

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Estado del Conocimiento del Drenaje Urbano
Sustentable: Necesidad, Perspectiva y Evaluación Nacional.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR

Luis Alejandro, Bautista Berrizbeitia.

Giacomo Francisco, Clerico Henríquez.

TUTOR

Ing. José Ochoa Iturbe.

FECHA

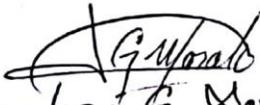
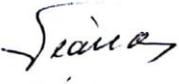
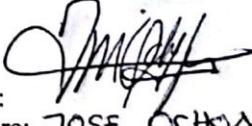
Octubre, 2018.

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

ESTADO DEL CONOCIMIENTO DEL DRENAJE URBANO
SUSTENTABLE: NECESIDAD, PERSPECTIVA Y
EVALUACIÓN NACIONAL.

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: *diez y nueve (19)*

JURADO EXAMINADOR

Firma:  Firma:  Firma: 
Nombre: *Jose G. Morales* Nombre: *MARIA C. VIANA* Nombre: *JOSE OCHOA*

REALIZADO POR:



LUIS A. BAUTISTA B.

GIACOMO F. CLERICO H.

PROFESOR GUÍA:

ING. JOSÉ OCHOA ITURBE

FECHA

OCTUBRE 2018

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseamos agradecer a nuestro tutor el Ing. José Ochoa Iturbe por su orientación, disposición y dedicación para hacer posible este trabajo de grado, gracias por su esfuerzo y apoyo incondicional.

A la profesora Ing. María Viana por su ayuda invaluable desde el inicio de la investigación y por introducirnos a la Ingeniería Ambiental.

A nuestros profesores, el Ing. José Divassón y el Ing. José Morales, por incentivar un interés en el área de drenaje urbano y por su motivación a continuar ayudando al desarrollo del país.

A la Ing. María Gabriela Bausson, al Ing. Juan Pablo Rodríguez, al Arq. Kristian Lund y a la Ing. Liliana Medina por su colaboración brindada para el desarrollo de esta investigación.

A la Universidad Católica Andrés Bello, por proporcionarnos un espacio que formó parte de nuestro crecimiento profesional y personal, y por hacer de él una gran experiencia que siempre recordaremos.

A nuestras amistades y compañeros de estudio, que de alguna manera u otra nos brindaron su apoyo, consejos y amistad en los momentos más difíciles de nuestra carrera.

A nuestros familiares, por ser un motor de enseñanzas y una fuente de inspiración en todas las etapas de nuestras vidas y por creer en nosotros.

Al Ing. Juan Francisco Clerico, por contribuir en el desarrollo de este trabajo en todo momento, por su compañía en largas horas de trabajo y por haber compartido sus conocimientos.

Por último, a todos aquellos que no han sido mencionados, que a pesar de esto fueron importantes para cumplir nuestros logros.

“En todo amar y servir”

SINOPSIS

Los sistemas de drenaje urbano sustentable (SUDS) son técnicas esenciales para el manejo eficiente de las aguas de lluvia, las cuales permiten mitigar los efectos de estas, mejorar la calidad del agua y ser fuente de abastecimiento para cumplir con las demandas de agua que cada día aumentan. Estos sistemas proporcionan un sinnúmero de soluciones que van de la mano con la gestión integral del agua para poder darle un uso adecuado a los recursos hídricos y también servir como alternativa para mitigar o minimizar los efectos de sequías e inundaciones.

En el desarrollo de esta investigación se realiza un estudio general que sirve como un sustento teórico para aplicarse en el área de la sustentabilidad y para proporcionar una alternativa que ayude a mejorar la gestión de aguas que hoy en día se realizan en las áreas urbanas. Esta búsqueda se centra en la recopilación y análisis de información de diferentes técnicas utilizadas en los sistemas de drenaje urbano en el mundo y así conocer sus funciones y aplicaciones en proyectos de distintos países que sirvan como una evidencia notable de los cambios positivos que los SUDS ocasionan en una población. Estos documentos encontrados contribuyen en la realización de una evaluación general en diferentes ciudades de Venezuela para así facilitar alternativas para ser aplicadas en dichas entidades.

Finalmente se presenta la parametrización de los diferentes criterios de selección de cada uno de los mecanismos de los SUDS bajo las condiciones establecidas en el desarrollo de esta investigación, a través de la cual se generan una serie de tablas que funcionan como complemento para lograr comparar y sugerir los diferentes sistemas a cada ciudad seleccionada. Adicionalmente, se suministran conclusiones y recomendaciones acerca de los hallazgos analizados en este trabajo, a partir de las cuales se puedan realizar futuras investigaciones.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	II
SINOPSIS.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XI
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XII
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES	2
1.4 OBJETIVOS	3
1.4.1 <i>General</i>	3
1.4.2 <i>Específicos</i>	3
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	4
2.1 GESTIÓN DE AGUAS.....	4
2.1.1 <i>Ciclo Hidrológico</i>	4
2.1.2 <i>Drenaje Urbano Convencional</i>	8
2.1.3 <i>Gestión de Aguas Pluviales</i>	9
2.1.4 <i>Legislación</i>	11
2.2 DRENAJE URBANO SUSTENTABLE.....	12
2.2.1 <i>Sustentabilidad y Desarrollo sustentable</i>	12
2.2.2 <i>Filosofía y Alcance del Drenaje Urbano Sustentable:</i>	13

2.2.2.1 De lo Convencional a lo Sustentable:	13
2.2.2.2 Objetivos de los SUDS.....	17
2.2.2.3 Criterios de los SUDS	21
2.2.2.4 Funciones de los SUDS.....	23
2.2.2.5 Beneficios de los SUDS.....	24
2.2.2.6 Inconvenientes de los SUDS.....	25
2.2.2.7 Clasificación de los SUDS.....	26
2.2.2.8 Mecanismos de los SUDS.....	28
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	52
CAPÍTULO IV: DESARROLLO	54
4.1. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE SUDS	54
4.1.1. Selección del sitio	54
4.1.2 Selección del mecanismo.....	56
4.1.3 Dificultades y restricciones.....	58
4.2 CASOS A NIVEL MUNDIAL.....	60
4.2.1 High Point, Seattle, United States	60
4.2.2 Tanner Springs Park, Portland, USA.....	62
4.2.3 Herne Hill and Dulwich, London, UK.....	64
4.2.4 Benaguasil, Valencia, España.....	65
4.2.5 El Prisma, Nuremberg, Alemania	67
4.2.6 Experiencias de “Ecobarrios” en México	69
4.3 IMPLEMENTACIÓN EN VENEZUELA	70
4.3.1 Lago de Maracaibo (Zona I)	74
4.3.2 Centro-occidente (Zona IV).....	75

4.3.3 Litoral Central (Zona VI)	77
4.3.4 Centro (Zona VII)	78
4.3.5 Tuy-Barlovento (Zona VIII).....	79
4.3.6 Llanos Orientales (Zona XI).....	81
4.3.7 Oriente (Zona XIII)	82
4.3.8 Guayana (Zona XIV).....	83
4.3.9 Aspectos Generales del Estudio.....	84
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....	86
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES.....	88
BIBLIOGRAFÍA.....	89
ANEXOS.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1. Ciclo hidrológico	5
Figura N°2. Cambios de la superficie impermeable debido a la urbanización	6
Figura N°3. Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno natural	7
Figura N°4 . Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno de baja urbanización	7
Figura N°5. Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno altamente urbanizado.....	7
Figura N°6. Esquema ilustrativo de un sistema de drenaje urbano	9
Figura N°7. Aumento del volumen de escorrentía y disminución del tiempo de concentración, lo que determina el incremento del caudal pico.....	10
Figura N°8. Funcionamiento hidrológico de la cuenca, en estado urbanizado convencional con drenaje convencional y en estado urbanizado convencional con planteamiento y drenaje sostenibles	14
Figura N°9. Evolución cronológica del drenaje urbano tradicional al drenaje urbano sostenible (SUDS).....	16
Figura N°10. Los cuatro pilares del diseño de los SUDS	18
Figura N°11. Ejemplo de instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales	28
Figura N°12. Ejemplos de techos verdes	30
Figura N°13. Ejemplos de pavimentos permeables	32
Figura N°14. Ejemplos de zanjas de infiltración	34
Figura N°15. Ejemplos de pozos de infiltración.....	36
Figura N°16. Ejemplos de franjas filtrantes.....	37
Figura N°17. Ejemplo de dren filtrante	39
Figura N°18. Ejemplo de cuneta verde	41

Figura N°19. Ejemplo de área de bioretención	43
Figura N°20. Ejemplo de un estanque de retención.....	45
Figura N°21. Ejemplo de un humedal artificial	47
Figura N°22. Ejemplo de un depósito de retención	49
Figura N°23. Diagrama organizacional asociado a la recopilación de información básica y relevante de drenaje sustentable.....	52
Figura N°24. Diagrama de flujo de la metodología	53
Figura N°25. Metodología general de selección de tipologías	58
Figura N°26. Calles permeables y sistemas de bioretención de High Point, Seattle	60
Figura N°27. Vista del parque Tanner Springs Park	62
Figura N°28. Instalación de los tanques geocelulares y vista del parque en Dulwich.....	64
Figura N°29. Vista panorámica del municipio de benaguasil y la implementación de los SUDS	65
Figura N°30. Vista interior del edificio Prisma y ciclo del agua dentro del desarrollo.....	67
Figura N°31. Técnicas de drenaje sustentable implementadas en México.....	70
Figura N°32. Regiones Hidrológicas de Venezuela.	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1. Comparación entre el sistema de drenaje convencional y el sistema alternativo SUDS	15
Tabla N°2. Criterios para garantizar controlar la cantidad de agua.....	21
Tabla N°3. Criterios para garantizar la calidad de agua	22
Tabla N°4. Criterios para garantizar un buen servicio.....	22
Tabla N°5. Criterios para garantizar establecer biodiversidad	23
Tabla N°6. Beneficios y limitaciones de las instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales	29
Tabla N°7. Beneficios y limitaciones de los techos verdes	31
Tabla N°8. Beneficios y limitaciones de los pavimentos permeables	33
Tabla N°9. Beneficios y limitaciones de las zanjas de infiltración.....	35
Tabla N°10. Beneficios y limitaciones de los pozos de infiltración.....	36
Tabla N°11. Beneficios y limitaciones de las franjas filtrantes	38
Tabla N°12. Beneficios y limitaciones de los drenes filtrantes	40
Tabla N°13. Beneficios y limitaciones de las cunetas verdes.....	42
Tabla N°14. Beneficios y limitaciones de las áreas de bioretención	44
Tabla N°15. Beneficios y limitaciones de los estanques de retención.....	46
Tabla N°16. Beneficios y limitaciones de los humedales artificiales.....	48
Tabla N°17. Beneficios y limitaciones de los depósitos de detención	50
Tabla N°18. Aspectos y criterios considerados en la metodología para la selección de SUDS...	56
Tabla N°19. Dificultades referentes a la planeación, diseño e implementación de los SUDS	59
Tabla N°20. Aspectos generales del proyecto High Point	61

Tabla N°21. Aspectos generales del proyecto Tanner Park.	63
Tabla N°22. Aspectos generales del proyecto Herne Hill and Dulwich.	65
Tabla N°23. Aspectos generales del proyecto Benaguasil	66
Tabla N°24. Aspectos generales del proyecto Prisma.	68
Tabla N°25. Condiciones para la selección de la tipología según las características físicas del suelo.	71
Tabla N°26. Selección de la tipología según los aspectos hidrológicos.	71
Tabla N°27. Selección de la tipología de los SUDS según los aspectos ambientales y de amenidad.	72
Tabla N°28. Selección de la tipología de los SUDS según los costos asociados.	72
Tabla N°29. Selección de la tipología según los usos del suelo.	73

ÍNDICE DE GRÁFICOS.

Gráfico N°1. Rendimiento usual de las instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales.....	30
Gráfico N°2. Rendimiento usual de los techos verdes.....	32
Gráfico N° 3. Rendimiento usual de los pavimentos permeables	34
Gráfico N°4. Rendimiento usual de las zanjas de infiltración.....	35
Gráfico N°5. Rendimiento usual de los pozos de infiltración.	37
Gráfico N°6. Rendimiento usual de las franjas filtrantes	39
Gráfico N°7. Rendimiento usual de los drenes filtrantes.....	40
Gráfico N°8. Rendimiento usual de las cunetas verdes	43
Gráfico N°9. Rendimiento usual de las áreas de bioretención.....	45
Gráfico N°10. Rendimiento usual de los estanques de retención.	47
Gráfico N°11. Rendimiento usual de los humedales artificiales	49
Gráfico N°12. Rendimiento usual de los depósitos de retención.....	51

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N°1. Restricciones presentadas para las tipologías analizadas con respecto a la pendiente del terreno, distancia al nivel freático, tasa de infiltración y distancia a cimientos.....	95
Anexo N°2. Procesos principales en las tipologías evaluadas.....	95
Anexo N°3. Selección de obras de infiltración por condiciones del lugar.	95
Anexo N°4. Selección de obras de almacenamiento por condiciones del lugar.....	96
Anexo N°5. Selección de obras de infiltración por tipo de red y urbanización.....	96
Anexo N°6. Selección de obras de almacenamiento por tipo de red y urbanización.	97
Anexo N°7. Ejemplo de matriz de selección por uso de suelo..	97
Anexo N°8. Selección de la tipología según coberturas de espacio público..	98
Anexo N°9. Restricciones presentadas para 11 de 12 tipologías propuestas con respecto a: Pendiente del terreno, distancia al nivel freático, tasa de infiltración y distancia a cimientos.	98
Anexo N°10. Comparación cualitativa entre eficiencias de remoción de escorrentía para las diferentes tipologías	99
Anexo N°11. Preselección de tipologías de SUDS de acuerdo con la selección de áreas potenciales	99
Anexo N°12. Calificación de tipologías según eficiencia de remoción de contaminantes.....	100
Anexo N°13. Calificación tipologías según eficiencia de reducción de volúmenes de escorrentía.	100
Anexo N°14. Calificación de tipologías según contribución a la amenidad.	101
Anexo N°15. Áreas inundables de Venezuela.	101
Anexo N°16. Consumo de energía eléctrica por entidad federal (Gwh), en el 2003.....	102
Anexo N°17. Mapa de tipos climáticos de Venezuela.....	102

Anexo N° 18. Velocidad de infiltración de los suelos en Venezuela.	103
Anexo N°19. Datos de precipitación mensual en mm. Precipitación media histórica para estaciones seleccionadas.....	104
Anexo N° 20. Datos de precipitación mensual en mm. Precipitación media histórica para estaciones seleccionadas.	105

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

El agua es un recurso imprescindible para la humanidad que cada día se hace más difícil de obtener. A nivel mundial, el agua se considera importante ya que es el eje primordial de una sociedad y sin ella no existiría vida. Actualmente, la tasa de crecimiento poblacional se ha incrementado radicalmente, aumentando proporcionalmente la demanda de agua. A partir de esto, la búsqueda de fuentes de agua se hace cada vez más exhaustiva e indispensable para así poder satisfacer las necesidades de todas las personas que hoy en día se están concentrando en las grandes urbes (“aproximadamente un 55 % de la población mundial vive en ciudades” (Banco Mundial, 2018).

Al tener en cuenta que la cantidad de agua aprovechable es limitada, una de las posibles alternativas para subsanar esta problemática es la reutilización de las aguas pluviales en las ciudades, para así reducir las demandas de agua y ser un complemento en su suministro. Esta iniciativa, además de aportar agua, ayuda de acuerdo con Ochoa Iturbe (2017) a: “Aliviar las demandas del líquido, aumentar la resiliencia de la ciudad a inundaciones, crear reservas de agua subterránea o superficial para riego o abastecimiento en caso de sequías, y mejorar en algunos casos el paisaje para disfrute visual de los ciudadanos.”

En algunas partes del mundo se ha estado desarrollando el concepto de aprovechar las aguas de lluvia, implementando un sistema de recolección de aguas pluviales, que permita dar a conocer un nuevo concepto en cuanto a la gestión de aguas en las ciudades, creándose el sistema urbano de drenaje sustentable (SUDS). Los SUDS son (Perales y Valls, 2013):

Un amplio abanico de soluciones que permiten afrontar el planeamiento, diseño y gestión de aguas pluviales en entornos urbanos dando tanta importancia a los aspectos medioambientales, paisajísticos y sociales como a los hidrológicos e hidráulicos. Su función es evitar, reducir y retrasar el vertido de agua de lluvia a la red de colectores o a los cursos de agua receptores, tratando de imitar el comportamiento de la cuenca en

su estado natural, reproduciendo en lo posible tanto los caudales y volúmenes naturales como la calidad de sus aguas

Por lo que se puede decir que los SUDS buscan amortiguar, tratar y reutilizar el agua dependiendo de las necesidades de donde se quieran implementar.

En Venezuela existe una cierta noción del tema, por ello se desea generar conciencia en la sociedad de que el agua no se debe desperdiciar. Adicionalmente, la aplicación de los SUDS permitiría reducir riesgos en infraestructuras, disminuir algunos costos en energía, prevenir la sobreexplotación de acuíferos, entre otros beneficios.

1.2 Antecedentes

En cuanto a los sistemas urbanos de drenaje sustentable (SUDS) existen países que se encuentran muy avanzados en la implementación de esta nueva técnica, entre los cuales están: Estados Unidos, Australia, España, Singapur, Chile, entre otros; siendo éstos los principales puntos de partida para el análisis de información y el estudio de sus diferentes casos.

Por otra parte, en Venezuela existen una serie de trabajos de grado relacionados con el tema, con respecto a los techos verdes y humedales se pueden destacar los trabajos realizados por Acuña, Rubén y Estevez, Carlos (2013) “Factibilidad, Diseño e Instalación de un Techo Verde en el Edificio de Postgrado de la Universidad Católica Andrés Bello en Caracas” y por Aranguren, Luis y Marrero, Vanessa “Uso del Lirio de Agua (*Eichhorniacrassipes*) para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas”. También se encuentra un trabajo de grado dedicado a las metodologías de drenaje sustentable realizado por De Pinho, Katherine y González, Williana (2015) “Factibilidad para el desarrollo de drenajes sustentables en el campus de la Universidad Católica Andrés Bello”. Por último, se quiere destacar el trabajo presentando por el Ing. José Ochoa Iturbe ante la Academia Nacional de la Ingeniería y del Hábitat para su ingreso como miembro de esta, titulado: “El Drenaje y su Importancia para una Ciudad Sustentable”.

1.3 Alcances y Limitaciones

El alcance de este trabajo de grado es proporcionar información sobre una alternativa hidráulica que colabore en flexibilizar los impactos hidrológicos ocasionados por el cambio climático, para así impedir consecuencias como la degradación de los ríos y quebradas ubicadas

aguas abajo de los centros urbanos, inundaciones, sequías, amortiguar picos de crecidas, entre otros efectos. Conjuntamente, se busca dar a conocer otras ideas en la gestión de aguas en Venezuela para así facilitar la recarga de acuíferos, disminuir parte del consumo de agua reutilizando aguas de lluvia como aguas grises, entre otras soluciones. Con respecto a las limitaciones está el tiempo para la investigación y dificultades que puedan surgir en el proceso.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

- Recopilar y revisar la información relativa a los sistemas de drenaje que se orientan a la sustentabilidad.

1.4.2 Específicos

- Realizar un análisis entre los diferentes mecanismos y aplicaciones de los sistemas de drenaje urbano sustentable en el mundo.
- Identificar los posibles sistemas de drenaje urbano sustentable que surjan de la búsqueda de información y su comparación para el posible uso en Venezuela.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Gestión de Aguas

2.1.1 Ciclo Hidrológico

Es un proceso que busca describir el almacenamiento y movimiento del agua superficial y subterránea. Según Chow et al. (1994) el ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología, no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua, y lo describe de la siguiente forma:

El agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa.

Se puede apreciar como Chow et al. (1994) describe el ciclo hidrológico en diferentes etapas. En la Figura N°1 se muestra de forma esquemática dichas etapas:

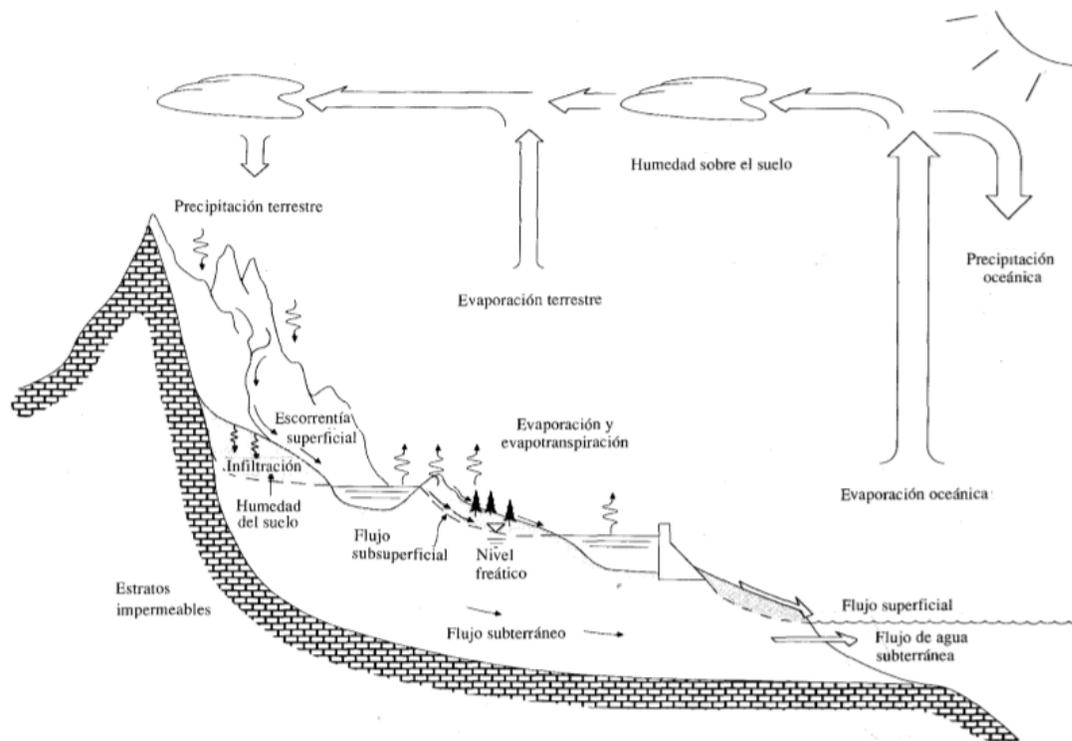


Figura N°1. Ciclo hidrológico. Fuente: Chow et al.,1994

Adicionalmente, el ciclo hidrológico es diferente dependiendo de la zona en la que se encuentre, siendo estas: “Naturales, rurales o urbanas” (Castro et al., 2008). Las zonas urbanas han crecido exponencialmente en los últimos años generando alteraciones en el ciclo natural del agua, una de las razones es por el aumento de la impermeabilización del suelo la cual genera una disminución importante en la infiltración provocando así una mayor escorrentía. Según Prince George's County (1999), la variabilidad de escorrentía e infiltración depende de la impermeabilidad que presenta el suelo, que se puede ver representando en la Figura N°2.

