Fainstein, S. (2002b). Theories of Urban Development and Their Implications for Policy and Planning. *Readings in Urban Theory 2<sup>da</sup> edición*. . Reino Unido. Blackwell Publishing Ltd.
- Campbell, C. Fainstein, S. (2007a). The Death and Life of Great American Cities. *Readings in Planning Theory 2<sup>da</sup> edición*. Reino Unido. Blackwell Publishing Ltd.
- Campbell, C. Fainstein, S. (2007b). The Structure and Debates of Planning Theory. *Readings in Planning Theory 2<sup>da</sup> edición*. Reino Unido. Blackwell Publishing Ltd.
- Campbell, C. Fainstein, S. (2007c). Toward a Non- Euclidian Mode of Planning. *Readings in Planning Theory 2<sup>da</sup> edición*. Reino Unido. Blackwell Publishing Ltd.
- Davis, A.P. (2008). Field Performance of bioretention: Hydrology Impacts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2): 90-95.
- Dodson, D. (1998). Glossary of Storm Water Terms and Acronyms. *Stormwater Pollution Control 2<sup>da</sup> edición*. Estados Unidos: McGraw Hill

- Downs, A. (2005). Smart Growth: Why We Discuss It More Than We Do It. *Journal of the American Planning Association*. 71(4):367-380.
- Duany, A. Talen, E. (2002). Transect Planning. *Journal of the American Planning Association*. 68(3):245-266.
- Eaton, A. Clesceri, L. Rice, E. (2005a). Collection and Preservation. *Standard Methods For The Examination Of Water & Wastewater*. Estados Unidos: American Public Health Association.
- Eaton, A. Clesceri, L. Rice, E. (2005b). Total Solids Dried at 103 – 105° C . *Standard Methods For The Examination Of Water & Wastewater*. Estados Unidos: American Public Health Association.
- Eaton, A. Clesceri, L. Rice, E. (2005c). Oil and Grease. *Standard Methods For The Examination Of Water & Wastewater*. Estados Unidos: American Public Health Association.
- Environmental Protection Agency. (1972). Clean Water Act (Water Pollution Control Act), 33 U.S.C § 1251-1387.
- Environmental Protection Agency. (1996). Safe Drinking Water Act. 42 U.S.C 201.
- Environmental Protection Agency (2004). Stormwater Best Management Practice Design Guide: Volume 1 (EPA/600/R-04-121A). Estados Unidos
- Environmental Protection Agency (2004). Stormwater Best Management Practice Design Guide: Volume 2 (EPA/600/R-04-121B). Estados Unidos
- Facility for Advancing Water Biofiltration. (2008). *Advancing the Design of Stormwater Biofiltration*. Australia: Facility for Advancing Water Biofiltration.
- Friedman, J. (1987). The Terrain of Planning Theory. *Planning in the Public Domain*. Estados Unidos. Princeton University Press.
- Gharabaghi, B. Rudra, R. (2008 febrero). Stormwater Runoff Treatment Using Compost Biofilters. *IECA Annual Conference*. Orlando, Florida, USA.
- Hager, M.C. (2003) Low-Impact Development: Lot-level approaches to storm water management are gaining ground, *Stormwater: The Journal of Surface Water Quality Professionals*, 4 (1)
- Hatt, B. Fletcher, T. Deletic, A. (2009). Pollutant Removal Performance of Field – Scale Stormwater Biofiltration Systems. *Journal of Water Science & Technology*. 59(8): 1567-1576.
- Hoang, T. (2008) Performance evaluation and mathematical modelling of granular activated carbon biofiltration in wastewater treatment. *Korean Journal of Chemistry*. Eng.25 259–267.

- Hunt, W., Brown, R. A. (2009). Field Study of the Ability of Two Grassed Bioretention Cells to Reduce Storm-Water Runoff Pollution. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce*, 135(4), 505-510.
- Hunt, W. & W.G. Lord. (2006). Bioretention Performance, Design, Construction, and Maintenance. *North Carolina Cooperative Extension Service Bulletin. Urban Waterways Series*. AG-588-5. North Carolina State University. Raleigh, NC.
- Hunt, W. Smith, J. Jadlocki, S. (2008). Pollutant Removal and Peak Flow Mitigation by a Bioretention Cell in Urban Charlotte, N.C.. *Journal of Environmental Engineering*. 134(5): 403-408.
- Hsieh, C. Davis, A. (2005). Evaluation and Optimization of Bioretention Media for Treatment of Urban Storm Water Runoff. *Journal of Environmental Engineering*. 131(11):1521-1531.
- Hyland, R. Zuravnsky, L. (2008). Natural Assistance: Green Infrastructure Approaches for CSO Control in Urban Areas. *Journal Water Environment & Technology*. 20(4): 63-69.
- International City/County Management Association. (2002). *Getting to Smart Growth: 100 Policies for Implementation*. Estados Unidos.
- Juncos, M. (2009): Una Solución al Desarrollo Suburbano Insostenible. *Dialogo*. p. 1-3, febrero/marzo.
- Junta de Calidad Ambiental. (2010). Estándares de Calidad de Agua. 7837.
- Junta de Calidad Ambiental. (2004). Ley de Política Publica Ambiental. 8002h.
- Kennedy, G. (2002). *Natural and Constructed Wetlands in Canada: An Overview*. Water Quality Research Journal of Canada, vol (37)
- Larsen, M. Webb, R. (2009). Potencial of Runoff, Fluvial Sediment, and Nurient Discharges on the Coral Reefs of Puerto Rico. *Journal of Coastal Research*. 25(1): 189-208.
- Lau, J. (2000). *Use of a Biofilter for Treatment of Heavy Metals in Highway Runoff*. Water Quality Research Journal of Canada, vol (35)
- National Asociation of Counties. (2001). Protecting Water Resources: Local Government Roles and Options for the Rocky Mountains and the Northern Plains. (X-82738701) Washington, Estados Unidos. *NACO Water Program*.
- North Carolina State University (1999). *Urban Stormwater Structural Best Management Practices*. (E99-39102). Carolina del Norte, Estados Unidos: Extensión Cooperativa de Carolina del Norte.
- North Carolina University. (2003). *An Evaluation of Cost and Benefits of Structural Stormwater Best Management Practices in North Carolina*. (E04-43938) Carolina del Norte, Estados Unidos: Servicio de Extensión Cooperativo de Carolina del Norte.

- North Carolina State University. (2009). *Improving Exfiltration from BMPs: Research and Recomedations*. (E1051856). Carolina del Norte, Estados Unidos: Extensión Cooperativa de Carolina del Norte.
- Oficina del Comisionado de Asuntos Municipales. (2009). Ley de Municipios Autónomos, Ley núm. 81 del 30 de agosto de 1991.
- Parris, T. (2004). *Managing Stormwater. Environment*. volumen (46). 3.
- Puget Sound Action Team. (2004). *Reining In The Rain*. (PSTA04-03). Washington, Estados Unidos: Puget Sound Action Team.
- Runyan C. (2003). Studies Find Sprawl Exacerbates Drought, Threatens Farmlands. *World Watch*. p 1, enero/febrero.
- Servicio Federal de Geología y Departamento de Transportación y Obras Públicas, (1972). *Cuadrángulo de Aguadilla (Topográfico)*. n28.
- Steiner, R. Butler, K. (2007). *Planning and Urban Design Standards*. 1ra edicion. John Wiley & Sons. Estados Unidos. 3pp.
- Sullivan T. (2007). Clean Water Act. *Environmental Law Handbook 19<sup>na</sup> edición*. Estados Unidos de América: Government Institute.
- Sun. D Deng, Z. (2010). *Nonpoint Source Pollution*. Water Environment Research. volumen 82. 1875-94.
- Torres, J. (2001). Impacts of Sedimentation on the Growth Rates of *Montastrea annularis* in Southwest of Puerto Rico. *Bulletin of Marine Science*. 69(2): 631-637.
- United States Department of Agriculture Soil Conservation Service. (1975). *Soil Survey of Mayaguez Area of Western Puerto Rico*. Estados Unidos.
- Water Environment Federation (2009a). Blending Gray and Green. *Water Environmental Technology*. 21(3): 77-81.
- Water Environment Federation (2009b). More Than Over Flow Management. *Water Environmental Technology*. 21(11): 40-44.
- Wossink, G. A., and Hunt, W. F. (2003). *Cost effectiveness analysis of structural stormwater best management practices in North Carolina*. Rep. No. 344, North Carolina Water Resources Research Institute, Raleigh, N.C.
- Viessman, W. (2001). *Introduction to Hydrology*. 5<sup>ta</sup> edición. Prentice Hall.
- Virginia Polytechnic Institute and State University.(2007). *Managing Stormwater for Cleaner Watersheds*. Environment. volumen (49). 7-8.