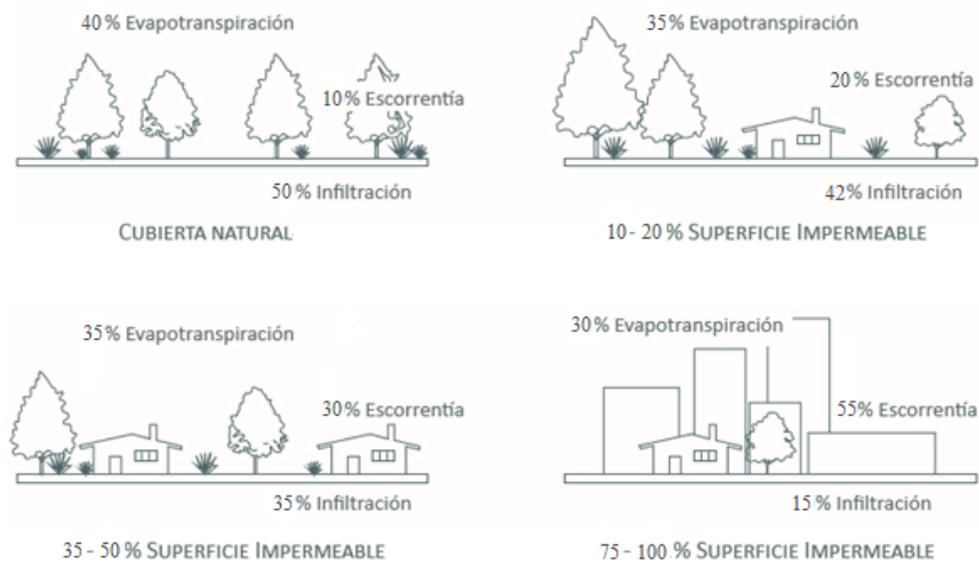


Figura N°2. Cambios de la superficie impermeable debido a la urbanización Fuente: Prince George's County, 1999

En cambio, de acuerdo a García (2011) esa variación es diferente:

Se estima como media que en una zona natural sin urbanizar, el porcentaje de agua que se gestiona sin producir escorrentía, es de un 95%. En el caso de una zona urbanizada de baja densidad, como pueden ser entornos rurales y zonas residenciales fuera de los núcleos de las ciudades, el valor de infiltración decrece hasta un 30%, con lo que se genera una escorrentía del 70%. Por último, en el caso de una zona urbana de alta densidad, como pueden ser las ciudades de cierta envergadura, prácticamente el valor de infiltración es despreciable y se genera un 95% de escorrentía superficial que es necesario drenar y gestionar para poder obtener unas condiciones óptimas de habitabilidad.

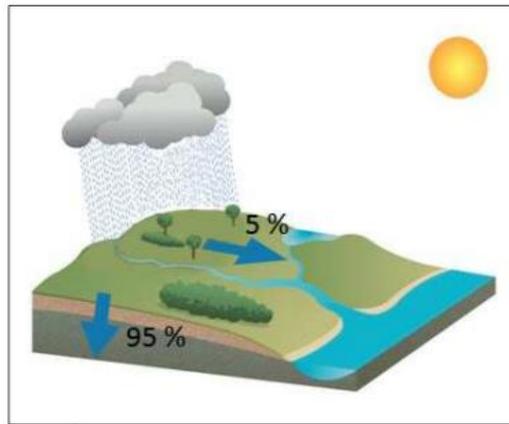


Figura N°3. Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno natural. Fuente: García, 2011

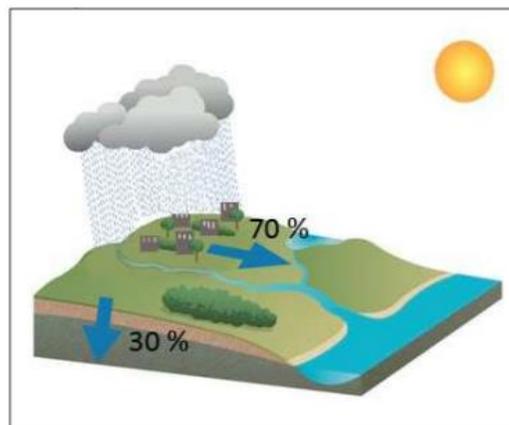


Figura N°4 . Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno de baja urbanización. Fuente: García, 2011

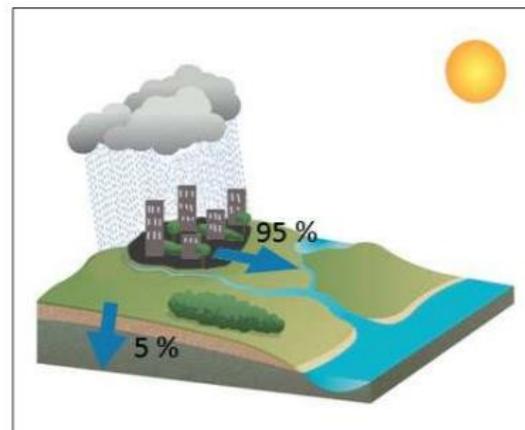


Figura N°5. Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno altamente urbanizado. Fuente: García, 2011

Apreciando de esta manera como ha aumentado la impermeabilización en las zonas urbanas debido al rápido crecimiento de las poblaciones, los cuales proporcionan un aumento de volúmenes de escorrentía y, en consecuencia, se ha tenido que diseñar a través del tiempo sistemas de drenaje capaces de desalojar dichos volúmenes.

2.1.2 Drenaje Urbano Convencional

Según (Bolinaga, 1979):

Se entenderá por sistema de drenaje urbano un conjunto de acciones, materiales o no, destinadas a evitar, en la medida de lo posible, que las aguas pluviales causen daños a personas o a las propiedades en las ciudades u obstaculicen el normal desenvolvimiento de la vida urbana; es decir, dirigidas al logro de los objetivos establecidos.

De esta manera, se puede comprender que el principal objetivo de un drenaje urbano es evacuar rápidamente las escorrentías en la superficie generadas por las precipitaciones, de tal forma que se limite la presencia de inundaciones para así garantizar la protección de la población urbana, su calidad de vida y el correcto funcionamiento de sus actividades diarias.

Los sistemas de drenaje urbano son infraestructuras necesarias para el manejo, control, conducción y descarga adecuada en el drenaje natural (red de cauces de una cuenca) del agua de origen pluvial generada en ambientes urbanos. Este se diseña para desalojar excedentes de agua en un área determinada, evitando así su efecto dañino.

El drenaje urbano está compuesto por: drenaje superficial, drenaje secundario y drenaje primario. El drenaje superficial abarca lo comprendido desde el sitio donde cae la lluvia hasta la incorporación al drenaje secundario o el sistema primario. El drenaje secundario se extiende y ramifica por la zona y capta el aporte superficial hasta su descarga en el drenaje primario; este drenaje garantiza el libre tránsito de personas y vehículos. Por último, el drenaje primario está constituido por las obras receptoras y conductoras del escurrimiento de una zona. El fin de este drenaje es garantizar el grado de protección esperado: vida de las personas y evitar daños a propiedades e infraestructura (Bolinaga, 1999).

A continuación, se presenta un esquema ilustrativo del sistema de drenaje urbano:

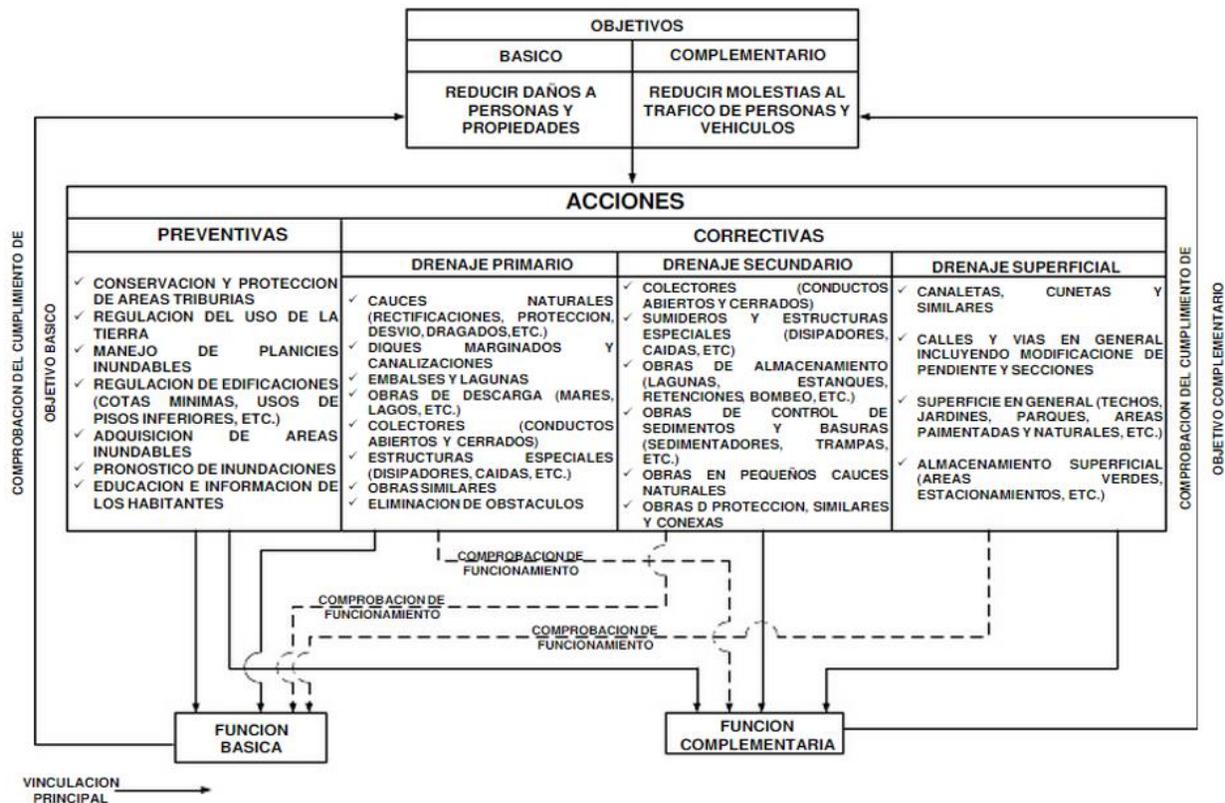


Figura N°6. Esquema ilustrativo de un sistema de drenaje urbano. Fuente: Bolinaga, J., 1979

2.1.3 Gestión de Aguas Pluviales

Cuando hablamos de la gestión de aguas pluviales, García (2012) se refiere a esta como: “la mitigación de los principales problemas que pueden ocasionar estas aguas, pero también a su puesta en valor para los habitantes de las ciudades y la recuperación de los ecosistemas que llevan asociados”. Se puede destacar que parte de los problemas ocasionados por este recurso hídrico son: la cantidad de agua con respecto a los posibles riesgos que se pueden generar, la calidad de esta dependiendo de los aspectos químicos, físicos y microbiológicos que presente y el servicio ofrecido para garantizar el bienestar y la comodidad de los ciudadanos.

En cuanto a la cantidad, como ya se dijo anteriormente, el ciclo hidrológico natural se ve interceptado o interrumpido por asentamientos urbanos que cubren la superficie vegetal de

captación e impiden que el agua se infiltre, generando una aceleración en el tiempo de respuesta en los procesos de amortiguación de las escorrentías superficiales y aumentando los caudales picos de las crecidas. En otras palabras, el aumento de áreas impermeabilizadas tras la asignación de nuevos usos del suelo, produce un incremento en los volúmenes de escorrentía generando de esta manera inundaciones (Domenech y Perales, 2008). A continuación, se muestra en la Figura N°7 como se puede apreciar el impacto que ocasiona el efecto de la urbanización como consecuencia de la impermeabilización en comparación con un área sin urbanizar:

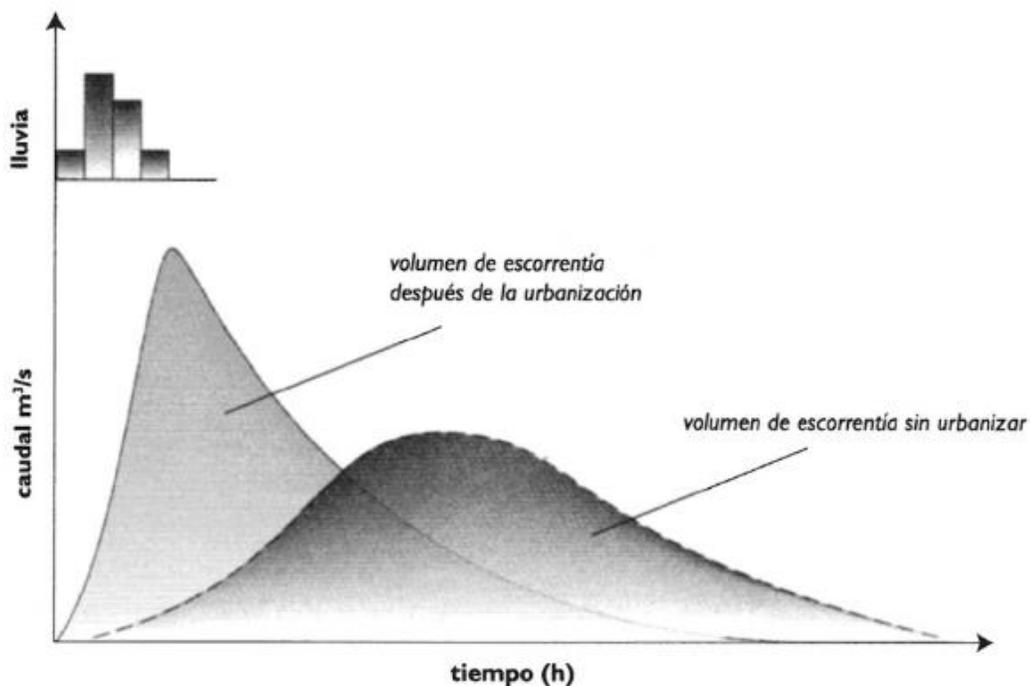


Figura N°7. Aumento del volumen de escorrentía y disminución del tiempo de concentración, lo que determina el incremento del caudal pico. Fuente: Trapote, 2013

Otro aspecto importante a considerar es la calidad del agua de lluvia. Es necesario tener en cuenta que gracias a las actividades humanas se genera un amplio abanico de contaminantes tanto en la atmósfera, como en la superficie, que afectan notoriamente la calidad de las aguas de lluvia. Estas aguas al precipitar encima de una ciudad absorben todas las impurezas que existen en la atmósfera y en el suelo, y luego limpian toda la superficie impermeable arrastrando los agentes contaminantes que se encuentran en el suelo. Ospina y Ramírez (2014) establecen que: “La calidad de agua de lluvia no se ha estudiado a fondo, se desconocen en varias localidades urbanas sus

condiciones físicas, químicas y microbiológicas, que dependen de diversos componentes presentes en el aire por actividades antrópicas y condiciones naturales”. A pesar de no ser el enfoque principal de este trabajo, es importante destacar que al reconocer los aspectos químicos, físicos y microbiológicos del agua, se puede establecer el nivel de contaminación que este presenta, ya sea para conocer donde depositar dichas aguas o para su posible reutilización.

Con respecto al servicio, Castro et al. (2008) menciona que este problema se ve alterado por los dos aspectos descritos anteriormente, manifestando que el agua se convierte en un perjuicio en la prestación de servicios, es decir, afectación al tráfico, daños materiales, pérdida de comodidad, desnaturalización del entorno, falla de la infraestructura, entre otros. Estos inconvenientes ocasionan incomodidades a los habitantes de una sociedad, por lo que se necesitarán medidas que permitan garantizar el bienestar y la seguridad de los ciudadanos.

2.1.4 Legislación

Cada país posee un conjunto de leyes y normativas por las cuales se rigen, siendo parte del eje principal que impulsa a una nación. Los marcos legislativos de un país hacen que un estado sea capaz de sostenerse y desarrollarse siempre y cuando se cumplan, por tal motivo, es un punto que hace falta mencionar en este trabajo para así entender cómo se relaciona la gestión de aguas con el contexto legal.

En el marco regulatorio venezolano se establecen una serie de leyes y decretos referentes al agua y al ambiente, entre los cuales se encuentran la Ley de Aguas, la Ley Penal del Ambiente, las Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos, entre otras. Se hará énfasis en las siguientes:

- Ley de Aguas 2007. Gaceta Oficial de Venezuela N° 35.595:

Esta ley “tiene por objeto establecer las disposiciones que rigen la gestión integral de las aguas, como elemento indispensable para la vida, el bienestar humano y el desarrollo sustentable del país, y es de carácter estratégico e interés de Estado.” (Ley de Aguas, 2007). Al observar y analizar esta ley se puede percibir que varios de los objetivos principales de los SUDS están explícitos en esta gaceta oficial. Desde el aprovechamiento sustentable del agua, hasta la

conservación de las cuencas hidrográficas y el respeto por el ciclo natural del agua son algunos de los principales puntos que la Ley de Aguas comenta en sus artículos.

Esta ley, en resumen, se centra en el control y manejo de los cuerpos de agua, prevención y control de los posibles efectos negativos de las aguas sobre la población y sus bienes, manejo de aguas y conservación de cuencas, entre otras. Sin embargo, hay que resaltar que no menciona la importancia del control de caudales, tratamiento y reutilización de las aguas pluviales como posibles recursos, es por ello que es necesario la actualización de estas leyes para así poder incorporar los sistemas de drenaje sustentable como alternativa para seguir cumpliendo los objetivos de esta disposición legislativa.

- Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos 1995. Gaceta Oficial de Venezuela N°: 5.021

Según el artículo 1°: “El presente Decreto establece las normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua de los vertidos líquidos.”

A lo largo de este decreto se establece la clasificación del agua según su uso y los criterios de calidad para cada una de estas. Adicionalmente, esta norma determina la clasificación de los vertidos líquidos y como debe ser su manejo y control para no afectar ni deteriorar el medio ambiente.

Es vital comprender la importancia del control de la calidad de los vertidos líquidos debido a que estos pueden comprometer a un cuerpo de agua y a su vez los sistemas de gestión de aguas. En el trabajo se ha mencionarán diferentes maneras de cómo mejorar la calidad del agua, siendo los SUDS una posible solución. Hay que tener en cuenta este decreto a la hora de aplicar estos mecanismos ya que presenta una serie de parámetros y especificaciones que deben ser cumplidas.

2.2 Drenaje Urbano Sustentable

2.2.1 Sustentabilidad y Desarrollo sustentable

“La noción de sustentabilidad tiene su origen en el ideal del desarrollo sustentable” (Gallopín, 2003), entonces al hablar de sustentabilidad es, por lo tanto, hablar de desarrollo

sustentable, sin embargo, esto no implica que los conceptos sean los mismos. Para Gallopín (2003), “el concepto de desarrollo sustentable es muy distinto al de sustentabilidad, en el sentido de que la palabra «desarrollo» apunta claramente a la idea de cambio, de cambio gradual y direccional”. Siendo la sustentabilidad “El proceso de vivir dentro de los límites de disponibilidad de recursos físicos, naturales y sociales en formas que permitan mantener sistemas en los que los humanos están integrados para prosperar a perpetuidad” (Universidad de Alberta, 2013).

En cuanto a la descripción original del concepto de desarrollo sustentable que se realizó en 1987 en el informe “Nuestro Futuro Común”, fue definido por Bruntland como “La humanidad tiene la habilidad para hacer el desarrollo sustentable garantizando que satisfagan las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de futuras generaciones logrando satisfacer sus propias necesidades”. Esta definición consiste en compatibilizar el progreso económico con las necesidades sociales y medioambientales que configuran el bienestar de los ciudadanos.

A través de los años se ha intentado definir estos dos conceptos de una manera precisa, sin embargo, se han generado controversias acerca de estos; observando ambas definiciones se puede entender que son esencialmente muy similares. Hay que tener en cuenta que esta ideología evoluciona con el tiempo, por lo que se ha ido modificando el significado de cada palabra, no obstante, en este trabajo se mantendrán los conceptos descritos anteriormente para así facilitar el entendimiento de este nuevo pensamiento.

Además, es importante señalar que a lo largo de esta investigación se ha acordado que, tanto la palabra sustentable como sostenible, se consideran sinónimos a pesar de que etimológicamente no sea correcto, esto es debido a que también existe una controversia en este tema y una gran cantidad de autores hacen referencia a ambas palabras por igual.

2.2.2 Filosofía y Alcance del Drenaje Urbano Sustentable:

2.2.2.1 De lo Convencional a lo Sustentable:

Teniendo en cuenta los conceptos mencionados anteriormente y la problemática que ha surgido en el ciclo de lluvia producto del efecto de la urbanización y del cambio climático, nació un nuevo enfoque en la gestión del agua de lluvia en las ciudades. Ahora se plantea la necesidad

de la reutilización del agua pluvial como un nuevo método de implementación conocido como los sistemas urbanos de drenaje sustentable (SUDS), en los que se va a considerar el agua como un recurso y no como un problema. Según la Scottish Environmental Protection Agency (2017), los sistemas urbanos de drenaje sustentable son: “Secuencias de prácticas y obras diseñadas para drenar el agua superficial en una forma que provea una aproximación más sustentable que lo que ha sido la práctica convencional de transitar las aguas en una tubería hasta un curso de agua.”

Mientras que los sistemas convencionales buscan evacuar lo más rápidamente posible el agua y dirigirla hacia afuera de la ciudad sin tomar en consideración los problemas que se generan aguas abajo, los SUDS buscan alterar lo menos posible el estado natural de la cuenca, y no solo esto, sino que también permiten la reutilización del agua pluvial, mejorar la calidad de las aguas, obtener una optimización en el servicio a las personas y contribuir a la biodiversidad en la ciudad. Estos sistemas tratan de replicar el ciclo hidrológico natural en la cuenca urbana, tomando en consideración todos los aspectos hidrológicos, hidráulicos, ambientales y sociales. En la Figura N°8, se muestran dos casos que buscan ilustrar el comportamiento hidrológico de la cuenca en una zona urbanizada; utilizando en el primer caso drenaje convencional y en el segundo implementando los SUDS.

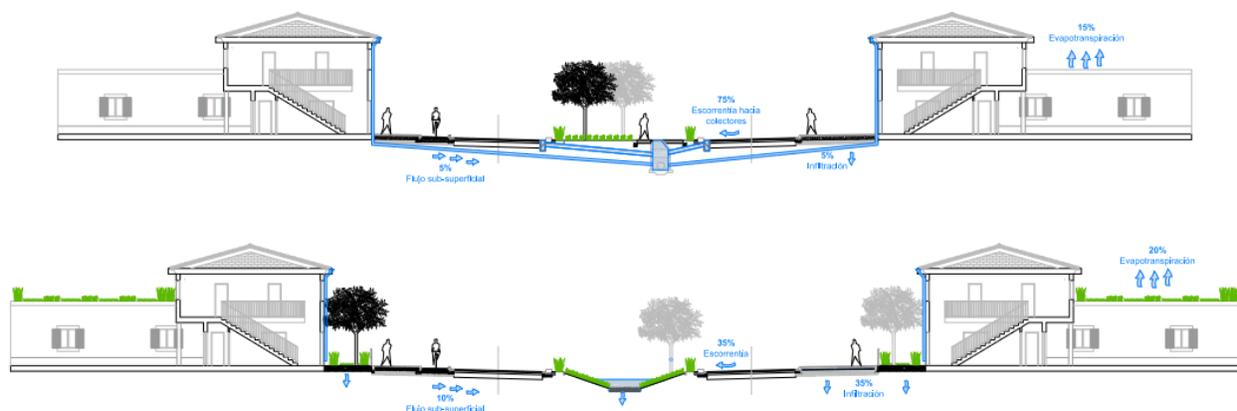


Figura N°8. Funcionamiento Hidrológico de la cuenca, en estado urbanizado convencional con drenaje convencional y en estado urbanizado convencional con planteamiento y drenaje sostenibles Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

Por otra parte, es necesario presentar un cuadro comparativo donde se señalan las diferencias entre los sistemas convencionales y los SUDS, para así tener un conocimiento amplio

y global de los distintos aspectos y parámetros que cada uno presenta los cuales serán explicados a lo largo de este trabajo. En la siguiente figura se observa dicha comparación:

Tabla N°1. Comparación entre el sistema de drenaje convencional y el sistema alternativo SUDS.
Fuente: (SWITCH,2011)

Aspectos de la gestión del Agua Urbana	Sistema Convencional	Sistema Alternativo SUDS
Enfoque general	La integración se da por coincidencia. El suministro de agua, las aguas residuales y las aguas pluviales, pueden ser administrados por la misma agencia como por casualidad histórica, además de que físicamente los tres sistemas están separados.	La integración física e institucional es diseñada. Los vínculos entre el suministro de agua, las aguas residuales y pluviales, así como otras áreas del desarrollo urbano, se realizan mediante una gestión altamente coordinada.
Colaboración con los interesados	Colaboración = Relaciones públicas. Las agencias y el público colaboran únicamente cuando se requiere la aprobación de una solución pre-seleccionada.	Colaboración = Compromiso. Las agencias y el público buscan en conjunto soluciones efectivas.
Elección de infraestructura	La infraestructura es de concreto, metal y plástico.	La infraestructura puede ser verde, incluyendo suelos, vegetación, y otros sistemas naturales.
Gestión de aguas pluviales	Las aguas pluviales son una restricción que se deben transportar fuera de las zonas urbanas lo más rápidamente posible.	Las aguas pluviales son un recurso que puede ser recolectado para el suministro de agua y ser retenidas para apoyar a los acuíferos, canales y biodiversidad.
Gestión de aguas residuales	Las aguas residuales son recolectadas, tratadas y desechadas al medio ambiente.	Las aguas residuales es un recurso que puede ser utilizado para la generación de energía y el reciclaje de nutrientes.
Gestión de la demanda del agua	El aumento en la demanda se puede satisfacer mediante la inversión en nuevas fuentes de suministro e infraestructura nueva.	Las opciones para reducir la demanda, la recolección de agua de lluvia, y la recuperación de aguas residuales, tienen como prioridad el desarrollo de nuevos recursos.
Elección de soluciones tecnológicas	La complejidad se descuida y las soluciones estándar de ingeniería se emplean de manera individual a cada componente del ciclo del agua.	Se exploran diversas soluciones (tecnológicas y ecológicas) y nuevas estrategias de gestión, con la finalidad de fomentar la cooperación entre la gestión, el diseño urbano y la arquitectura del paisaje.

En general todos estos aspectos nos permiten identificar como los sistemas convencionales y los SUDS presentan una conceptualización distinta, debido a que fueron concebidos en distintos momentos y condiciones climáticas diferentes. Para Rodríguez (2017) :

El enfoque tradicional intenta deshacerse del agua de lluvia lo mas rapido posible lejos del lugar de origen, en el mejor de los casos previo tratamiento. El nuevo enfoque trata de retener y atenuar en origen los caudales picos y la contaminación difusa

Demostrando como a través del tiempo ha evolucionado la ideología, hasta llegar al conocido “triángulo de la sostenibilidad” el cual según CIRIA (2007) “representa que todos los objetivos tengan la misma importancia en el diseño de la solución, y que la solución ideal consiga beneficios en las tres categorías”.

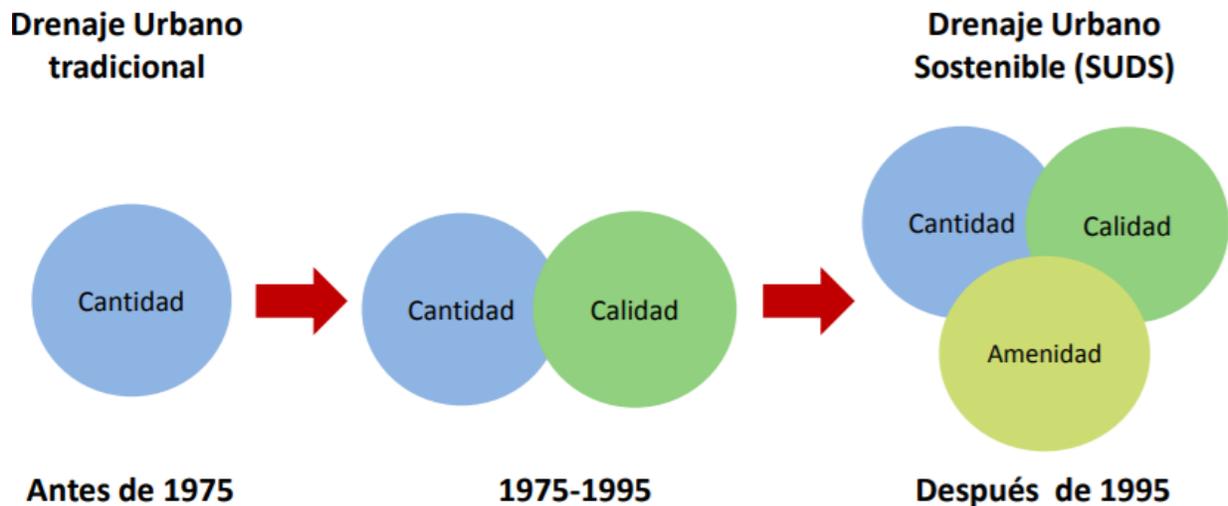


Figura N°9. Evolución cronológica del drenaje urbano tradicional al drenaje urbano sostenible (SUDS) Fuente: Isoscol, 2017

Los SUDS son una alternativa que permite proporcionar la integración paisajística a las ciudades, por lo que es importante destacar que estos sistemas pueden utilizarse en combinación a los sistemas convencionales, siendo capaces de amortiguar el cambio inevitable que la urbe provoca en el ciclo natural del agua. A pesar de esto, los SUDS son de difícil aplicación en urbes ya establecidas, por lo que a la mayoría de los casos se deberían tomar en cuenta para construcciones y desarrollos futuros (Domenech y Perales, 2008).

Además, los SUDS buscan reducir la velocidad y la cantidad de escorrentía superficial que circula por las áreas urbanas desarrolladas para así controlar y manejar de la mejor manera posible los riesgos a inundación y contaminación que estas aguas producen. Esto se puede lograr mediante métodos de infiltración, ralentización, almacenamiento, transporte y tratamiento de las escorrentías en el sitio de deposición, para que así el agua de lluvia sea útil para el entorno. Adicionalmente, este enfoque te da la oportunidad de traerle beneficios a la comunidad, proporcionándole a las

personas mejoramiento en su salud, bienestar y calidad de vida, que a su vez puede aumentar el valor de su propiedad y la prosperidad de la economía de su sector.

Los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) pueden ser encontrados con diferentes terminologías según el país donde se presente, Castro et al. (2008) establece las siguientes formas:

- SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems).
- BMPs (Best Management Practices).
- MPC (Mejores Prácticas de Control).
- BPAs (Buenas Prácticas Ambientales).
- TEDUS (Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible).
- LID (Low Impact Development).
- WSUD (Water Sensitive Urban Design).
- Diseño Urbano Sensible al Agua.

Todos estos sistemas son una alternativa de tratamiento de aguas pluviales, no obstante para los efectos de este trabajo se tomará la denominación de SUDS siendo esta la más común a nivel mundial.

2.2.2.2 Objetivos de los SUDS

Los objetivos de los SUDS se centran en cuatro pilares fundamentales que se deben considerar para lograr los beneficios de su diseño. Estos cuatro pilares son: “Cantidad de agua, calidad del agua, servicio y biodiversidad.” (CIRIA,2015).

Cada uno de estos presentan una principal meta que se describen a continuación:



Figura N°10. Los cuatro pilares del diseño de los SUDS. Fuente: CIRIA, 2015

- **Cantidad de agua:**

Según CIRIA (2015), este primer pilar se centra en poder controlar las tasas y volúmenes de la escorrentía superficial para así mitigar, en lo posible, cualquier problema de inundación y para garantizar la protección del ciclo natural del agua. Para asegurar que las escorrentías superficiales en áreas urbanizadas no presenten impactos perjudiciales a las personas, propiedades y medio ambiente, es necesario controlar lo siguiente:

- La rapidez de descarga de las aguas superficiales desde el sitio de origen, por ejemplo, la tasa de escorrentía máxima.
- La cantidad de agua descargada desde el sitio de origen (ej. volumen de escorrentía).

Si se logra intervenir y manejar lo descrito con anterioridad a través de los SUDS, se puede lograr la protección del ciclo natural del agua y el manejo del exceso de agua a través de: la recarga de los niveles de humedad del suelo y los procesos de evapotranspiración subsecuentemente logrando la disminución de los picos de crecida, la conservación de los flujos bases de los ríos y la reposición de las aguas subterráneas. Adicionalmente, los SUDS también pueden ayudar a reducir los riesgos de erosión en los márgenes de los ríos causado por el aumento de la velocidad del caudal que producen una alta carga de sedimentos y por lo tanto afectan la naturalidad del cauce (CIRIA, 2015).

- **Calidad de agua:**

Este segundo pilar, busca garantizar la calidad del agua del efluente que se ve comprometida por los distintos contaminantes presentes en la atmósfera y en la superficie. Según CIRIA (2015) existe una gran variedad de contaminantes en las zonas urbanas, donde se puede caracterizar el impacto de estos en el agua conociendo los siguientes aspectos:

- Tipos de contaminantes
- Máximo nivel de concentración del contaminante
- Carga total del contaminante

Los contaminantes (sólidos suspendidos, nitrógeno, fosforo, cloruro, hidrocarburos, entre otros) pueden producir reducciones de los niveles naturales de oxígeno en la superficie del agua, condiciones tóxicas, bioacumulación de metales y muerte de animales. En casos extremos, los altos niveles de contaminación en el agua pueden ser peligrosos para la salud de las personas en eventos de exposición, además de poner en peligro los ecosistemas presentes.

Mediante el uso de SUDS se puede reducir los impactos causados por los contaminantes descritos anteriormente, gracias a la aplicación de métodos como la infiltración, filtración, retención, entre otros; sin embargo, hay que tener en cuenta que estos mecanismos no convierten el agua en potable, sino que se pueden utilizar como aguas grises para actividades como riego, recarga de acuíferos, depuración de las piezas sanitarias, entre otras.

- **Amenidad o servicio:**

Este objetivo se enfoca en ambientar el desarrollo urbano de forma tal que promueva, eduque y mejore la salud y el bienestar humano, además de proporcionar un valor estético a las infraestructuras para que sean placenteras, atractivas y de gran utilidad para las comunidades. En este caso, los SUDS buscan crear mejores espacios para los habitantes, donde su productividad aumenta notablemente, así como su calidad de vida. Estos espacios también sirven como ejemplo de formación y aprendizaje ambiental en las personas y como influencia de sentido de comunidad y prosperidad en la zona. Gracias a los SUDS, el valor de la propiedad aumenta exponencialmente debido a todos los beneficios que estos sistemas proporcionan, por lo que también es económicamente viable para el propietario del sitio.

En gran parte todo esto se puede resumir en un concepto conocido como “place-making”, el cual, de acuerdo con la organización Project for Public Spaces (2009) “es una idea que busca mejorar las urbanizaciones, ciudades y regiones diseñándolas para las personas, haciendo los lugares públicos en “lugares vivos” enfocándose en que exista la sociabilidad, sus usos, accesos y confort en estos.”

- **Biodiversidad**

La biodiversidad fue establecida en el Convenio sobre Diversidad Biológica (ONU, 1992) como:

la variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otras cosas, los ecosistemas terrestres y marinos y otros sistemas acuáticos, y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas.

De esta forma se ha reconocido la importancia de como la biodiversidad puede mejorar los ecosistemas y las distintas comunidades a través de los SUDS, que además de proporcionar sitios agradables para las personas, contribuyen al mejoramiento de los hábitats de las especies animales y vegetales conectando así a las personas con la naturaleza. Con una buena implementación, los SUDS pueden albergar diferentes tipos de flora y fauna como parte de un nuevo ecosistema urbano, creando espacios para su vivencia y reproducción, de forma tal que sirvan como refugio y lugar para alimentarse.

2.2.2.3 Criterios de los SUDS

Para poder lograr un diseño adecuado de los SUDS se debe cumplir con cada uno de los pilares u objetivos explicados anteriormente, CIRIA (2015) establece criterios de diseño con sus respectivos indicadores entendiendo que al cumplir con un objetivo indirectamente se estará ayudando a otro objetivo.

Estos criterios de diseño sirven para considerar todos los mecanismos y son los siguientes:

Tabla N°2. *Criterios para garantizar controlar la cantidad de agua. Fuente: CIRIA,2015*

CRITERIO DE CANTIDAD	INDICADORES
Utilizar la escorrentía superficial como un recurso	✓ Una proporción de la escorrentía se almacena para su uso o se infiltra para apoyar los flujos de los ríos y/o recargar las aguas subterráneas
Apoyar la gestión efectiva del riesgo de inundación en la cuenca receptora	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Las descargas a las aguas superficiales son prioritarias sobre las descargas de las alcantarillas ✓ Las cargas y los volúmenes de escorrentía se controlan de acuerdo con los estándares de cantidad de agua
Proteger la morfología y la ecología de las aguas superficiales	✓ Las cargas y los volúmenes de escorrentía se controlan de acuerdo con los estándares de cantidad de agua
Preservar y proteger los sistemas hidrológicos naturales del lugar	✓ Los sistemas naturales de drenaje se conservan o mejoran como parte del paisaje y/o de las aguas superficiales
Drenar eficazmente el lugar	✓ La escorrentía se infiltra o drena a través de SUDS, en un período de tiempo adecuado de modo que no se reduzca el rendimiento del sistema en lluvias posteriores
Gestionar el riesgo de inundación in-situ	✓ La escorrentía que sobrepasa la capacidad de los SUDS se recircula por rutas de excedencia y áreas de almacenamiento identificadas
Diseñar un sistema resiliente capaz de adaptarse a los cambios futuros	✓ El diseño de los SUDS incluye al cambio climático y los futuros crecimientos poblacionales, o está diseñado con la flexibilidad (y el financiamiento) para adaptarse adecuadamente durante su vida de diseño

Tabla N°3. *Criterios para garantizar la calidad de agua. Fuente: CIRIA,2015*

CRITERIO DE CALIDAD	INDICADORES
Apoyar la gestión de la calidad del agua en medios receptores superficiales o subterráneos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El alcance de las actividades de prevención de contaminación. ✓ Medidas apropiadas para el lugar de gestión de riesgos contra inundaciones ✓ La proporción de superficies permeables, techos verdes y/o que vierten a un sistema de recolección de agua de lluvia o de infiltración. ✓ Tratamiento para cumplir con los estándares establecidos ✓ El diseño logre la retención de los sedimentos
Diseñar un sistema resiliente capaz de adaptarse a los cambios futuros	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El diseño del sistema incluye asignaciones para el cambio climático y el crecimiento urbano

Tabla N°4. *Criterios para garantizar un buen servicio Fuente: CIRIA,2015*

CRITERIO DE SERVICIO	INDICADORES
Maximizar la multifuncionalidad	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El número, la variedad y la calidad de usos adicionales y multifuncionales para SUDS, tales como áreas recreativas, aparcamiento o gestión de tráfico
Mejorar el carácter visual	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El sistema de drenaje está diseñado para ser visualmente atractivo, darle un valor visual al patrimonio, el carácter del paisaje e integrarse adecuadamente con sus alrededores
Garantizar sistemas seguros	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Seguridad pública dentro del diseño de cada componente de los SUDS
Diseñar un sistema resiliente capaz de adaptarse a los cambios futuros	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La proporción del sistema de drenaje que contribuirá a la resiliencia climática del desarrollo, como la reducción de las necesidades de calefacción o enfriamiento de los edificios ✓ El diseño del sistema incluye asignaciones para el cambio climático y el crecimiento urbano
Maximizar la legibilidad	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Proporcionar que el sistema sea visible y perceptible por los ciudadanos
Apoyar la educación ambiental	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El alcance de las estrategias de concientización de la comunidad, la participación de los colegios, las estrategias de educación de la comunidad, entre otros.

Tabla N°5. *Criterios para garantizar establecer biodiversidad. Fuente: CIRIA,2015*

CRITERIO DE BIODIVERSIDAD	INDICADORES
Apoyar y proteger el hábitat natural y sus especies	✓ La extensión, calidad e importancia de los hábitats locales apoyados o mejorados por el diseño de SUDS
Contribuir en los objetivos locales de biodiversidad	✓ Los hábitats creados por los SUDS cumplen con los objetivos establecidos en las estrategias locales de biodiversidad
Contribuir a la conectividad del hábitat	✓ Los esquemas SUDS están integrados a estrategias amplias de estructuras verdes y contribuyen a conectar hábitats autóctonos
Crear ecosistemas diversos, autosostenidos y resilientes	✓ La diversidad y la resiliencia de los hábitats establecidos por los SUDS

2.2.2.4 Funciones de los SUDS

Los SUDS son una serie de mecanismos que pueden servir para diferentes problemáticas, por lo que cada uno presenta una serie de funciones, CIRIA (2015) y el Manual de Chile (2013) establecen las siguientes:

-Sistemas de captación de aguas de lluvia: componentes que capturan el agua de lluvia y facilitan su uso en el edificio o ambiente urbano local.

-Sistemas de superficies permeables: superficies estructurales que permiten que el agua penetre, por lo tanto, reducen los volúmenes de escorrentía superficial que convergen en los sistemas de drenaje.

-Sistemas de infiltración: componentes que facilitan la infiltración del agua en el suelo. Estos a menudo incluyen zonas de almacenamiento temporal que amortiguan los volúmenes de escorrentía antes de su descarga apaciguada en la superficie.

-Sistemas de transporte: componentes que transportan el agua a sistemas de almacenamiento aguas abajo. Algunos de estos sistemas también proveen el control y tratamiento de los flujos y volúmenes de las aguas.

-Sistemas de almacenamiento: Componentes que controlan los flujos y volúmenes de escorrentía que son descargados desde el sitio de origen, almacenando el agua y liberándola lentamente (atenuación). Estos sistemas también pueden proporcionar un tratamiento de las escorrentías superficiales.

-Sistemas de tratamiento: Componentes que remueven o facilitan la degradación de los agentes contaminantes presentes en las aguas pluviales.

2.2.2.5 Beneficios de los SUDS

Actualmente, el diseño de drenajes urbanos sustentables genera una numerosa cantidad de beneficios, entre los cuales se pueden dividir de la siguiente manera:

En primer lugar, se encuentran los beneficios hidrológicos e hidráulicos, que según CEDEX (2008) y CIRIA (2015) son los siguientes:

- Protección de las personas y propiedades a riesgos de inundación producto de la urbanización.
- Protección de la calidad de las aguas superficiales, subsuperficiales y subterráneas de las escorrentías contaminadas producto de la urbanización.
- Protección de los cauces naturales (y por lo tanto la morfología y la ecología asociada), por ejemplo: Ríos, lagos, quebradas, entre otros.
- Mejoramiento de la humedad del suelo y reposición de los niveles de agua subterráneas agotadas (Recarga de acuíferos).
- Reducción del valor del caudal pico causados por el desarrollo urbano.
- Mitigación de los problemas de capacidad del alcantarillado aguas abajo.
- Reducción de la carga contaminante mediante procesos físicos, químicos y biológicos.
- Mantenimiento del flujo natural en las corrientes urbanas

En cuanto a los aspectos económicos que remarcan el Victorian Stormwater Committee (1999) y Abellán (2017) se encuentran:

- Ahorro en costos de materiales, de ejecución y de tratamiento de la calidad del agua.
- Representan un valor añadido en la zona donde se aplican.
- Disminuyen las pérdidas económicas por daños provocados por las inundaciones.