Zumwald, T. (2006). Leading By Example. *Journal Water Environment & Technology*. 18(9): 78-85.

## TABLAS

Tabla 1

*Resultados de sólidos suspendidos totales en estación A.*

<b>MUESTRA</b>	<b>FECHA DE RECOLECCIÓN</b>	<b>PÁRAMETRO</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>RESULTADO (mg/L)</b>
1	9/11/10	TSS	SM 2540 D	218
2	9/13/10	TSS	SM 2540 D	320
3	9/16/10	TSS	SM 2540 D	208
4	9/16/10	TSS	SM 2540 D	192
5	9/17/10	TSS	SM 2540 D	471
6	9/22/10	TSS	SM 2540 D	68.7
7	9/24/10	TSS	SM 2540 D	1033
8	9/27/10	TSS	SM 2540 D	240
9	5/12/11	TSS	SM 2540 D	329
10	5/12/11	TSS	SM 2540 D	316
11	5/12/11	TSS	SM 2540 D	360
12	5/12/11	TSS	SM 2540 D	308
13	5/12/11	TSS	SM 2540 D	213
14	5/12/11	TSS	SM 2540 D	242
15	5/13/11	TSS	SM 2540 D	133
16	5/13/11	TSS	SM 2540 D	136
17	5/13/11	TSS	SM 2540 D	171
18	5/13/11	TSS	SM 2540 D	85
19	5/13/11	TSS	SM 2540 D	94
20	5/13/11	TSS	SM 2540 D	215

Tabla 2

*Resultados de grasas y aceites en estación B*

<b>MUESTRA</b>	<b>FECHA DE RECOLECCIÓN</b>	<b>PÁRAMETRO</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>RESULTADO (mg/L)</b>
1	9/22/10	O & G	EPA 1664 A	6
2	9/29/10	O & G	EPA 1664 A	2.4
3	10/1/10	O & G	EPA 1664 A	2.9
4	10/3/10	O & G	EPA 1664 A	2.6
5	10/6/10	O & G	EPA 1664 A	1.8
6	10/7/10	O & G	EPA 1664 A	0
7	10/7/10	O & G	EPA 1664 A	2.3
8	10/11/10	O & G	EPA 1664 A	3.6

## FIGURAS



*Figura 1.* Foto aérea centro urbano de Aguadilla.



*Figura 2.* Mapa inventario de entradas pluviales centro urbano de Aguadilla.



0 20 40 80 120 160  
Meters

1:2500

Figura 3. Mapa de área de recolección de muestras en centro urbano de Aguadilla.