- Suponen un mejor aprovechamiento de los recursos.
- Al pasar a ser el agua de lluvia un recurso disponible e incluirse en la gestión de recursos hídricos, disminuye el gasto en la captación y otras obras hidráulicas.
- Suponen un ahorro en costos a la hora de incrementar la capacidad de la red.

Por último, se agrupan los siguientes beneficios ambientales, sociales y urbanos mencionados por Victorian Stormwater Committee (1999), CIRIA (2015) y Abellán (2017):

- Mejoramiento del entendimiento de las personas de cómo se maneja y se usa el agua pluvial, y los beneficios que brinda los alcances sostenibles.
- Creación de lugares atractivos donde las personas quieran vivir, trabajar y jugar a través de la integración del agua y espacios verdes en áreas urbanizadas.
- Proporcionar a la sociedad un valioso suministro de agua.
- Apoyo de los hábitats locales naturales y ecosistemas asociados promulgando una mejor biodiversidad y conexión de hábitats.
- Apoyar la creación de infraestructuras que son más capaces de afrontar los cambios climáticos.
- Reducción del efecto “isla de calor” en las ciudades, contrarrestando el aumento de temperatura.
- Permiten vincular varias zonas de las ciudades mediante espacios públicos abiertos.

2.2.2.6 Inconvenientes de los SUDS

Por ser un sistema relativamente nuevo, existe una serie de inconvenientes producto de la falta de experiencia. A continuación, se presentan el conjunto de desventajas según el Victorian Stormwater Committee (1999):

-Inconvenientes económicos

- Están limitados según el modo de urbanizar.

- Pueden incrementarse los costos de mantenimiento y de operación.

-Inconvenientes ambientales y sociales

- Están limitados por la existencia de un nivel freático próximo a la superficie.
- Sufren problemas de erosión en zonas de fuerte pendiente.
- Son sensibles a la naturaleza del terreno donde se ubican.

Por su parte, Rodríguez Hernández (2008) y Rodríguez Arbelo (2017) establecen la siguiente relación de inconvenientes:

- La inexperiencia en el sector de la construcción en su adecuada ejecución.
- El desconocimiento por parte de los diseñadores que limita su aplicación de partida.
- La desconfianza que genera frente al drenaje convencional.
- La necesidad de un mantenimiento específico.
- La existencia de malas experiencias debidas a los puntos anteriores.
- Falta de manuales para climas cambiantes
- Escasez de modelos prácticos y necesidad de mantenimiento específico
- Necesitan monitorización y análisis a largo plazo

2.2.2.7 Clasificación de los SUDS

Existe una gran diversidad en la literatura acerca de cómo clasificar los SUDS, esto se debe a que varios países aplican esta nueva técnica de diferentes maneras por lo que no se ha llegado a un consenso universal.

Abellán (2017) establece una manera sencilla de clasificarlos en dos subdivisiones:

- Medidas no estructurales
- Medidas estructurales

Las *medidas no estructurales* son aquellas que no requieren ninguna estructura constructiva, es decir, las que no precisan ninguna actuación directa sobre la red, ni la construcción de alguna infraestructura; entre estas se encuentran: La educación, limpieza y mantenimiento, participación ciudadana, entre otros. Las *medidas estructurales* son aquellas que se encargan de gestionar la escorrentía a través de algún elemento constructivo o de criterios urbanísticos tales como: los sistemas de captación, almacenamiento, infiltración, tratamiento, superficies permeables y transporte (Abellán, 2017).

En este trabajo se describirán las siguientes medidas estructurales:

-Sistemas de captación de aguas de lluvia:

- Instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales

-Sistemas de superficies permeables:

- Techos Verdes
- Pavimentos Permeables

-Sistemas de infiltración:

- Zanjas de Infiltración
- Pozos de Infiltración

-Sistemas de transporte:

- Zanjas Filtrantes
- Drenes Filtrantes
- Cunetas verdes

-Sistemas de almacenamiento:

- Sistemas de bioretención
- Estanques de retención
- Humedales

-Sistemas de tratamiento:

- Depósitos de detención

Es importante acotar que un mecanismo al estar en un sistema en particular no implica que no presente funciones de otros sistemas.

2.2.2.8 Mecanismos de los SUDS

Cada una de las medidas estructurales serán presentadas a continuación a través de una descripción general donde se conocerán sus funciones y particularidades. Además, se mencionarán los beneficios y limitaciones que poseen dichas técnicas con miras a conocer sus cualidades y defectos a la hora de su aplicación. Por último, los usos y rendimiento de los mecanismos serán expuestos de forma simple para poder comprender su funcionamiento en las respectivas áreas de empleo; mediante la colocación de una serie de gráficas donde se demuestra mediante el uso de barras, el rendimiento de cada mecanismo haciendo uso de la escala de nulo, bajo, medio y alto según la cantidad de espacios rellenados en color.

- **Instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales**

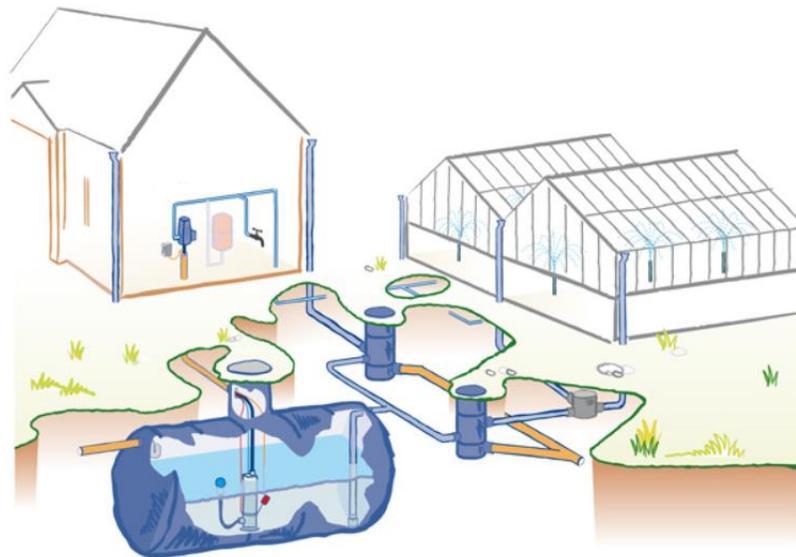


Figura N°11. Ejemplo de instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales. Fuente: Rainwater Harvesting System ,2018

- ✓ Descripción general

Estos sistemas sirven como método de recolección, almacenamiento, tratamiento y reutilización de las aguas de lluvia que se encuentran en tejados y superficies impermeables. El

potencial del reúso del agua va a depender del propósito de esta, el nivel de contaminación que presenta y el tratamiento proporcionado. Según Ballester-Olmos et al. (2013), existen tres tipos diferentes de sistemas de aprovechamiento:

-Sistema directo: el agua se bombea desde el depósito de almacenamiento por medio de una bomba sumergible directamente a la instalación del edificio.

-Sistema por gravedad: el agua se bombea desde el depósito de almacenamiento a un depósito colector por medio de una bomba sumergible. Desde ahí se alimenta la instalación por gravedad.

-Sistema centralizado: la bomba está situada en el edificio. Cuando se necesita agua, se bombea desde el depósito hasta el edificio, desde donde se suministra a los diferentes usos.

✓ Beneficios y limitaciones

Tabla N°6. *Beneficios y limitaciones de las instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013; Abellán, 2017 y Manual de Drenaje Urbano, 2013*

BENEFICIOS	LIMITACIONES
Estos sistemas pueden cumplir las demandas de agua de una edificación, generando beneficios sustentables y resilientes al clima. Por lo tanto, reducen la cantidad de agua potable utilizada para usos donde no es requerida.	Capacidad de almacenamiento limitada.
Reduce los volúmenes de escorrentía y el caudal pico.	Requieren cierta infraestructura de bombeo y elementos hidráulicos.
Adecuados cuando la infiltración no es posible.	Estos sistemas pueden ser complejos y costosos.
Evitan que el agua relativamente limpia acceda al sistema de alcantarillado, mejorando la operatividad de los sistemas de drenaje.	Riesgo para la salud si se bebe directamente el agua.

✓ Usos y rendimiento

Se pueden utilizar en conjunto tanto residenciales, como comerciales e industriales en nuevos proyectos o donde se requiera una retroadaptación. La zona de instalación de los tanques va a depender del tamaño del área a ocupar y de los requerimientos físicos de este, una ventaja es que son capaces de ser instalados de forma individual en cada vivienda permitiendo la reutilización de las aguas pluviales como aguas grises.

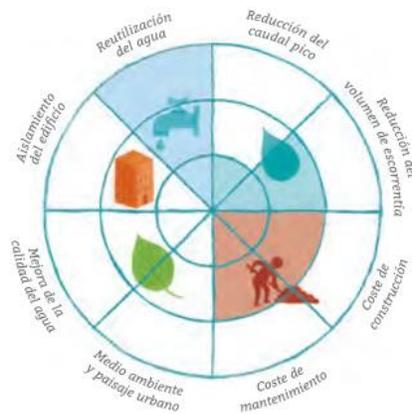


Gráfico N°1. Rendimiento usual de las instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

- **Techos verdes:**



Figura N°12. Ejemplos de techos verdes. Fuente: LA Network, 2018 y Palau, 2017

- ✓ Descripción general

Los techos verdes son estructuras que están parcial o totalmente cubiertas de vegetación. Estas presentan una serie de multicapas compuestas por una capa de suelo con vegetación y una superficie drenante colocadas encima de una lámina impermeable. Como su nombre lo indica, estas estructuras son instaladas en la azotea de los edificios por diferentes motivos, incluyendo beneficios estéticos, valor ecológico, mejoras en el desempeño del edificio y manejo y control de las aguas pluviales (CIRIA, 2015). Los techos verdes se pueden dividir en los siguientes tipos:

-Techos extensivos: Son estructuras de poco espesor, con una capa delgada de vegetación y con baja retención de agua. Requieren de poco mantenimiento y no tienden a ser accesibles.

-Techos intensivos: Son estructuras con capas de mayor grosor, por lo que su peso aumenta y son capaces de retener más agua. Requieren de mantenimiento y tienden a ser accesibles.

En la gestión de aguas pluviales, los techos verdes no solo funcionan como retención, atenuación y tratamiento de las aguas de lluvia, sino que también podrían servir como almacenamiento para su posible reusó (ej. uso no potable del agua en el edificio).

✓ Beneficios y limitaciones

Tabla N°7. *Beneficios y limitaciones de los techos verdes. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013; Abellán, 2017 y Manual de Drenaje Urbano, 2013*

BENEFICIOS	LIMITACIONES
Mejora el desempeño térmico del edificio, por lo que reduce potencialmente el costo de la energía.	Dificultad de implantación en las cubiertas con pendientes mayores a 20°.
Reduce el efecto “isla de calor” producto de la urbanización.	La estructura del edificio puede necesitar de refuerzos estructurales debido al incremento de cargas.
Presenta una alta capacidad de eliminación de los contaminantes atmosféricos urbanos, por lo que mejora la calidad del aire.	
Proporcionan un aislamiento acústico.	En algunos casos es necesario el constante mantenimiento de la vegetación.
Mejoras en términos estéticos y recreacionales.	
Disminuyen el volumen de escorrentía y atenúa los caudales pico.	Riesgo para la salud si se bebe directamente el agua.
Proporcionan un hábitat e incrementa la biodiversidad en la ciudad.	La exigencia de la impermeabilización de los techos es indispensable.
No ocupan espacio ya que están sobre construcciones ya realizadas.	La construcción y el mantenimiento, generalmente, son más costosos que un techo convencional.

✓ Usos y rendimiento

Se pueden utilizar en conjunto tanto residenciales, como comerciales e industriales. Suelen colocarse como espacio recreacional o para mejorar el desempeño de los trabajadores aumentando así el rendimiento de la empresa.

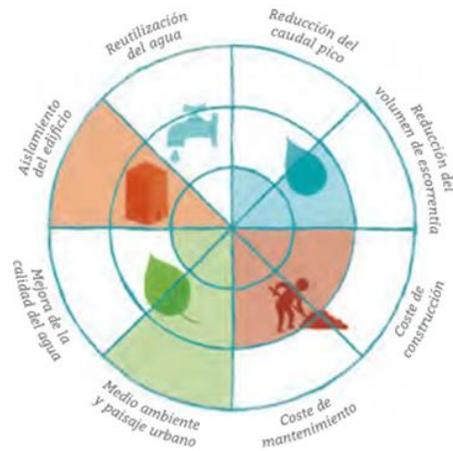


Gráfico N°2. Rendimiento usual de los techos verdes Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

- **Pavimentos permeables**

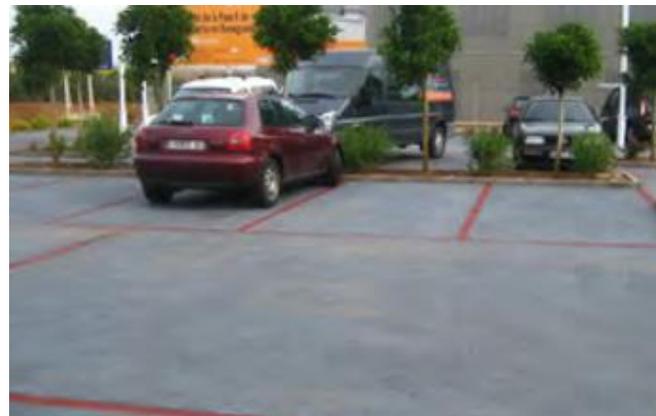


Figura N°13. Ejemplos de pavimentos permeables. Fuente: Ballester-Olmos, 2013

- ✓ Descripción general

Son pavimentos contruidos de la misma forma que los usuales, pero son capaces de permitir el paso del agua de lluvia a través de sus capas (Ochoa, 2016). Existen tres usos que se le pueden dar a un pavimento permeable: el primero permite infiltrar el agua hasta el suelo subyacente. En el segundo uso, una vez que el suelo se haya saturado, el agua de lluvia excedente es capturada por medio de unos conductos perforados que transportan el agua aguas abajo. El último tipo de funcionamiento no permite que el agua se infiltre en el suelo circundante, sino que es retenida por un material impermeable (p. una membrana geotextil) que se encuentra en la parte inferior de la subrasante y luego es transportada por medio de drenes hacia su disposición final (CIRIA, 2015).

De acuerdo con Rodríguez (2017), existen dos tipos de pavimentos permeables definidos por las bases de su material superficial, estos se presentan a continuación:

-Pavimentos continuos: Están compuestos por una capa continua de grava, asfalto o concreto poroso que permita el paso del agua a través de ellos mismos. Estos materiales son granularmente capaces de dejar espacios vacíos por donde el agua se infiltra y sin causarles daños a las capas estructurales del pavimento.

-Pavimentos modulares: Están compuestos por una capa superficial formada por unidades estructurales, como bloques de concreto, ladrillos o geoceldas de poliuretano reforzado, con huecos regulares, usados para crear una superficie pavimentada que soporte carga. Las juntas o espacios libres se rellenan de material permeable como grava o césped para crear un sistema de infiltración.

En general, las capas de estos pavimentos son capaces de atrapar partículas contaminantes en el agua, por lo que este tipo de SUDS es también óptimo para el mejoramiento de la calidad del agua pluvial.

✓ Beneficios y limitaciones

Tabla N°8. *Beneficios y limitaciones de los pavimentos permeables. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013; Abellán, 2017 y Manual de Drenaje Urbano, 2013*

BENEFICIOS	LIMITACIONES
Reducen los caudales pico disminuyendo el riesgo de inundación.	En varios casos, se requiere mantenimiento debido a obstrucciones en el material permeable producto del arrastre de sedimentos.
Reducen los efectos de contaminación en el agua de escorrentía superficial.	Falta de experiencia en la construcción.
Eliminan el hidroplaneo, por lo que mejora los niveles de servicio y la seguridad en la vía.	Los costos en algunos casos son elevados por el tipo de proyecto que se desea realizar y el material que se requiera utilizar.
Son utilizados en cualquier tipo de vía de comunicación, ya sea una avenida o una autopista, teniendo en cuenta el tipo de material a utilizar y su adecuada construcción.	Requiere especial atención en zonas donde ocurran acciones de girado y frenado que puedan causar hundimiento en la superficie, separación en los bloques de concreto, agrietamiento del asfalto permeable, entre otros.

✓ Usos y rendimiento

Dependiendo del tipo de pavimento y el material utilizado, se pueden encontrar diferentes lugares donde implementarlos. Por ejemplo, los bloques de concreto son usados generalmente en áreas de peatones, en vías de poco tráfico (vías privadas), estacionamientos, puertos, entre otros. El asfalto permeable se puede utilizar en escuelas, estacionamientos, sitios recreacionales, etc.

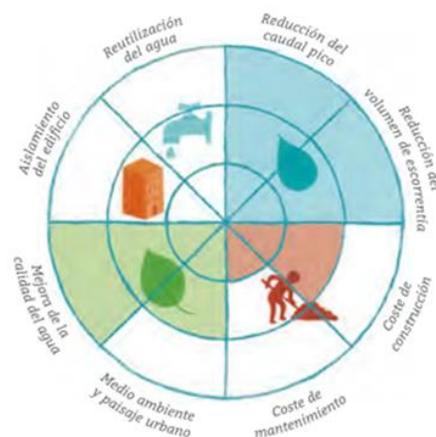


Gráfico N° 3. Rendimiento usual de los pavimentos permeables Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

• Zanjas de infiltración



Figura N°14. Ejemplos de zanjas de infiltración. Fuente: Ballester-Olmos,2013 y Susdrain, 2018

✓ Descripción general

Según Ballester-Olmos (2015), una zanja de infiltración es una “zanja poco profunda en el suelo permeable que se rellena de material drenante y se reviste de geotextil”. Se utilizan

principalmente para disminuir los volúmenes de escorrentía presentes cerca de un área residencial o comercial, pero también sirve como recarga de la capa freática siempre y cuando esta se encuentre por debajo de las zanjas. El agua superficial es captada y almacenada efímeramente en los espacios vacíos del material granular y luego se infiltra en el suelo.

✓ Beneficios y limitaciones

Tabla N°9. Beneficios y limitaciones de las zanjas de infiltración. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013; Abellán, 2017 y Manual de Drenaje Urbano, 2013

BENEFICIOS	LIMITACIONES
Eliminan una serie de agentes contaminantes presentes en el agua.	Se pueden obstruir fácilmente.
Atenúan el volumen de escorrentía y el caudal pico.	Exige un constante mantenimiento debido a que las obstrucciones y contaminantes son difíciles de ver.
Permiten la recarga de los acuíferos, siempre y cuando el suelo sea suficientemente permeable.	Limitadas a cuencas pequeñas.
Se integran fácilmente en el paisaje urbano.	No aptas para suelos impermeables.

✓ Usos y rendimiento

Son construidas en zonas adyacentes a caminos, estacionamientos, en zonas residenciales, comerciales e industriales, en jardines de parques recreacionales, entre otros. Las zanjas no deben ir cerca de estructuras subterráneas de edificios.

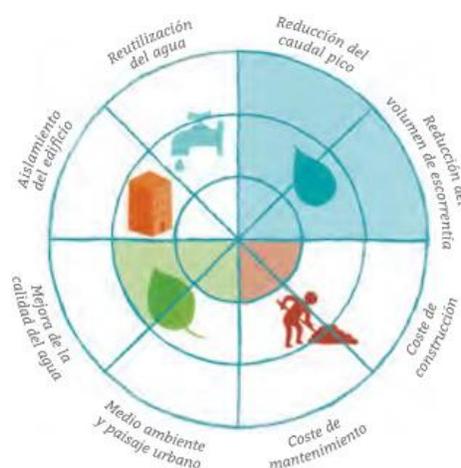


Gráfico N°4. Rendimiento usual de las zanjas de infiltración. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

- **Pozos de infiltración**



Figura N°15. Ejemplos de pozos de infiltración. Fuente: Ballester-Olmos, 2013 y Novaplas, 2018

- ✓ **Descripción general**

Los pozos son sistemas subterráneos de almacenamiento temporal de agua de lluvia que son excavados y rellenos con materiales permeables que permiten que el agua que cae dentro de ellos se infiltre en el suelo. Según Ochoa (2016) “su profundidad depende de la cantidad de agua que se desea captar, de la hidrología de la zona y de la rata de infiltración del suelo existente.” Generalmente, estos pozos tienen una profundidad entre 1 y 3 metros y es recomendable colocarle un filtro para evitar algún tipo de contaminación en el suelo circundante. Estos pozos cumplen la misma función que las zanjas de infiltración, no obstante, requieren de mayor espacio longitudinal ya que los pozos se perforan verticalmente.

- ✓ **Beneficios y limitaciones**

Tabla N°10. Beneficios y limitaciones de los pozos de infiltración. Fuente: Ballester-Olmos et al.,2013; Abellán, 2017 y Manual de Drenaje Urbano, 2013

BENEFICIOS	LIMITACIONES
Reducen el volumen de escorrentía y atenúa el caudal pico.	No aptos para suelos impermeables. Se requiere de inspecciones para posible mantenimiento debido a obstrucciones por sedimentos o algún otro elemento como hojas.
Contribuyen a la recarga de acuíferos.	
Son capaces de “regar” las raíces de las plantas subsuperficialmente, disminuyendo la irrigación anual con agua potable y el bombeo desde fuentes lejanas.	
Es de fácil construcción y no se requiere de grandes espacios para su aplicación.	

✓ Usos y rendimiento

Son ideales para zonas con jardines como parques donde su excavación no afecte el paso de peatones o de vehículos como en ciudades altamente densificadas.

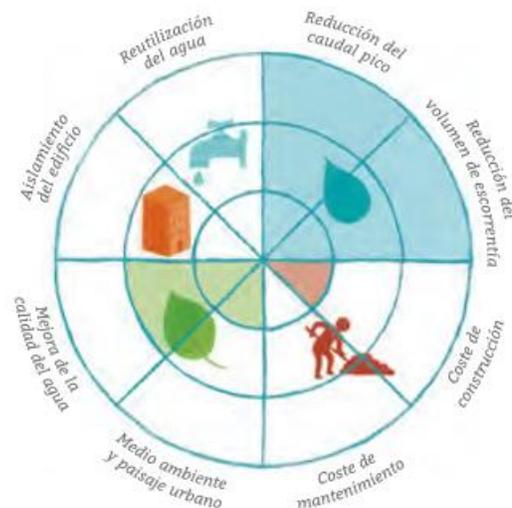


Gráfico N°5. Rendimiento usual de los pozos de infiltración. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

• Franjas Filtrantes:



Figura N°16. Ejemplos de franjas filtrantes. Fuente: Ballester-Olmos, 2013 y Susdrain, 2018

✓ Descripción general

Las franjas o zanjas filtrantes, son franjas de suelos cubiertas de vegetación usualmente uniforme diseñadas para tratar la escorrentía de las superficies impermeables adyacentes o zonas intensamente ajardinadas. Suelen emplearse en paralelo a la superficie impermeable y presentan poca pendiente para así escurrir el agua en forma de flujo superficial como lámina continua, desde un extremo del plano hacia el extremo más bajo. Esta técnica favorece la sedimentación de las partículas y contaminantes arrastrados por el agua gracias a las bajas velocidades que presenta adicionalmente permite la infiltración de la escorrentía en el subsuelo (Abellán, 2017).

✓ Beneficios y limitaciones

Tabla N°11. *Beneficios y limitaciones de las franjas filtrantes. Fuente: Ballester-Olmos et al.,2013; Abellán, 2017 y Manual de Drenaje Urbano, 2013*

BENEFICIOS	LIMITACIONES
Adecuadas para tratar la escorrentía de grandes superficies impermeables adyacentes.	Necesitan bastante espacio para su construcción.
Además de la filtración, disminuye la escorrentía y facilita la evaporación del agua.	No apropiadas en lugares industriales o muy contaminados.
Mejoran la calidad del agua.	En lugares muy inclinados no resultan apropiadas.
Eliminación parcial de los sedimentos y contaminantes.	En épocas secas pueden necesitar riego.
Sirven de tratamiento previo a la entrada del agua en otros SUDS.	Los contaminantes pueden acumularse en la vegetación.
Atenúan los caudales pico y pueden permitir la recarga de acuíferos.	
Se integran fácilmente en el paisaje y pueden tener un gran valor estético.	No son convenientes en lugares donde el agua entrante tenga una alta carga de contaminación y haya un acuífero cercano.
Fácil de construir, se adaptan muy bien para ser construidos junto a carreteras y con costos reducidos de mantenimiento.	

✓ Usos y rendimiento

Son ideales para recoger agua de los estacionamientos y gestionar la escorrentía de las zonas residenciales, comerciales e industriales.

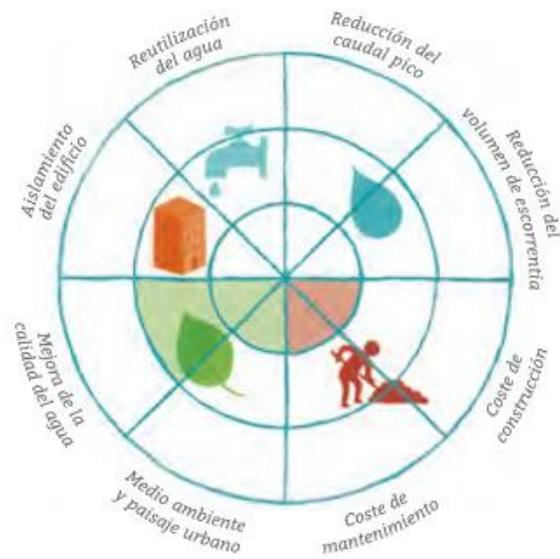


Gráfico N°6. Rendimiento usual de las franjas filtrantes. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

- **Drenes Filtrantes:**



Figura N°17. Ejemplo de dren filtrante. Fuente: Abellán, 2017

- ✓ Descripción general

Los drenes filtrantes, son zanjas poco profundas rellenas de material filtrante como pueden ser las gravas y recubiertas de geotextil. Están diseñados para captar y filtrar la escorrentía de superficies impermeables contiguas, permiten la infiltración y favorecen la laminación de la

escorrentía. Suelen tener un conducto inferior perforado para el transporte de agua (dren francés), el cual no es necesario a lo largo de toda la zanja, sino sólo cerca del final de la instalación. (CIRIA,2015)

✓ Beneficios y limitaciones

Tabla N°12. Beneficios y limitaciones de los drenes filtrantes. Fuente: Ballester-Olmos et al. ,2013; Abellán, 2017 y Manual de Drenaje Urbano, 2013

BENEFICIOS	LIMITACIONES
Mejoran la calidad del agua eliminando nutrientes, sedimentos, materia orgánica y metales.	Se han colocado junto a autopistas, pero tienen una alta tasa de fallo debido a un mal mantenimiento.
Se integran fácilmente en el paisaje y se adaptan en muchas condiciones.	Es difícil detectar la contaminación y colmatación de los materiales granulares.
Reducen de forma significativa el caudal pico de la escorrentía.	Limitado a áreas de drenaje relativamente pequeñas y suelos adecuados para la infiltración.
Reducen la carga de contaminantes.	Los costos de construcción generalmente son elevados a pesar de tener un mantenimiento económico.

✓ Usos y rendimiento

Son muy versátiles, permitiendo que se implementen en las zonas residenciales, comerciales e industriales además de mejorar la estética de las áreas urbanas.

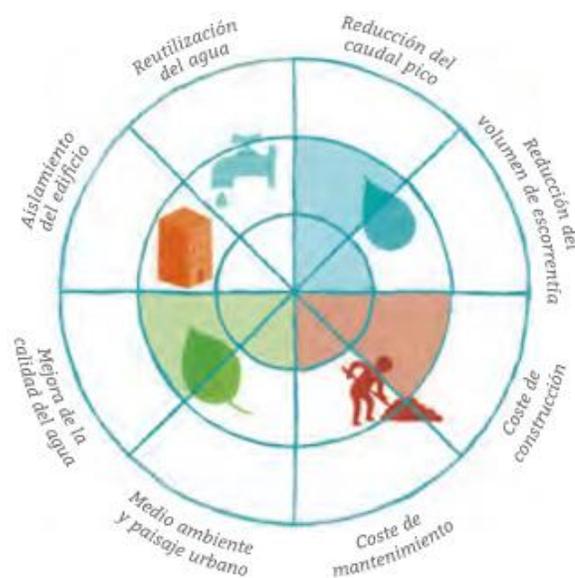


Gráfico N°7. Rendimiento usual de los drenes filtrantes. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

- **Cunetas Verdes:**



Figura N°18. Ejemplo de cuneta verde. Fuente: (Scottish Water Agency,2017)

- ✓ Descripción general

También conocidas como swales, las cunetas verdes son canales anchos, poco profundos y de taludes con poca pendiente diseñados para canalizar, atenuar o infiltrar la escorrentía. La vegetación es colocada a lo largo y en el fondo del canal logrando reducir el caudal de la escorrentía, mejorar la calidad del agua y reducir la velocidad de la escorrentía gracias a la infiltración, al incremento de la longitud de los recorridos del agua y la rugosidad que este presenta. Las cunetas verdes son diseñadas con taludes de poca pendiente para obligar a que la velocidad del agua sea lenta (1-2 m/s) y las partículas puedan sedimentar, limitando así los efectos de la erosión (Ballester-Olmos et al. ,2013). Según Abellán (2017) se pueden tener las siguientes:

-Las tradicionales: Son canales recubiertos de vegetación superficial que se usan para transportar y tratar el agua de escorrentía.

Las cunetas secas: Mediante el uso de un filtro (underdrain) formado por un material muy permeable, permite que todo el volumen de agua tratada se infiltre a través del fondo del canal gracias a la capacidad extra que este presenta debajo de la base de la cuneta. Se llaman así porque la mayor parte del tiempo no contienen agua.

-Las cunetas húmedas: Diseñados para encontrarse húmedos todo el tiempo, reteniendo el agua de forma permanente, para ello, se realizan en lugares que poseen un nivel freático elevado o en un suelo impermeable.

✓ Beneficios y limitaciones

Tabla N°13. *Beneficios y limitaciones de las cunetas verdes. Fuente: Ballester-Olmos et al.,2013; Abellán, 2017 y Manual de Drenaje Urbano, 2013*

BENEFICIOS	LIMITACIONES
Reducción del volumen de escorrentía y disminución del caudal pico.	Existe riesgo de bloqueo en la conexión con el colector de salida.
Mejora de la calidad del agua mediante la retención de partículas en suspensión y contaminantes.	No pueden implementarse en zonas muy llanas o en suelos fácilmente erosionables.
Mejora de la biodiversidad en el entorno urbano.	No son muy eficaces en la eliminación de contaminantes disueltos y bacterias.
Bajos costos de instalación y de fácil mantenimiento.	
Mejora la calidad del aire y el entorno visual.	Limitan las oportunidades de plantación de árboles con fines paisajísticos.
La acumulación de elementos que dificulten su funcionamiento es fácil de detectar y eliminar.	

✓ Usos y rendimiento

Se utilizan comúnmente para absorber la escorrentía de las carreteras y autopistas por su naturaleza lineal además se pueden colocar en los estacionamientos, zonas residenciales, comerciales e industriales para gestionar la escorrentía.

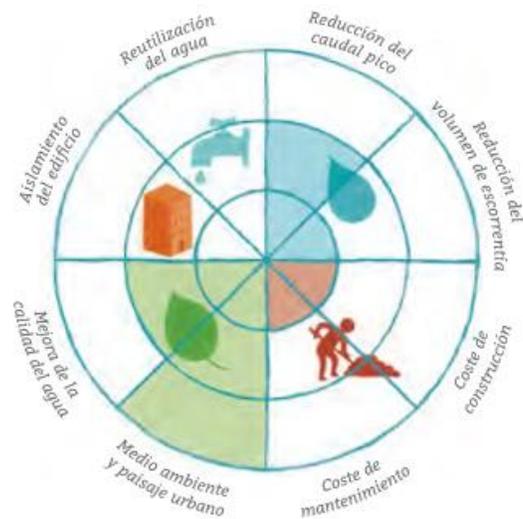


Gráfico N°8. Rendimiento usual de las cunetas verdes. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

- **Sistemas de bioretención:**



Figura N°19. Ejemplo de área de bioretención. Fuente: (Villalonga,2017 y Abellán,2017)

- ✓ Descripción general

Los sistemas o áreas de bioretención según Ballester Olmos et al. (2013) son:

Las áreas de bioretención son depresiones poco profundas cubiertas de vegetación y que dependen de ésta y de los suelos originales o agregados para capturar, infiltrar,

transpirar y eliminar los contaminantes de la escorrentía, reduciendo así el volumen de agua de lluvia, atenuando el caudal pico y mejorando la calidad las escorrentías

La vegetación utilizada es autóctona, adaptada a las condiciones climáticas del lugar y a la humedad presente del suelo del lugar; para así diseñarlas de manera que puedan aguantar inundaciones periódicas.

Existe un sistema de bioretención de menor envergadura que son los jardines de lluvia o también conocidos como “water tree pits”, capaces de reducir y retardar volúmenes de escorrentía, los cuales son una buena alternativa para espacios reducidos y presupuestos más ajustados. Estos son de fácil construcción y se recomiendan especialmente para mejorar los sistemas de drenaje en las viviendas (Manual de Drenaje Urbano, 2013).

✓ Beneficios y limitaciones

Tabla N°14. *Beneficios y limitaciones de las áreas de bioretención. Fuente: Ballester-Olmos et al.,2013; Abellán, 2017 y Manual de Drenaje Urbano, 2013*

BENEFICIOS	LIMITACIONES
Fácil instalación, diseño flexible y no muy costosa.	No son apropiadas en zonas con pendientes superiores al 15%.
Aptos para un amplio rango de lugares y tamaños.	Las altas cargas de sedimentos pueden causar problemas; se puede necesitar algún tipo de pretratamiento.
Pueden reducir el volumen de escorrentía si es posible la infiltración, atenuando los caudales pico y facilitando la evapotranspiración.	Flujos concentrados pueden necesitar una consideración especial en el diseño.
Mejoran la calidad del agua y el aire.	Requieren mantenimiento constante para conservar las cualidades estéticas.
Incrementan las superficies permeables en áreas muy urbanizadas.	Deben presentar plantas autóctonas capaces de soportar inundaciones y sequías.
Proporcionan un hábitat e incrementan la biodiversidad en la ciudad, siendo estéticamente atractivas.	
Facilitan la recarga de acuíferos (si permiten la infiltración).	La infiltración solo se puede realizar en suelos adecuados.
Eliminación parcial de los sedimentos y contaminantes.	

✓ Usos y rendimiento

Pueden encontrarse en zonas residenciales o comerciales para gestionar la escorrentía, igualmente al ser superficies ajardinadas en depresión se pueden utilizar como islas en los estacionamientos, medianas carreteras o sencillamente como parte de la estética en las calles

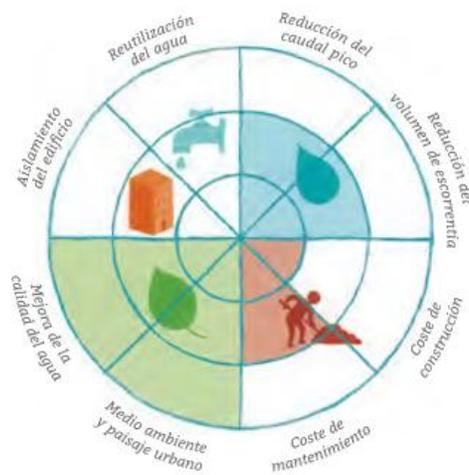


Gráfico N°9. Rendimiento usual de las áreas de bioretención. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

• Estanques de retención:



Figura N°20. Ejemplo de un estanque de retención. Fuente: Abellán,2017

✓ Descripción general

Los estanques de retención también conocidos como lagunas o cuencas de retención, son lagunas artificiales de aproximadamente 1,2m a 2m de profundidad que poseen una lámina permanente de agua a lo largo de toda la temporada húmeda, dicha lámina se puede mantener

potencialmente durante todo el año permitiendo que exista la proliferación de la flora y de la fauna. Al tener agua de forma permanente este volumen oculta bancos de sedimentos antiestéticos siendo estos el principal mecanismo de eliminación de nutrientes y contaminantes (Abellán, 2017). Los estanques de retención se pueden dividir, de acuerdo con Rodríguez (2017) en los siguientes tipos:

-Estanque de retención extendido: Es aquel en donde el volumen de agua permanente es mayor del 50% del volumen de agua a tratar.

-Microestanque de retención: Son aquellos donde el volumen de agua a tratar es inferior a una quinta parte del volumen de agua total.

-Sistemas de estanques múltiples: Son sistemas que incrementan los tiempos de retención del agua logrando una descontaminación más efectiva, aunque se necesita un mayor espacio obteniendo que los volúmenes a tratar de estos sistemas son iguales al volumen total.

✓ Beneficios y limitaciones

Tabla N°15. *Beneficios y limitaciones de los estanques de retención. Fuente: Ballester-Olmos et al.,2013; Abellán, 2017 y Manual de Drenaje Urbano, 2013*

BENEFICIOS	LIMITACIONES
Tratamiento efectivo de las escorrentías.	En zonas densamente pobladas existe limitación de espacio, por lo que requieren un área relativamente grande.
Reducción del caudal pico.	No se reduce considerablemente el volumen de escorrentía.
Incrementan la biodiversidad del entorno urbano.	La profundidad del depósito puede quedar limitada por las cotas de los dispositivos de entrada y salida.
Adecuados para drenar grandes áreas.	Más adecuados para áreas de más de 2 ha y con pendiente longitudinal menor al 15%.
Tiene capacidad de gestión para tormentas con período de retorno alto y de diferentes magnitudes.	Sin una entrada de agua regular, se pueden dar condiciones de anaerobiosis.
Eliminación de buena capacidad de contaminantes urbanos.	No es recomendable su construcción en zonas escarpadas.
Alto potencial ecológico y estético proporcionando un espacio recreacional y/o deportivo.	Colonizaciones por especies invasoras podrían aumentar las necesidades de mantenimiento.
Pueden agregar valor a las propiedades locales, atraer negocios y turismo.	Evitar zonas próximas a acuíferos.

✓ Usos y rendimiento

Suelen ser ideales en zonas donde se tenga superficie disponible, por lo que generalmente se encuentran en zonas residenciales con densidades no tan altas. También están presentes en nuevos urbanismos para usos sociales y darle un valor paisajístico.

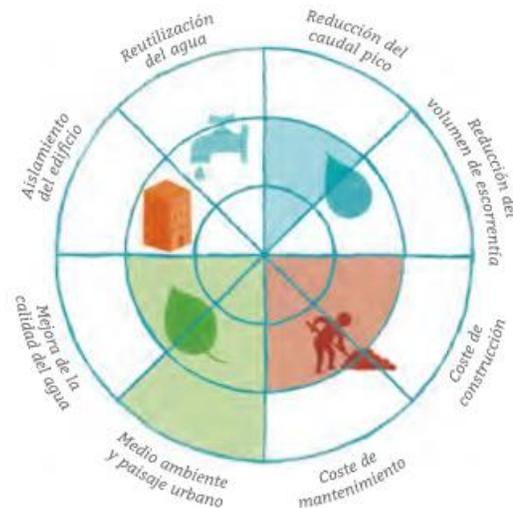


Gráfico N°10. Rendimiento usual de los estanques de retención. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

• Humedales artificiales



Figura N°21. Ejemplo de un humedal artificial. Fuente: Abellán, 2017

✓ Descripción general

Son depresiones de baja profundidad que almacenan temporalmente el agua superficial arriba de una piscina pantanosa que se encuentra permanentemente con un volumen agua. Los

humedales permiten el asentamiento de los sólidos suspendidos y el tratamiento biológico de contaminantes mediante el crecimiento de plantas de raíces cortas dentro de la depresión (CIRIA, 2015). Además de mejorar la calidad del agua, también son de utilidad en la atenuación y control de los volúmenes de escorrentía. Según EPA (2000), los humedales se pueden dividir de la siguiente manera:

-Humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS): son aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. La mayoría de los humedales FLS son praderas inundadas, pero se tienen también algunos ejemplos de fangales y zonas pantanosas. En este tipo de humedal, el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde el punto de entrada hasta el punto de salida, donde en el recorrido ocurre el bio-tratamiento y la sedimentación de los sólidos.

-Humedales de flujo subsuperficial (FS): Está diseñada específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado (se utiliza grava generalmente y vegetación emergente presentes en las praderas inundadas). En este caso el flujo de agua no se encuentra expuesta a la atmósfera.

✓ Beneficios y limitaciones

Tabla N°16. *Beneficios y limitaciones de los humedales artificiales. Fuente: Ballester-Olmos et al. ,2013; Abellán, 2017 y Manual de Drenaje Urbano, 2013*

BENEFICIOS	LIMITACIONES
Proporcionan una buena calidad del agua debido a su efectivo tratamiento de las aguas superficiales.	En algunos casos requieren de una gran ocupación de espacio.
De fácil mantenimiento.	Pueden aparecer problemas de eutrofización.
Presenta características paisajísticas y ecológicas, por lo tanto proporciona un mejoramiento en la biodiversidad.	No son convenientes en zonas con pendientes.
Adecuados para suelos con baja capacidad de infiltración	La presencia de especies invasivas puede aumentar los costos de mantenimiento.

✓ Usos y rendimiento

Los humedales artificiales pueden ser utilizados en zonas residenciales o no residenciales, aunque son más adecuados para nuevas urbanizaciones o cuando se va a reconstruir un desarrollo urbanístico. Pueden ser de difícil instalación en zonas con pendientes abruptas y no deben ser construidos en suelos inestables y permeables.

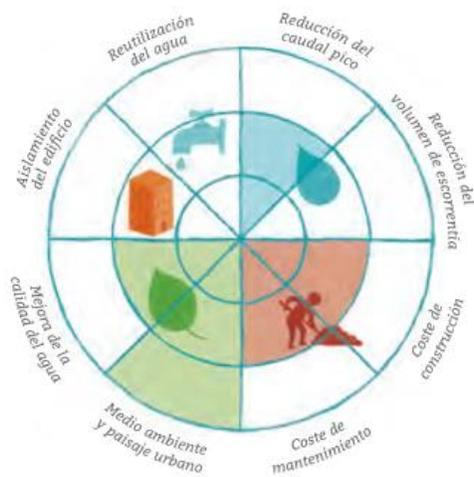


Gráfico N°11. Rendimiento usual de los humedales artificiales. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

- **Depósitos de Detención:**



Figura N°22. Ejemplo de un depósito de retención. Fuente: CIRIA, 2015

- ✓ Descripción general

Son instalaciones superficiales o subterráneas generalmente secas que están destinadas para almacenar los volúmenes de escorrentía temporalmente, reduciendo el caudal y el impacto aguas abajo y proporcionando protección frente a inundaciones. Estos favorecen la sedimentación de contaminantes eliminándolos así de la masa de agua, adicionalmente al estar diseñados con

vegetación puede proliferar la fauna y mejorar la calidad del agua. Generalmente están diseñadas para que se llenen y vacíen en 48 horas tras el evento de lluvia. Los depósitos de detención para Ballester-Olmos et al. (2013) pueden ser:

- **“On-line”**: recibe la escorrentía generada en superficies adyacentes durante eventos de tormenta. La salida de agua está limitada, con lo que esta zona se acaba llenando de agua, laminando así la escorrentía.