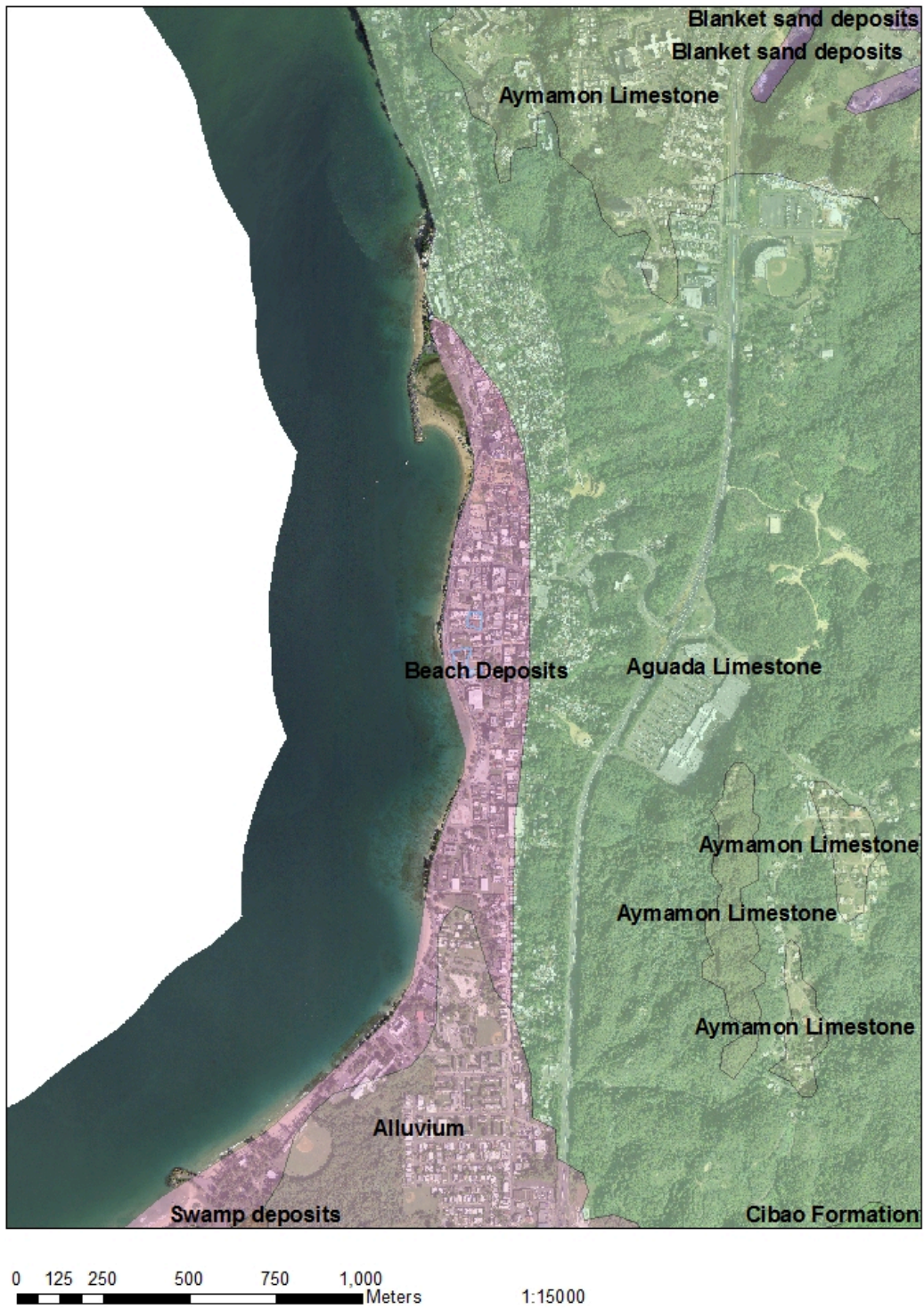


Figura 4. Mapa cuadrángulo geológico en centro urbano de Aguadilla.