- **“Off-line”**: generalmente recibe la escorrentía por medio de un desvío, de modo que el exceso de caudal por encima de un umbral determinado se desvía del flujo principal hacia la zona de detención, donde se almacena temporalmente. El agua de la zona de detención se devuelve al sistema principal una vez que el caudal disminuye. Normalmente este tipo de depósito suele ser una alternativa de un espacio recreacional o como parte natural de una zona urbana.

✓ Beneficios y limitaciones

Tabla N°17. *Beneficios y limitaciones de los depósitos de detención. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013; Abellán, 2017 y Manual de Drenaje Urbano, 2013*

BENEFICIOS	LIMITACIONES
Pueden suponer una nueva fuente del agua como recurso (para limpieza, riego, etc.), reduciendo su demanda de la red de abastecimiento.	No hay tratamiento de los contaminantes solubles.
Reducción del pico del hidrograma	No se reduce considerablemente el volumen de escorrentía.
Disminución del riesgo de inundación.	La profundidad del depósito puede quedar limitada por las cotas de los dispositivos de entrada y salida.
Capaces de adaptarse bien a episodios de precipitación de diferentes magnitudes.	Más adecuados para áreas de más de 2 ha.
Cierta mejora de la calidad del agua a través de sedimentación de partículas.	Se debe instalar un sistema de tratamiento (aumento de costos).
Bajos costos tanto de construcción como de mantenimiento.	Pueden requerir de un sistema de bombeo.

✓ Usos y rendimiento

Suelen concebirse en depresiones del terreno donde se podría retener agua; también son una alternativa en lugares donde la infiltración no es buena opción y adicionalmente se pueden encontrar en zonas residenciales como uso paisajístico o espacio recreativo.

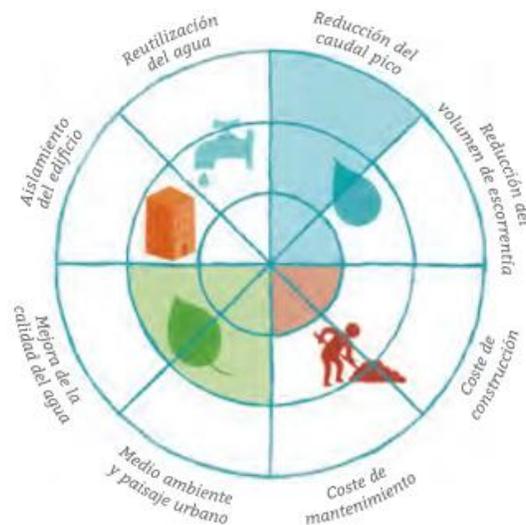


Gráfico N°12. Rendimiento usual de los depósitos de retención. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

Para que se cumplan todos los objetivos y metas asociadas a los SUDS es necesario tener en cuenta los siguientes lineamientos:

- Utilizar la escorrentía superficial como un recurso.
- Manejar el agua de lluvia cerca del sitio donde cae (en la fuente).
- Permitir que el agua se infiltre en el suelo.
- Promover la evapotranspiración.
- Disminuir y almacenar las escorrentías de lluvia para imitar las tasas y volúmenes de las escorrentías naturales.
- Reducir la contaminación de las aguas superficiales a través de la prevención y control de la escorrentía en la fuente.
- Tratar las aguas superficiales para reducir el riesgo de agentes urbanos contaminantes que causan la contaminación ambiental.

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

Este trabajo se puede considerar de investigación documental, el cual, Alfonso (1995) lo establece como: “Un procedimiento científico, un proceso sistemático de indagación, recolección, organización, análisis e interpretación de información o datos en torno a un determinado tema. Al igual que otros tipos de investigación, éste es conducente a la construcción de conocimientos.” Consta de dos aspectos fundamentales, el primero es la recopilación de toda la información necesaria destacando los drenajes urbanos sustentables. La búsqueda se centrará en las organizaciones, en las universidades, empresas públicas y privadas, entre otros organismos del mundo.

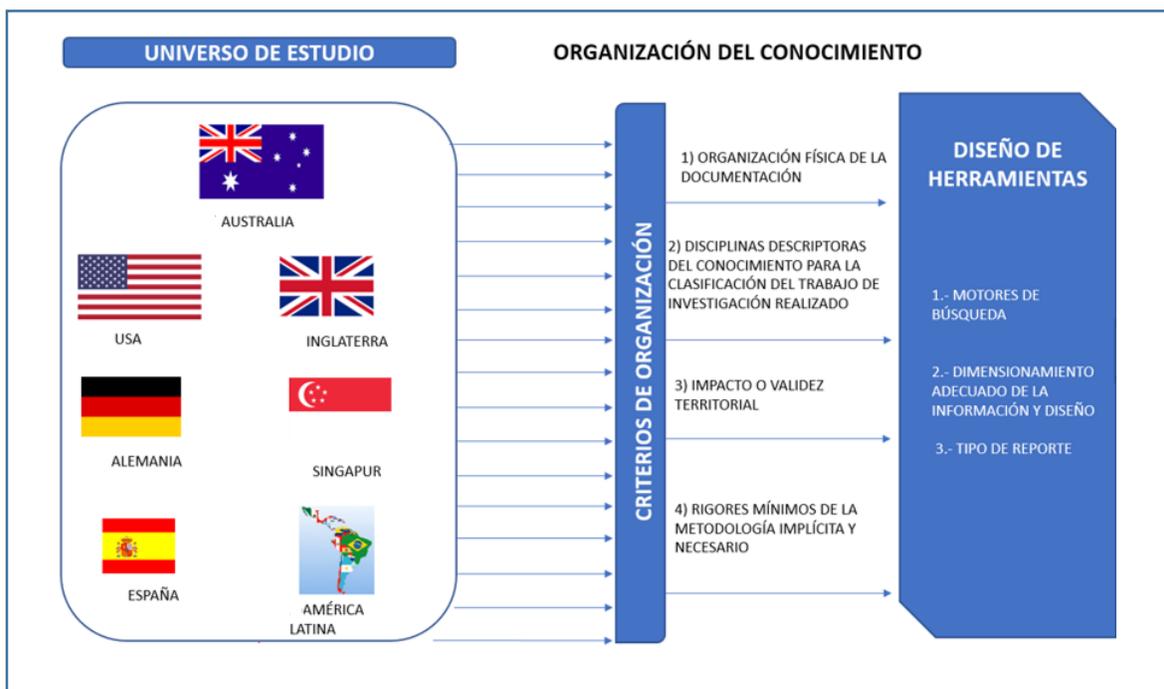


Figura N°23. Diagrama organizacional asociado a la recopilación de información básica y relevante de drenaje sustentable. Fuente: Elaboración propia a partir de consultores UCAB,2018

El segundo es la comparación de los mecanismos y aplicaciones de los sistemas de drenaje urbano del mundo que fueron establecidos después de la investigación. Luego de dicha comparación se identificarán los posibles sistemas de drenaje urbano sustentable que se podrían aplicar a las distintas zonas de Venezuela.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo con la metodología aplicada en este trabajo:

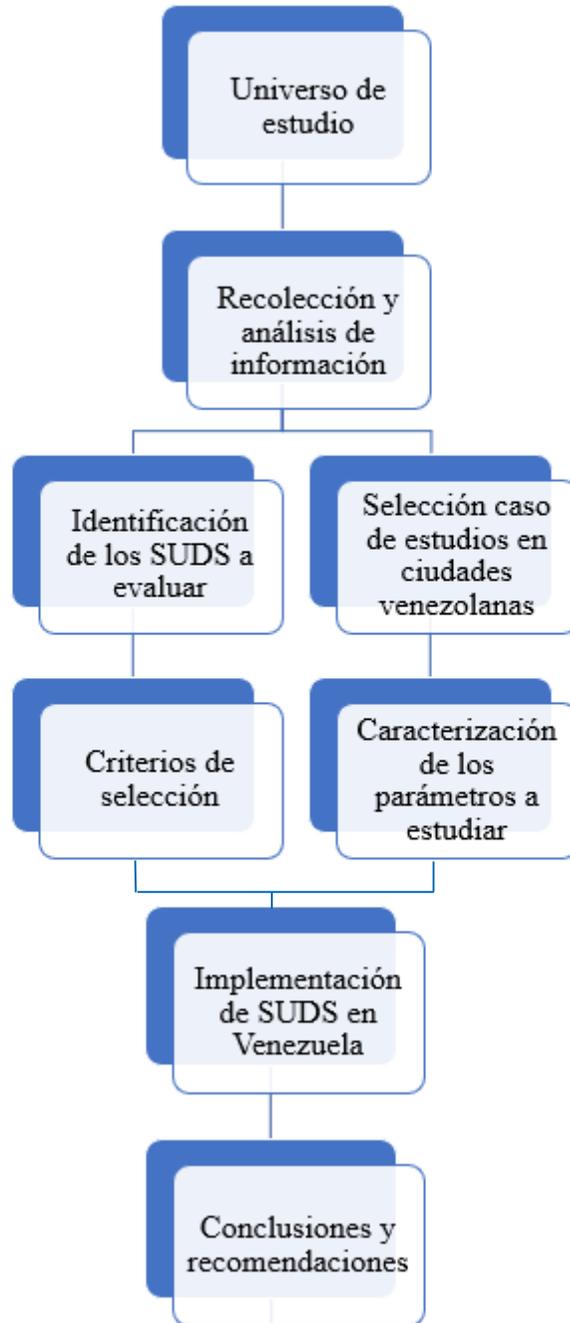


Figura N°24. Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: DESARROLLO

4.1. Metodología de selección e implementación de SUDS

4.1.1. Selección del sitio

El análisis de la selección del lugar adecuado para el uso de estos sistemas corresponde a dos enfoques fundamentales, los cuales van a permitir una apropiada colocación aumentando los beneficios de los SUDS. El primer enfoque se concentra en la caracterización de los aspectos vinculados al manejo y control de las escorrentías; en cambio en el segundo se consideran los factores relacionados al espacio, es decir, paisajes, hábitats, generación de biodiversidad y desarrollo del territorio (Jiménez, 2017).

Según CIRIA (2015), los aspectos vinculados al manejo y control de la escorrentía son:

- **Topografía:** Es un criterio que permite determinar fácilmente las vías de drenajes naturales existentes definiendo el posible paso de la escorrentía superficial a través de las curvas de nivel. Adicionalmente es de gran ayuda para identificar los puntos de estancamiento o los puntos bajos donde el agua naturalmente se acumula, siendo posibles áreas de almacenamiento.
- **Rutas de flujo y puntos de la descarga existente:** Se determinan principalmente por la topografía y las condiciones del suelo. Las rutas y puntos se deben establecer antes de la colocación de alguna tipología de SUDS para así conocer como estos van a ser afectados.
- **Potencial de infiltración:** Es necesario conocer la tasa de infiltración del suelo para poder caracterizar su posible uso, ya sea para la disposición de la escorrentía, zonas de intercepción del flujo o áreas donde no ocurra la infiltración.
- **Lugares existentes para la descarga de la escorrentía superficial:** Es de vital importancia la identificación de los cuerpos de aguas o sistemas de recolección ya existentes para así conocer el volumen de la escorrentía a descargar y su posible tratamiento.

- **Sitios con riesgo de inundaciones:** Se debe tomar en cuenta las posibles áreas inundables antes de la implementación de alguna técnica de SUDS, debido al impacto que estas puedan ocasionar por la acumulación de la escorrentía superficial.

Seguidamente, CIRIA hace mención a los factores relacionados al espacio:

- **Hábitats locales y biodiversidad:** Hay que caracterizar los hábitats locales según su importancia para poder tomarlos en cuenta a la hora de realizar un nuevo mecanismo de SUDS, considerando la flora, la fauna y las estrategias de biodiversidad presentes en cada una de estas.
- **Paisajismo e infraestructuras existentes:** conociendo las edificaciones ya realizadas se puede establecer la idoneidad de la tipología de los SUDS; gracias al entendimiento de la capacidad de los drenajes existentes se puede determinar que infraestructuras se van a acoplar a los nuevos sistemas. Adicionalmente, hay que tomar en cuenta los espacios verdes presentes en un urbanismo para así conservar la estética y naturalidad del paisaje urbano.

En resumen, se presentan unas consideraciones relacionadas a estos enfoques (Prince George's County, 1999):

1. *Definir el control hidrológico:* Infiltración / Volumen de escorrentía / Recarga de agua subterránea. Deben seleccionarse según los análisis cuantitativos de parámetros hidrológicos.
2. *Analizar las condiciones del sitio:* Disponibilidad de espacio, Infiltración, Tabla de Agua, Pendientes. Tabla de restricciones y valores recomendados.
3. *Filtrar los posibles SUDS:* Oportunidades, Limitaciones, Funcionalidad. Excluir prácticas que no funcionen para un sitio específico y evaluar tanto las condiciones de la zona como las características hidrológicas.
4. *Evaluación de alternativas:* Evaluaciones iterativas a nivel hidrológico. Análisis de factibilidad de diferentes tamaños y número de SUDS.
5. *Seleccionar los SUDS apropiados:* Configuración óptima. Análisis de optimización iterativo para definir las mejores combinaciones de SUDS para una zona.

6. *Incorporar controles convencionales:* Determinar si se requieren controles adicionales o SUDS complementarios, en función de los modelos óptimos calculados y los objetivos de control hidrológico definidos.

4.1.2 Selección del mecanismo

La selección de los diferentes mecanismos de SUDS se ve influenciada por los dos enfoques descritos en el apartado anterior, sin embargo, estos no son los únicos parámetros para escoger la tipología. Por lo tanto, en la Tabla N°18 se muestra una serie de criterios e indicadores que permiten facilitar la selección de los diferentes sistemas:

Tabla N°18. Aspectos y criterios considerados en la metodología para la selección de SUDS. Fuente: Jiménez,2017

Aspecto	Criterio	Indicador/ Cuantificación
Técnico	Control del flujo/ Control hidráulico	Frecuencia de reboses
		Evento de diseño
		Duración del periodo seco antecedente
		Tasa de respuesta para eventos superpuestos
		Evento extremo que puede controlarse
	Control de la contaminación	Captura de contaminantes disueltos
		Captura de contaminantes particulados
	Adaptabilidad del sistema	Idoneidad para el reemplazo de estructuras convencionales
		Borde libre de diseño
Ambiental	Impacto del volumen en el cuerpo receptor	Erosión aguas abajo
		Efectos térmicos
		Niveles de agua subterránea
	Impacto en la calidad del cuerpo receptor	Cumplimiento de estándares de calidad del agua
		Umbral de concentración de contaminantes
		Impacto en calidad del agua subterránea
	Impacto ecológico	Diversidad biótica
	Consumos	Energía requerida
	Emisiones	Dióxido de carbono emitido durante la construcción
	Reciclaje	Materia prima requerida
Uso de materiales reciclados		
Operación y mantenimiento	Requerimientos de mantenimiento y servicios	Necesidades y frecuencia
	Confiabilidad del sistema y durabilidad	Probabilidad de falla del sistema

Tabla N°18. Aspectos y criterios considerados en la metodología para la selección de SUDS. Fuente: Jiménez, 2017

Aspecto	Criterio	Indicador/ Cuantificación	
Operación y mantenimiento	Requerimientos de mantenimiento y servicios	Necesidades y frecuencia	
	Confiabilidad del sistema y durabilidad	Probabilidad de falla del sistema	
Beneficios urbanos y sociales	Salud pública y riesgos de seguridad	Susceptibilidad al vandalismo	
		Riesgo para trabajadores y usuarios	
	Desarrollo sostenible	Contribución a políticas de desarrollo sostenible	
	Conciencia e información a la comunidad		
	Amenidad y estética		Nivel de amenidad
		Apariencia	
		Integración al entorno urbano	
Económico	Costo del ciclo de vida	Costos de capital y mantenimiento	
		Costos de demolición	
	Riesgo financieros		
	Accesibilidad a largo plazo	Costos para la comunidad	Tarifas para el manejo del agua lluvia
		Previsiones a largo plazo	Adopción y responsabilidades para la cobertura
	Costos del terreno		
	Flexibilidad		Tamaño mínimo del lote
			Sensibilidad a condiciones climáticas
	Tiempo		Longevidad
			Eficiencia en la construcción
		Eficiencia en la demolición	
		Tiempo antes de apertura al tráfico	
Legal y planeación urbana	Estado de adopción		
	Problemas locales en las construcción y desarrollos		
	Regulaciones para el manejo urbano del agua lluvia		

A pesar de la existencia de todos estos criterios e indicadores, siempre van a influir las condiciones en las cuales se esté desarrollando el proyecto en cuestión, es decir, en algunos casos va a prevalecer un criterio sobre otro dependiendo de las decisiones que tomen los gerentes del desarrollo.

En relación a estos criterios se puede englobar el proceso de selección en el siguiente esquema establecido por el Departamento del Agua del Gobierno del Oeste de Australia (2007):

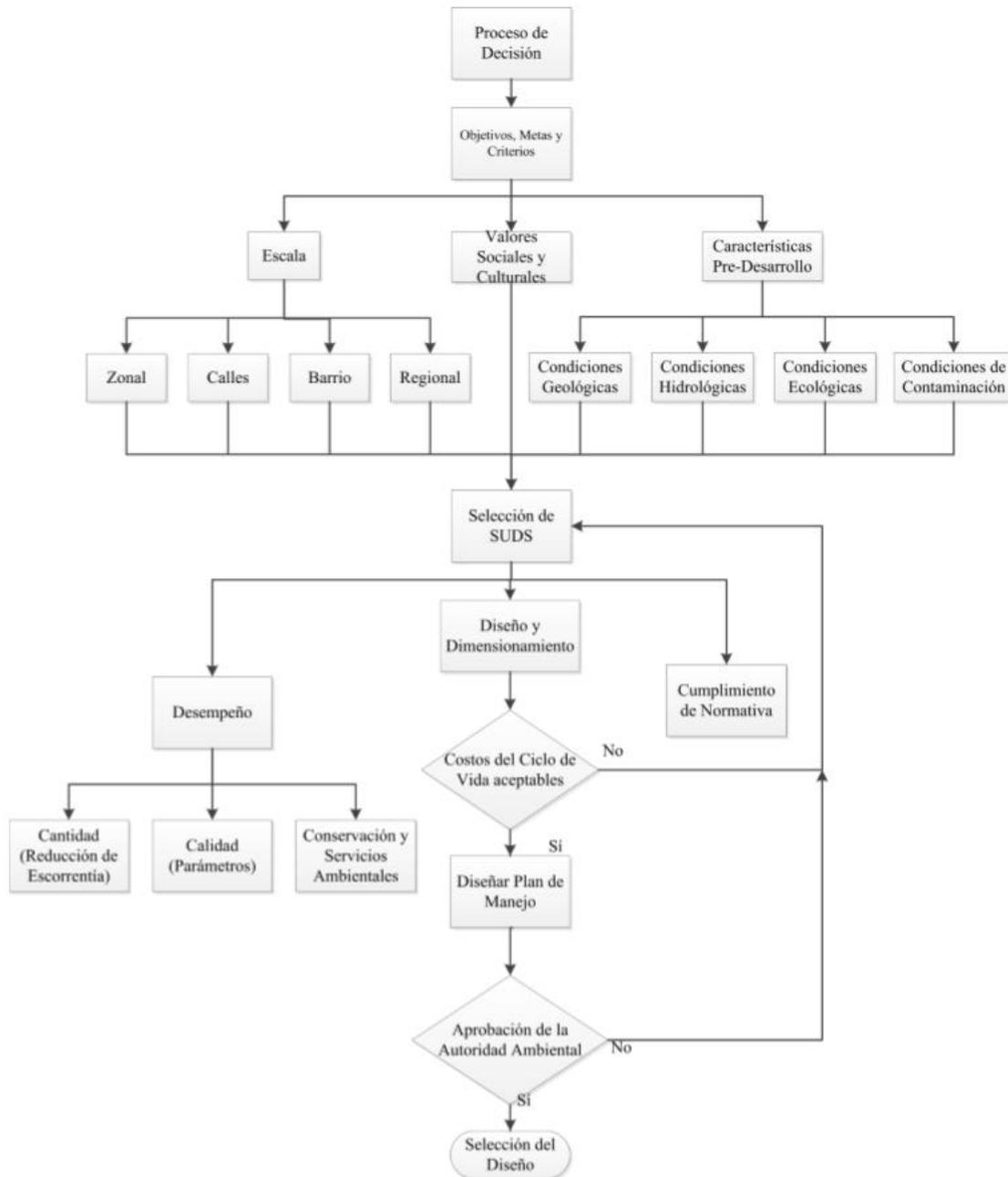


Figura N°25. Metodología general de selección de tipologías. Fuente: Department of Water- Government of Western Australia, 2007

4.1.3 Dificultades y restricciones

Como se ha mostrado a lo largo de este trabajo, los sistemas de drenaje urbano sustentable contribuyen en el uso adecuado del agua como recurso, en la disminución de agentes contaminantes, en el mejoramiento de la estética del paisaje urbano, control de escorrentía, entre

otros. No obstante, existen distintos inconvenientes a la hora de la aplicación de los SUDS, algunos de estos se ven involucrados durante la planeación, el diseño y la implementación de estos sistemas. En la Tabla N°19 se muestra un conjunto de dificultades aunadas a cada una de las etapas y sectores referentes en el desarrollo de los SUDS.

Tabla N°19. *Dificultades referentes a la planeación, diseño e implementación de los SUDS. Fuente: Jiménez, 2017*

Etapa	Dificultades	Clase
Planeación, diseño e implementación	Falta de información estandarizada y guías para los procesos de planeación diseño e implementación	Técnica
	Falta de conocimientos técnicos	Técnica
	Simplificación de los problemas de gestión del agua urbana	Institucional y técnica
	Operación separada de distintos departamentos y organizaciones	Institucional
	Limites políticos en lugar de límites ecológicos/hidrológicos para las administraciones locales ^{2,3} .	Institucional
	Falta de trabajo interdisciplinario, intersectorial e interorganizacional	Institucional y técnico
	Aproximación centralizada y tecnocrática (ausencia de participación de la comunidad)	Institucional y técnico
Planeación e implementación	Dificultad de controlar soluciones locales a través de un plan	Institucional y técnico
	Falta de políticas o normativas	Institucional
	Dificultad para la implementación de sistemas alternativos en predios privados	Institucional y técnico
	Renuencia de funcionarios locales a destinar dinero para el desarrollo de proyectos fuera de su jurisdicción	Financiera
	Necesidad de incrementar tarifas la cual no es aceptada por la comunidad	Financiera
	Baja valoración de activos ambientales	Institucional
	Falta de mensajes que indiquen la correlación de los SUDS con conceptos ambientales por parte de los actores gubernamentales	Institucional
Planeación	Falta de capacidad institucional	Institucional
	Falta de recursos para la gestión de aguas pluviales	Financiera
	Numerosas organizaciones sin responsabilidades claras	Institucional
	Ausencia de una visión estatal para el manejo sostenible del agua	Institucional
	Visión y manejo del agua pluvial como un proceso aislado de otras actividades urbanas (p.ej. planeación, regulación del uso de la tierra, control del desarrollo, entre otras) .	Institucional y técnico
	Priorización de otros aspectos de la planeación urbana sobre la gestión de aguas pluviales	Institucional
Implementación	Conflictos de interés con planificadores y constructores	Institucional
	Inercia administrativa	Institucional
	Restricciones legales para el uso de dinero público en propiedades privadas	Financiera
	Incertidumbre en cuanto al desempeño de las estructuras y los costos	Técnico

Con respecto a las restricciones, estas dependen del mecanismo que se esté empleando, aunque la gran mayoría están relacionados con las condiciones físicas del terreno. Algunas variables de restricción física para la gran mayoría de los SUDS pueden ser: Uso de los suelos, pendiente, tasa de infiltración, distancia al nivel freático, distancia a cimientos, etc.

4.2 Casos a Nivel Mundial

Para ayudar a comprender y demostrar la metodología y los beneficios descritos en esta investigación, a continuación, se describen un conjunto de casos en todo el mundo donde fueron implementados una serie de técnicas de SUDS que ponen en evidencia los aspectos positivos brindados a una población. Cada uno de estos proyectos es un ejemplo real que expone las características y condiciones a través de las cuales se desenvuelven las tipologías en un urbanismo, además de exhibir los costos y los inconvenientes que pudieron haber surgido en su construcción.

Se realizó una búsqueda en distintos países desarrollados donde las obras sustentables ya forman parte de su día a día, así como en otros donde apenas comienzan a implementar las tipologías de los SUDS. Los proyectos expuestos son casos analizados de pequeña, mediana y gran escala que describen los diferentes rasgos que permiten reconocer la aplicabilidad de los mecanismos utilizados.

4.2.1 High Point, Seattle, Estados Unidos



Figura N°26. Calles permeables y sistemas de bioretención de High Point, Seattle. Fuente: Seattle Public Utilities, 2008

High Point es una urbanización en el oeste de Seattle que cuenta con una instalación de un sistema drenaje sustentable capaz de manejar las aguas de lluvia en un ambiente urbano de gran escala. Este incorpora un conjunto de técnicas de SUDS incluyendo algunas como cunetas verdes, sistemas de infiltración y pavimentos permeables en las aceras y calles residenciales. Con 50 hectáreas, es uno de los urbanismos sostenibles más grandes de Estados Unidos que integra un

innovador sistema de drenaje que abarca 34 cuadras de casas tipo “townhouse” (Seattle Public Utilities, 2008). Algunos de los aspectos más destacados de este proyecto de acuerdo con Buranen (2010) y Greenroads Manual v1.5 (2011) son los siguientes:

- Las condiciones del desarrollo existente fueron mejoradas a través de cunetas verdes y estanques paisajísticos que se convirtieron en amenidad para la comunidad.
- Cuenta con una totalidad de 22.000 pies lineales (6700 m) de cunetas verdes paralelas a las calles que contienen plantas nativas tolerantes a las sequías, grama, árboles que limpian la escorrentía superficial y la infiltran al suelo circundante.
- Los suelos del sitio eran anteriormente finos limosos a finos limo-arenosos, pero por ser suelos pobres en términos de potencial a infiltración y almacenamiento, se enriquecieron con un nuevo suelo cuya tasa de infiltración y capacidad de almacenamiento eran mayores.
- A pesar de la densidad urbana del área, High Point solo posee 60% de superficies impermeables. Esto se le atribuye, en gran parte, al uso de concreto permeable en los estacionamientos, aceras y calles de la ciudad.

A continuación, se presenta la Tabla N°20 que contiene las características de este desarrollo:

Tabla N°20. *Aspectos generales del proyecto High Point Fuente: Buranen, 2010; Climate-Data, 2018 Greenroads Manual v1.5, 2011 y Seattle Public Utilities, 2008*

CLIMA	TIPOLOGÍA
<ul style="list-style-type: none"> • El mes más seco es julio, con 21mm de precipitación. • La mayor precipitación cae en enero con un promedio de 151mm. • La precipitación total es de 969mm al año. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cunetas verdes. • Sistemas de infiltración. • Pavimentos permeables. • Pequeños humedales. • Depósito de detención.

Tabla N°20. Aspectos generales del proyecto High Point Fuente: Buranen, 2010; Climate-Data, 2018 Greenroads Manual v1.5, 2011 y Seattle Public Utilities, 2008

OBJETIVOS	GENERALIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Tratar el 10% del agua que se descarga en la quebrada Longfellow Creek. • Controlar el desborde a causa de tormentas de lluvia, limpiarlas y almacenarlas. • Mejorar la transitabilidad y la ecología urbana. • Servir de ejemplo como desarrollo innovador que promueve y anima a construir sostenible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se utilizaron plantas nativas de la zona • Lograron reducir los picos y volúmenes de agua que se descargaban en Longfellow Creek. • El sistema fue diseñado para proteger la cuenca de Longfellow Creek, una de las 4 cuencas más grandes de Seattle. • El sistema de drenaje Proporcionar tratamiento de calidad del agua para la tormenta de 6 meses y atenuar la tormenta de período de retorno dos años, 24 horas a condiciones de pastizales previamente desarrolladas.
ECONÓMICO	PROBLEMAS
<ul style="list-style-type: none"> • 550 millones de dólares costó el proyecto. • Proyecciones de Seattle Public Utilities (SPU) indican que el sistema de drenaje sostenible utilizado es al menos 25% más económico que el sistema tradicional debido a menos construcción y costos de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de experiencia y precedentes. • Poco conocimiento de los detalles técnicos de los SUDS y como la vida rutinaria impacta al medio ambiente.

4.2.2 Tanner Springs Park, Portland, Estados Unidos.



Figura N°27. Vista del parque Tanner Springs Park. Fuente: GreenWorks, 2018

Es uno de los tres parques construidos en el “Pearl District” de la ciudad de Portland, Oregon. En una zona residencial y comercial, el Tanner Springs Park es un innovador parque sustentable de 4800m² diseñado no solo como un espacio recreativo para la comunidad, sino también como un sistema de manejo del agua de lluvia que anualmente cae en la ciudad. De acuerdo con la organización Friends of Tanner Springs (2018), “el objetivo era transformar una cuadra contaminada de la ciudad en un espacio urbano verde y saludable para contemplación y conexión con la naturaleza.”

Este parque sustentable cuenta con un estanque de retención, donde las aguas superficiales provenientes de las calles y aceras de los alrededores convergen en el pequeño reservorio y son absorbidas en parte por el suelo antes de llegar al sitio de deposición; con el tiempo esta agua se evapora paulatinamente, completando así el ciclo natural del agua (Dickhaut et al., 2011).

Tabla N°21. Aspectos generales del proyecto Tanner Park. Fuente: Climate-Data, 2018; Dickhaut et al., 2011; Dreiseitl, 2006 y GreenWorks, 2018

CLIMA	TIPOLOGÍA
<ul style="list-style-type: none"> • La precipitación es de 940 mm al año. • La precipitación más baja es en julio, con un promedio de 17 mm. • La mayor cantidad de precipitación ocurre en diciembre, con un promedio de 162 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estanque de retención.
OBJETIVOS	GENERALIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Reestablecer el parque como un área urbana natural que sirva como manejo de las escorrentías superficiales y además funcione como espacio público urbano agradable para caminar y despejar la mente. 	<ul style="list-style-type: none"> • El parque anteriormente era un área industrial contaminada. • El parque posee estructuras artísticas que reinventan la historia del lugar. • Las condiciones del suelo no permiten que el agua se infiltre. • En eventos extremos de lluvia, el exceso de agua es depositada en el sistema de drenaje de la ciudad.
ECONÓMICO	PROBLEMAS
<ul style="list-style-type: none"> • El proyecto tuvo un costo de 2.2 millones de dólares. 	Sin información

4.2.3 Herne Hill and Dulwich, Londres, Inglaterra



Figura N°28. Instalación de los tanques geocelulares y vista del parque en Dulwich. Fuente: Kissi y Jessop (2015)

Los distritos Herne Hill y Dulwich forman parte del municipio Southwark al sureste de Londres. Estas zonas han presentado problemas de inundaciones a lo largo de la historia producto de intensas lluvias que han causado daños fundamentales a las comunidades de las zonas. Debido a esto se realizó un proyecto innovador y sustentable que proporciona un plan de alivio contra inundaciones desarrollado por una asociación entre organizaciones públicas y privadas (Thames Water, 2016). La solución se basa en proporcionar una serie de técnicas de SUDS conectados entre sí e instalados en un parque público y dos privados con el objetivo de capturar y manejar el agua superficial. (CIRIA, 2015).

A continuación, Kissi y Jessop (2015) describen los elementos claves presentes en el plan:

- Construcción de terraplenes para interceptar y contener temporalmente o redirigir más de 51.000m² de superficie de agua.
- Construcción de tres tanques de almacenamiento geocelulares bajo tierra que proporcionan capacidad para almacenar agua de 4000m³.
- Creación de 3750 m² de humedales y 6400m² de praderas de flora silvestre para generar biodiversidad y mejorar hábitats locales.
- El proyecto tiene 100 años de vida útil y provee protección contra lluvias con período de retorno de 75 años.

Tabla N°22. Aspectos generales del proyecto Herne Hill and Dulwich. Fuente: Climate-Data, 2018; CIRIA, 2015; Kissi y Jessop ,2015 y Thames Water, 2016

CLIMA	TIPOLOGÍA
<ul style="list-style-type: none"> • La precipitación es de 621mm al año. • El mes más seco es febrero, con un promedio de precipitación de 39mm. • La mayor precipitación ocurre en noviembre con un promedio de 61mm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tanques de almacenamiento. • Humedales. • Depósitos de detención.
OBJETIVOS	GENERALIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Aliviar los riesgos de inundación para evitar daños a personas y propiedades. • Crear áreas locales para usos recreacionales y generar hábitats que involucren la naturaleza con las zonas urbanas. • Mejorar la estética del ambiente urbano. 	<ul style="list-style-type: none"> • En 2004, una intensa lluvia afectó las áreas de Herne Hill y Dulwich generando un estimado de 1 millón de libras en costos de daños a negocios y residentes. • El proyecto proporciona protección a 200 propiedades en riesgo de inundación.
ECONÓMICO	PROBLEMAS
<ul style="list-style-type: none"> • El proyecto tuvo un costo estimado de 4.3 millones de libras (5.6 millones de dólares). • Se estima que el proyecto provee 12 millones de libras (15.74 millones de dólares) en beneficios económicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Período de tiempo de la entrega del proyecto muy ajustado • Dificultades de entendimiento entre los distintos proyectistas para encontrar soluciones a los altos volúmenes de escorrentías.

4.2.4 Benaguasil, Valencia, España



Figura N°29. Vista panorámica del municipio de Benaguasil y la implementación de los SUDS. Fuente: Ballester-Olmos et al., 2013

En Valencia, España, existe un municipio conocido como Benaguasil donde se dispone de varios sistemas de drenaje sustentable a lo largo de esta comunidad, siendo estos una buena muestra del aprovechamiento de las precipitaciones de agua. Los SUDS fueron desarrollados e impulsados por el proyecto europeo AQUAVAL (Aquaval Project, 2010).

Estos proyectos innovadores fueron realizados en el Parque Costa de la Ermita, el Centro Polivalente de la Juventud, el Centro de Día del Ayuntamiento, el Polígono Industrial Les Eres y el estacionamiento de la piscina municipal. Estas infraestructuras constan de los siguientes mecanismos: pavimentos permeables, sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia, techos verdes, área de bioretención y cunetas verdes. Algunos de los aspectos de estos proyectos según Ballester-Olmos et al. (2013) son:

- Las cunetas verdes retendrán alrededor de 1.400 m³ de agua anualmente, los cuales no tendrán que ser tratados por lo que contribuye al ahorro energético y económico.
- En el sistema de aprovechamiento de aguas pluviales existe un canal de mármol de 40x40cm cubierto por un cristal de paso peatonal, a través del cual se conduce al agua desde el bajante hasta el tanque de almacenamiento generando así armonía con la estética urbana.
- Crearon nuevas oportunidades de empleo y la promoción de la diversificación industrial del drenaje urbano.

Tabla N°23. Aspectos generales del proyecto Benaguasil Fuente: AQUAVAL PROJECT,2010; Ballester-Olmos et al., 2013 y E2STORMED, 2013

CLIMA	TIPOLOGÍA
<ul style="list-style-type: none"> • Mediterráneo. • Tiene un promedio anual de precipitaciones de 432mm. • La mayor precipitación cae en octubre con un promedio de precipitación de 10 mm/mes. • El mes más seco es julio con un promedio de 10mm/mes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cunetas verdes. • Pavimentos permeables. • Áreas de bioretención. • Sistemas de aprovechamiento de aguas de lluvia.

Tabla N°23. Aspectos generales del proyecto Benaguasil Fuente: AQUAVAL PROJECT,2010; Ballester-Olmos et al., 2013 y E2STORMED, 2013

OBJETIVOS	GENERALIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Prevención de inundaciones y reboses del sistema de drenaje urbano. • Prevenir sobrevertidos del alcantarillado con el fin de mejorar la calidad del agua del medio receptor. • Disminuir el efecto “Isla de Calor Urbano”. • Reducir el consumo de energía eléctrica y por tanto de emisiones de CO2 a la atmósfera. • Promover la utilización de los SUDS como complemento a la práctica convencional en los países del Sur de Europa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estos proyectos fueron desarrollados con el uso del programa E2STORMED. • En los días de verano, el techo verde del Centro de Día del Ayuntamiento ha generado un ahorro en el consumo eléctrico del 15-20% por la climatización del edificio.
ECONÓMICO	PROBLEMAS
Sin información	Sin información

4.2.5 Conjunto Prisma, Nuremberg, Alemania

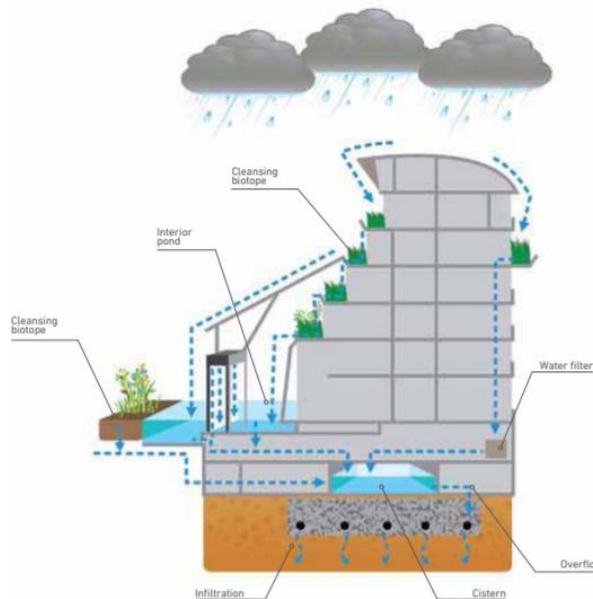
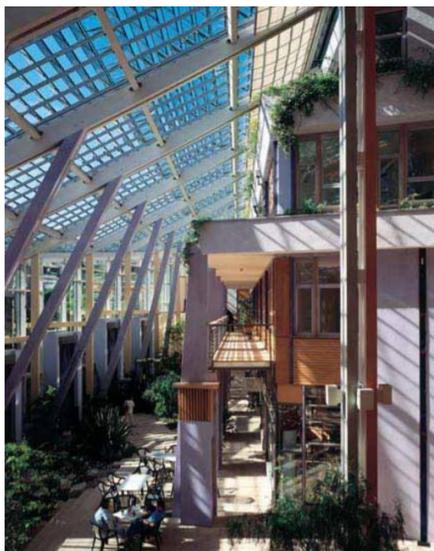


Figura N°30. Vista interior del edificio Prisma y ciclo del agua dentro del desarrollo. Fuente: Singapore’s National Water Agency (2013)

Prisma es una edificación de dos torres de usos múltiples construida en el centro de Núremberg, Alemania. Este complejo es usado para comercios, oficinas y residencias, donde se evidencia el funcionamiento integral de la infraestructura. Prisma posee un sistema de captación de las aguas de lluvia que es recogida a través de una cubierta de vidrio que conecta a ambas torres, además de los techos que posee la edificación. El agua es transportada a través de un sistema de tubos que recogen el vertido líquido en el último piso y en un estanque de retención que se encuentra en el exterior del edificio. Luego esta agua es limpiada en todo el trayecto con filtros y un sistema de vegetación hasta que es descargada en un tanque subterráneo (Dickhaut et al., 2011). De acuerdo con Singapore's National Water Agency (2013), el sistema de vegetación consiste en una serie de jardineras que se encuentran en cada piso, por lo que el agua fluye hacia abajo a través de las masetas donde es limpiada biológicamente.

Tabla N°24. Aspectos generales del proyecto Prisma. Fuente: Climate-Data, 2018; Dickhaut et al., 2011 y Singapore's National Water Agency, 2013

CLIMA	TIPOLOGÍA
<ul style="list-style-type: none"> • El mes más seco es febrero, con un promedio de precipitación de 38mm. • Precipitación anual es de 644mm. • La mayor precipitación ocurre en junio con un promedio de 76mm. • Presenta las cuatro estaciones del año. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estanque de retención. • Instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales. • Sistema de infiltración.
OBJETIVOS	GENERALIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Recolectar y reusar el agua de lluvia para múltiples propósitos del complejo, tales como irrigación, aire acondicionado natural, sistema de incendio, uso estético de instalaciones interiores del edificio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta un sistema de retención de agua en la parte subterránea de la edificación que permite que el agua se infiltre en el suelo. • No fue necesario una conexión al sistema público de drenaje. • El complejo tiene una cascada artificial en el interior como elemento estético cuya agua utilizada es la almacenada por el sistema de captación. • El sistema de aprovechamiento de las aguas de lluvia está diseñado para una tormenta con período de retorno de 10 años. • El tanque subterráneo almacena 240m³ de lluvia.

Tabla N°24. Aspectos generales del proyecto Prisma. Fuente: Climate-Data, 2018; Dickhaut et al., 2011 y Singapore's National Water Agency, 2013

ECONÓMICO	PROBLEMAS
<ul style="list-style-type: none"> El proyecto tuvo un costo de 70 millones de dólares. 	Sin información

4.2.6 Experiencias de “Ecobarrios” en México

De acuerdo con Flores-Lucero (2013), “Los ecobarrios son una alternativa para materializar los principios del desarrollo sustentable principalmente en zonas urbanas degradadas”. Esta iniciativa fue implementada en México, pero llevándose a cabo tanto en áreas urbanas, como en áreas rurales y periurbanas.

En México existen una serie de proyectos de ecobarrios que involucran una diversidad de técnicas sustentables, demostrando el potencial de estas tecnologías en el impulso de la sustentabilidad. Algunos de los mecanismos utilizados son: humedales artificiales, sistemas de captación de aguas de lluvia, estanques de retención y áreas de bioretención; cabe acotar que además de estas técnicas también se utilizan otras metodologías referentes al saneamiento y tratamiento de las aguas que no están relacionadas al tema expuesto en esta tesis.

Varios de los proyectos ejecutados se encargan de la reutilización de las aguas de lluvias, entre ellos se encuentra un modelo que almacena y abastece de las aguas pluviales a las comunidades de San Jerónimo Purenchécuaro y San Andrés Tzirondaro, y otro que se encarga de la rehabilitación y transferencia de los humedales artificiales instalados en la cuenca del lago de Pátzcuaro (Cervantes et al., 2018).

Estas nuevas aplicaciones utilizadas en México pueden aportar soluciones a muchos asentamientos urbanos y rurales alrededor del mundo. Uno de los países con oportunidad para implementar estos modelos es Venezuela, por presentar una gran similitud con algunas de las características físicas y climatológicas del territorio mexicano. Uno de los principales sitios para la realización de estos proyectos sería en los asentamientos informales y las áreas rurales.



Figura N°31. Técnicas de drenaje sustentable implementadas en México. Fuente: Cervantes et al., 2018

4.3 Implementación en Venezuela

A lo largo de este trabajo todos los puntos tratados, además de proporcionar información de enseñanza e interés, también han sido expuestos en forma de guía para poder encontrar soluciones que permitan implementar de una forma efectiva el uso de los SUDS en Venezuela, tanto para desarrollos futuros, como en sistemas ya establecidos. Los beneficios y limitaciones de las técnicas de los drenajes sustentables abren un abanico de información de ayuda para conocer cuál es el tipo de SUDS más apropiado para un sitio en específico y si cumple con las características y consideraciones del proyecto en particular. Por otra parte, los casos mundiales existen como antecedentes de desarrollos que sirven, primero, como una evidencia tangible que demuestra las innumerables ventajas que su construcción le ofrece a un país y, por último, como ejemplos de comparación para expresar sus experiencias para poder adaptarlas a la comunidad venezolana.

Al tener una gran cantidad de variables presentes a la hora de construir estos mecanismos, se decidió enfocarse principalmente en aspectos como el clima, condiciones hidrológicas, topografía, las características del suelo, usos del suelo e integración con el paisaje urbano.

Con estas características se realizó un análisis y comparación de algunos de los mecanismos involucrados en esta investigación utilizando los Gráficos N°1 al 12 y las tablas presentes en los Anexos N°1 al 14, dando como resultado un conjunto de información que permitirán evaluar los posibles desempeños y ajustar cada una de las tipologías a la población y territorio venezolano.