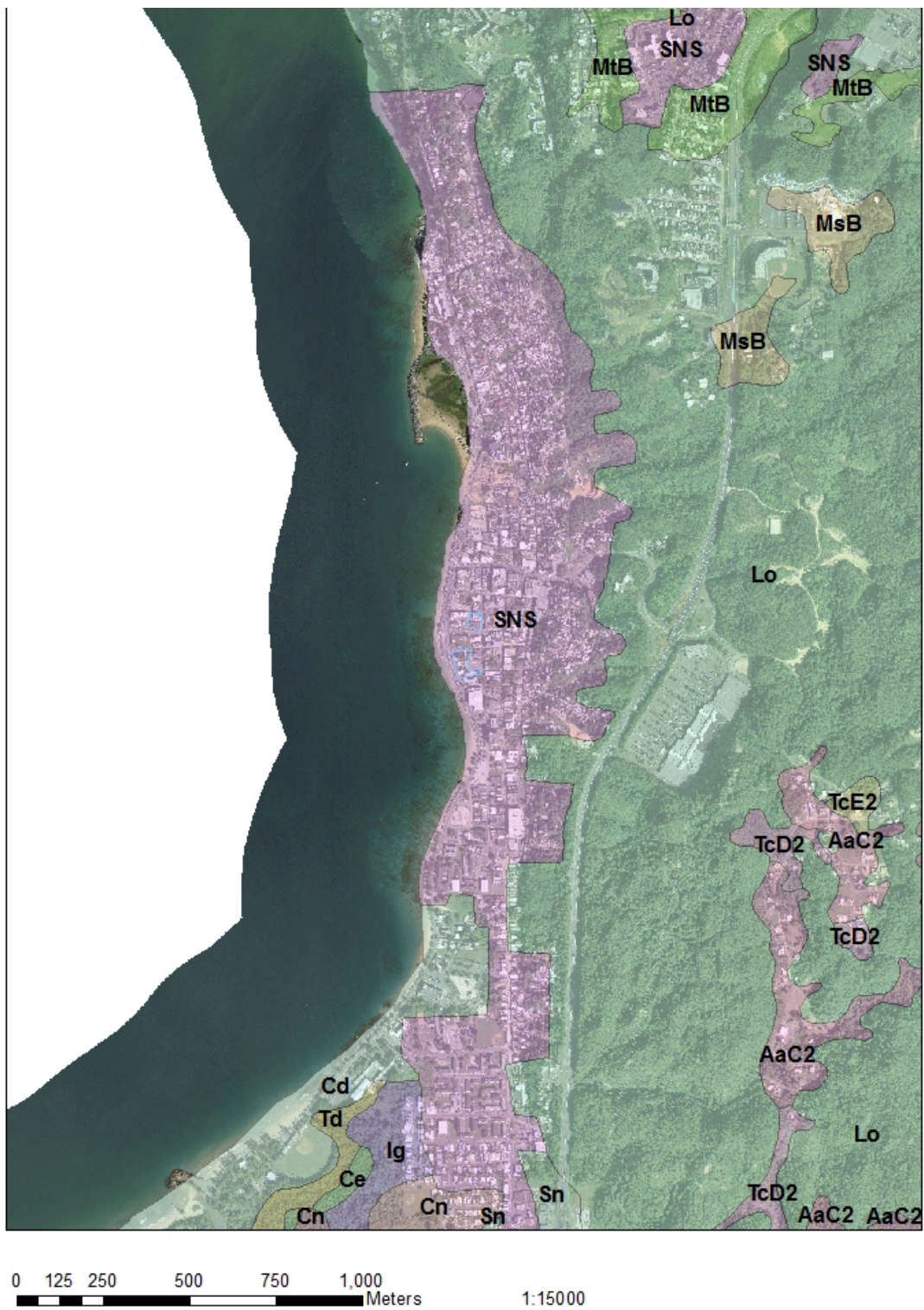


Figura 5. Mapa catastro de suelos centro urbano de Aguadilla.