Tabla N°25. Condiciones para la selección de la tipología según las características físicas del suelo. Fuente: Elaboración Propia adaptado de Ballaster-Olmos et al., 2013 Jimenez,2017; CHIA,2017 y Manual de Drenaje Urbano,2013

Parámetros	Tipo de retención	Tipología									
		IAAP	Techos verdes	Pavimentos permeables	Zanjas de infiltración	Pozos de infiltración	Cunetas verdes	Sistemas de bioretención	Estanques de retención	Depósitos de detención	Jardines de Lluvia
Pendiente del suelo (%)	Mínimo	SD	5	0.5	1	N/A	1	N/A	N/A	1	N/A
	Máximo	SD	10	5	5	15	10	10	3	15	10
Espacio en superficie	Reducido	NO	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	SI
	Amplio	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Tipo de suelo	Permeable	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Impermeable	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	NO

IAAP: Instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales. SD: Sin datos.

Tabla N°26. Selección de la tipología según los aspectos hidrológicos. Fuente: Elaboración Propia adaptado de Ballaster-Olmos et al., 2013 Jimenez,2017; CHIA,2017 y Manual de Drenaje Urbano,2013

Tipología	Reducción Caudal Pico	Reducción Volumen de Escorrentía	Reutilización del agua
IAAP	BAJO	MEDIO	ALTO
Techos Verdes	BAJO	MEDIO	MEDIO
Pavimentos permeables	ALTO	ALTO	MEDIO
Zanjas de infiltración	ALTO	ALTO	NULO
Pozos de infiltración	ALTO	ALTO	NULO
Cunetas verdes	MEDIO	MEDIO	BAJO
Sistemas de bioretención	MEDIO	MEDIO	NULO
Estanques de retención	ALTO	ALTO	NULO
Depósitos de detención	ALTO	MEDIO	NULO
Jardines de lluvia	MEDIO	MEDIO	NULO

Tabla N°27. Selección de la tipología de los SUDS según los aspectos ambientales y de amenidad. Fuente: Elaboración Propia adaptado de Jimenez,2017; CHIA,2017 y Manual de Drenaje Urbano,2013

Tipología	Mejoramiento de la calidad del agua	Mejoramiento paisajismo urbano
IAAP	NULO	NULO
Techos Verdes	BAJO	ALTO
Pavimentos permeables	BAJO	BAJO
Zanjas de infiltración	MEDIO	BAJO
Pozos de infiltración	MEDIO	BAJO
Cunetas verdes	MEDIO	ALTO
Sistemas de bioretención	ALTO	ALTO
Estanques de retención	MEDIO	ALTO
Depósitos de detención	MEDIO	MEDIO
Jardines de lluvia	MEDIO	ALTO

Tabla N°28. Selección de la tipología de los SUDS según los costos asociados. Fuente: Elaboración Propia adaptado de Ballaster-Olmos et al., 2013 Jimenez,2017; CHIA,2017 y Manual de Drenaje Urbano,2013

Tipología \ Costos	Construcción	Mantenimiento
IAAP	ALTO	MEDIO
Techos Verdes	ALTO	MEDIO
Pavimentos permeables	MEDIO	BAJO
Zanjas de infiltración	BAJO	BAJO
Pozos de infiltración	BAJO	BAJO
Cunetas verdes	MEDIO	BAJO
Sistemas de bioretención	BAJO	MEDIO
Estanques de retención	MEDIO	MEDIO
Depósitos de detención	BAJO	BAJO
Jardines de lluvia	BAJO	MEDIO

Tabla N°29. Selección de la tipología según los usos del suelo. Fuente: Elaboración Propia adaptado de Ballaster-Olmos et al., 2013 Jimenez,2017; CHIA,2017 y Manual de Drenaje Urbano,2013

Usos del suelo Tipología	Zonas residenciales	Zonas comerciales	Zonas industriales	Zonas institucionales	Estacionamientos	Plazas	Parques
IAAP	X	X	X	X	X	X	
Techos Verdes	X	X	X	X	X		
Pavimentos permeables	X	X	X	X	X	X	X
Zanjas de infiltración	X	X	X	X	X		X
Pozos de infiltración	X	X		X	X	X	X
Cunetas verdes	X	X		X	X		X
Sistemas de bioretención	X	X		X	X	X	X
Estanques de retención	X			X			X
Depósitos de detención	X			X			X
Jardines de lluvia	X	X	X	X	X	X	X

Con respecto a las zonas de estudio se dividirán de acuerdo a las regiones hidrológicas venezolanas encontradas en el libro de drenaje vial de Franceschi (1984) y establecidas por Ayala y Mendoza (1980), siendo estas las siguientes: Lago de Maracaibo, Los Andes, Llanos Occidentales, Centro-occidente, Noroccidente, Litoral Central, Centro, Tuy-Barlovento, Llano de Apure y Amazonas, Llanos Centrales, Llanos Orientales, Delta del Orinoco, Oriente y Guayana (Ver Figura N°32). En algunas de estas regiones se escogieron un conjunto de ciudades para su evaluación, cuyo criterio de selección se basó en la cantidad de habitantes dentro de estos núcleos urbanos. Se estableció el número de 400.000 habitantes como población mínima a partir del censo del 2011 realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE). Cabe acotar que se tomó este valor como referencia para garantizar que el estudio solo sea realizado para áreas urbanas, a pesar de que varias técnicas pueden ser implementadas en urbes con menor densidad poblacional y en zonas rurales.

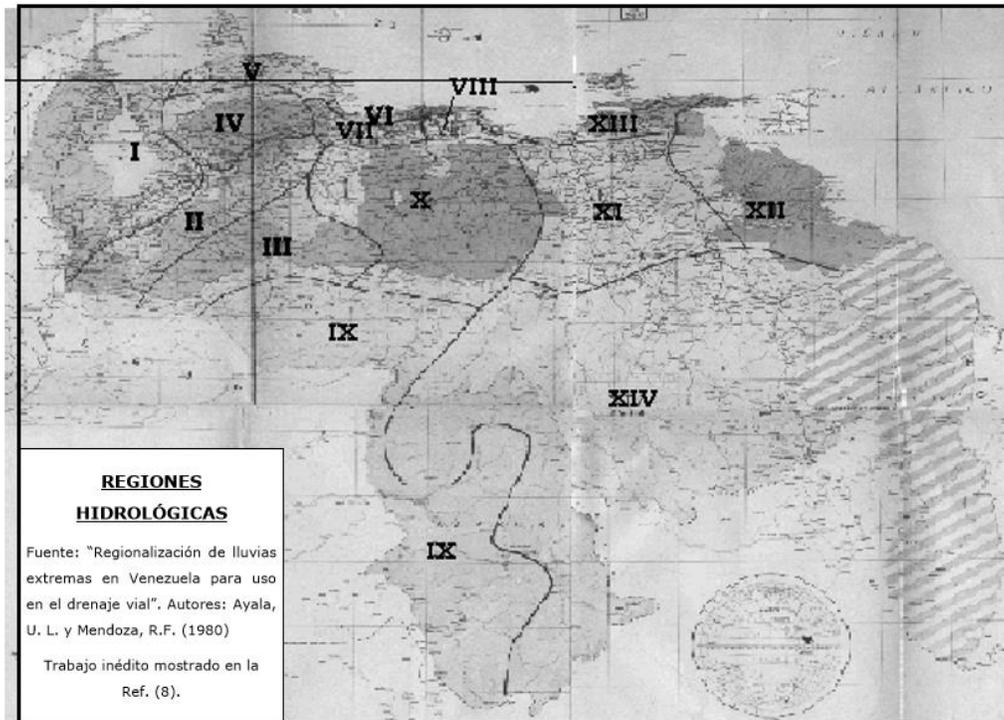


Figura N°32. Regiones Hidrológicas de Venezuela. Fuente: Franceschi, 1984

4.3.1 Lago de Maracaibo (Zona I)

Maracaibo es la principal ciudad escogida para el estudio que se encuentra en la zona I, la cual presenta una población de 1.459.448 personas (INE, 2011). Según la clasificación climática de Köppen, esta entidad cuenta con un clima semiárido cálido (Bsh), donde su temperatura promedio anual es de 28°C (Ver Anexo N°17); cabe acotar que la precipitación media histórica (la estación Maracaibo) tuvo un promedio de precipitación anual igual a 580mm, destacando que hoy en día estos números pueden variar debido al cambio climático (Consalvi et al., 2008). Este territorio presenta una serie de aspectos adicionales que se expondrán a continuación para el mejor entendimiento de sus características especificadas para el criterio de selección de los SUDS:

- Se encuentra en una fosa de hundimiento desarrollada por el lago de Maracaibo y amplias planicies aluviales que convergen en él, por lo que se caracteriza por presentar pendientes suaves (El Nacional, 1997).

- La cuenca del lago de Maracaibo ha presentado inundaciones en el pasado, considerándose la ciudad como posible área inundable.
- Según el Anexo N°16, es una de las ciudades con mayor consumo eléctrico del país. En general, el estado Zulia consume aproximadamente entre 5.000 y 11.000 GWh de energía eléctrica

Identificación y propuestas de los SUDS:

En primer lugar, esta entidad presenta altas temperaturas y al ser una de las ciudades más calurosas del país se recomendaría la implementación de los techos verdes, debido a que permitirían aislar térmicamente el edificio, mitigar parte de los impactos del efecto de la isla de calor y disminuir en algo el alto consumo energético. Esta no presenta ningún inconveniente con respecto a construcción por limitaciones de pendiente, por lo que se podría implementar cualquier tipo de SUDS. Maracaibo es reconocida por tener problemas de drenaje, por lo cual se necesitaría aplicar metodologías que reduzcan los volúmenes de escorrentía; con base en la Tabla N°26 se determinó que con algunas zanjas de infiltración y la realización de pavimentos permeables podrían disminuir dicha problemática.

Adicionalmente, es una de las ciudades con menor cantidad de precipitación anual de este estudio, por lo que se deberían realizar sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales para poder reutilizar el agua como riego o para disminuir la demanda de agua potable. Por ser una zona urbana altamente densificada, no se recomienda el uso de técnicas como estanques de retención o depósitos de detención ya que estos requieren de un amplio espacio. Por último, la capital zuliana presenta zonas como la Ciudad Universitaria, el parque Urdaneta y la plaza del Rosario de Nuestra Señora de la Chiquinquirá que serían ideales para ubicar sistemas de bioretención (los jardines de lluvia, para espacios de menor escala), para así mejorar el paisaje urbano además de ser mecanismos que reducirían parte de los caudales picos.

4.3.2 Centro-occidente (Zona IV)

En esta región se encuentra la ciudad de Barquisimeto, la cual presenta una población de 996.230 habitantes (INE, 2011). Según la clasificación climática de Köppen, esta ciudad cuenta con un clima semiárido cálido (Bsh) y una temperatura promedio anual de 24.2 °C (Ver Anexo

N°17); destacando que la precipitación media histórica de la estación de Barquisimeto tuvo un promedio de precipitación anual igual a 540mm (Consalvi et al., 2008). Adicionalmente presenta distintas características que se expondrán a continuación para el mejor entendimiento de los criterios de selección de los SUDS:

- El territorio barquisimetano es parte del municipio Iribarren, el cual se encuentra en depresiones tectónicas que generaron los valles y colinas de esta ciudad; estableciéndose una topografía ondulada de pendientes suaves (El Nacional, 1997).
- Es área de nula o poca inundación de acuerdo a la información que se desprende del Anexo N°15.
- El consumo de energía eléctrica es principalmente residencial. El estado Lara consume entre 2000-5000 GWh de energía eléctrica según el Anexo N°16.

Identificación y propuestas de los SUDS:

Barquisimeto es la ciudad con menor precipitación de las entidades estudiadas en este trabajo, de tal manera es necesario aprovechar lo mejor posible la lluvia que precipita debido a que presenta un clima relativamente seco. Esto se puede lograr utilizando instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales (IAAP) para así almacenar el agua, a tal punto de poder reutilizarla en ocasiones que se requieran; igualmente, se podrían implementar los pavimentos permeables como una alternativa para poder capturar y almacenar el agua, por ejemplo, el estacionamiento del Centro Comercial Sambil de esa ciudad, se consideraría como una posible zona para su aplicación.

Por otra parte, esta ciudad presenta en sus alrededores unos terrenos baldíos que podrían servir como posibles lugares para futuros desarrollos donde se deberían implementar varias técnicas de SUDS. Esto se debe a que probablemente el efecto de urbanización aumentaría las áreas impermeables y, en consecuencia, se incrementaría el escurrimiento superficial alterando el ciclo hidrológico natural e impidiendo que el agua se infiltre en el suelo. Una de las técnicas capaces de solventar parte de estos inconvenientes podría ser la utilización de cunetas verdes. Adicionalmente, se cree necesaria la colocación de techos verdes y sistemas de bioretención ya que se consideran una buena alternativa para el mejoramiento de los paisajes urbanos de la ciudad.

4.3.3 Litoral Central (Zona VI)

La ciudad de Maracay fue considerada como la entidad principal de esta zona VI, la cual presenta una población de 407.109 habitantes. Según la clasificación climática de Köppen, la capital de Aragua posee un clima tropical de sabana (Aw) con temperatura media anual de 24.8°C (Ver Anexo N°17), donde la precipitación oscila entre 500 y 1200mm; la precipitación media histórica de la estación de Maracay es de 901mm (Consalvi et al., 2008). Esta ciudad cuenta con condiciones adicionales que permiten conocer más a fondo sus características las cuales se tomarán en consideración para la selección de la tipología de SUDS, a continuación, se destacan un conjunto de éstas contempladas en Consalvi et al. (2008):

- Se encuentra al pie de la Cordillera de la Costa en la depresión del lago de Valencia con tipo de paisaje de planicies aluvial.
- El relieve varía de topografía ondulada a plana, por lo que se puede considerar que esta zona presenta pendientes moderadas. (El Nacional, 1997)
- Esta presenta en sus alrededores valles inundables según el Anexo N°15.
- El consumo eléctrico de esta ciudad está suplido principalmente por demandas residenciales y comerciales, como se muestra en el Anexo N°21. De manera general, el estado de Aragua consume entre 2000-5000 GWh de energía eléctrica (ver Anexo N°16).

Identificación y propuestas de los SUDS:

Maracay presenta anualmente precipitaciones elevadas por la cual se requiere utilizar metodologías capaces de atenuar los caudales picos, siendo posibles soluciones zanjas de infiltración y pozos de infiltración que ayudarían a disminuir el incremento de estos picos de las crecientes y reducir los volúmenes de escorrentía, siempre y cuando los suelos donde se construyan sean permeables; adicionalmente esta segunda técnica podría utilizarse para la recarga de distintos acuíferos ya que la depresión del lago de Valencia cuenta con más de 1000 pozos subterráneos (Consalvi et al., 2008), pero es necesario acotar que varios de ellos actualmente están contaminados por presentar una interconexión con el lago de Valencia. En los parques Metropolitano y Santos Michelena se deberían plantear depósitos de detención que ayudarían a reducir los efectos mencionados anteriormente, al igual que la colocación de jardines de lluvia en las distintas Plazas de la entidad tomando como ejemplo la Plaza Bolívar.

4.3.4 Centro (Zona VII)

Con respecto a esta zona se seleccionó a Valencia, la capital de Carabobo como área urbana a estudiar. Esta entidad cuenta con una población de 829.856 habitantes aproximadamente de acuerdo con el INE (2011). El clima de la zona de Valencia, según Köppen, es tropical seco (Aw) con una temperatura media anual de 24.5°C (Ver Anexo N°17), donde la precipitación media histórica evaluada en la estación Valencia es de 1057mm en un período similar a las otras zonas hidrológicas (Consalvi et al., 2008). Las características fisiográficas y energéticas más destacadas en la ciudad de Valencia son:

- Está ubicada en la depresión del lago de Valencia la cual está constituida por sedimentos fluvio-lacustres que forman un paisaje predominantemente plano, con pendientes bajas que aumentan ligeramente en la altiplanicie de Tocuyito (El Nacional, 1997).
- Esta es un área de nula o poca inundación según el Anexo N°15.
- El consumo eléctrico de Valencia es similar al de Maracay ya que las demandas provienen principalmente de zonas residenciales y comerciales, y el estado de Carabobo consume entre 2000-5000 GWh de energía eléctrica al igual que Aragua (ver Anexo N°16).

Identificación y propuestas de los SUDS:

Valencia se encuentra entre las ciudades con mayores precipitaciones de este estudio, siendo una de las principales características para realizar obras que reduzcan los caudales picos y volúmenes de esorrentía. Posibles soluciones serían las zanjas y pozos de infiltración, sin embargo, Valencia presenta varias zonas con bajas tasas de infiltración dificultando así la construcción de estas tipologías de acuerdo con el Anexo N°18; en consecuencias se recomendaría la implementación de estanques de retención y depósitos de detención para solventar estos problemas de impermeabilidad, pudiéndose aplicar en los terrenos adyacentes al Hipódromo Nacional y a la Ciudad Plaza.

Otro punto a destacar es la presencia de numerosos cuerpos de agua contaminados por descargas de vertidos líquidos residuales de viviendas e industrias (ej. La cuenca del lago de Valencia y las aguas subterráneas de Carabobo) que dificultan el abastecimiento de agua a la población, por tal motivo, se han realizado numerosas obras de trasvases de agua de distintas regiones para suministrarle agua a la ciudad. Una alternativa como fuente complementaria serían

las instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales, que además de reducir costos, permitirían reutilizar las aguas de lluvia para disminuir el consumo del agua. Esta alternativa es viable siempre y cuando Valencia no se vuelva un polo de desarrollo industrial.

Otras acciones a desarrollar serían la ejecución de técnicas como sistemas de bioretención que aportarían un atractivo visual a las diferentes parques y plazas de la ciudad, como sería el Parque Negra Hipólita.

4.3.5 Tuy-Barlovento (Zona VIII)

En dicha zona se encuentra Caracas, la capital de Venezuela, siendo la ciudad con mayor población de esta nación con un total de 2.904.376 habitantes (INE, 2011). El territorio caraqueño presenta un clima tropical de sabana (Aw) para las zonas bajas con temperaturas medias anuales superiores a 18°C y un clima templado de altura tropical de sabana (Gw) para las zonas altas con temperaturas medias anuales inferiores a 18°C, según la clasificación climática de Köppen (Ver Anexo N°17). En cuanto a las precipitaciones, las estaciones Caracas L.C y Caracas O.C midieron la media histórica obteniendo un promedio de pluviosidades anuales de 916 y 870mm respectivamente (Consalvi et al., 2008). Caracas posee una diversidad de aspectos que se destacarán para comprender el análisis de la selección de SUDS:

- El territorio caraqueño presenta varios tipos de relieve entre los cuales se encuentran las montañas, las colinas y los valles, en consecuencia, se tendrá una variabilidad en cuanto a las pendientes topográficas que pueden ir desde pendientes suaves a pendientes abruptas (El Nacional, 1997).
- Es una zona de poca inundación, exceptuando los riesgos de inundaciones debido al desbordamiento del río Guaire que posee una frecuencia de 25 a 50 años aproximadamente.
- Según el Anexo N°21, es una de las ciudades con mayor consumo de energía eléctrica del país, caracterizada por los consumos residenciales y comerciales. El distrito capital consume entre 5.000 a 11.000 GWh al año (ver Anexo N°16).

Identificación y propuestas de los SUDS:

La capital de Venezuela es conocida por ser una ciudad con pendientes fuertes en zonas cercanas al cerro Ávila y al sur, correspondiendo esta característica física como un problema a la hora de instalar drenajes en algunas zonas del área metropolitana. A pesar de esto, el valle de Caracas cuenta con zonas con pendientes entre 1 y 5% que aumenta el rango de técnicas de SUDS disponibles. El Parque del Este, al ser una zona potencial para capturar agua y un área recreacional para el pueblo caraqueño, es un lugar apto para la instalación de drenajes sustentables tipo laguna de retención que ayudaría con la atenuación de flujos de crecientes del mismo parque o de las áreas aledañas que podrían descargar en el mismo cuerpo de agua artificial, y contribuir con el mejoramiento de la calidad de agua y el paisajismo del parque. Adicionalmente, los pozos y zanjas de infiltración también sirven para ser utilizados en los jardines de los diferentes parques de la capital, disminuyendo así el riego usual y mejorando el subsuelo logrando almacenar agua para los tiempos de sequía.

Del mismo modo, Caracas al ser una metrópolis se encuentra rodeada de innumerables edificaciones y vías de comunicación que impermeabilizan gran parte de la superficie. Por tal motivo, los techos verdes y pavimentos permeables son una solución para lograr establecer el ciclo natural del agua, además de disminuir el escurrimiento superficial lo que ocasionaría una reducción en las dimensiones de las obras de captación, y de ayuda complementaria en el suministro de agua a la ciudad respectivamente. Algunos de los posibles lugares de implementación para los pavimentos permeables serían en los estacionamientos de las universidades, donde se han realizado estudios de su posible aplicación como el elaborado por Perez y Salas en el 2016 de la universidad Metropolitana. Con respecto a los techos verdes ya existen ejemplos en la capital, entre los cuales se encuentran el de la biblioteca de la alcaldía Chacao en los Palos Grandes y el del automercado Central Madeirense de Santa Fe, La Alameda (Acuña y Estévez, 2013).

Cabe resaltar que, al ser una ciudad con una pluviosidad anual alrededor de los 950mm, si se logra capturar agua en los techos de cada vivienda se lograría una disminución notable en el abastecimiento de agua potable de la ciudad que resultaría en reducciones considerables de costos por bombeo desde fuentes lejanas; esto se logra con las instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales. Por último, se recomendaría construir jardines de lluvia en las plazas del centro para mejorar el paisaje urbano y ayudar al drenaje de estas.

4.3.6 Llanos Orientales (Zona XI)

La ciudad de Maturín es el centro urbano más importante del estado Monagas, además de ser su capital y presenta una población de 542.259 habitantes (INE,2011). En la clasificación climática de Köppen, posee un clima tropical de sabana (Aw) y una temperatura promedio anual de 26.8°C (Ver Anexo N°17). La estación de Maturín midió la precipitación media histórica y obtuvo un promedio de precipitación anual igual a 1336mm (Consalvi et al., 2008). Esta zona presenta algunas características que se mostrarán seguidamente para comprender los aspectos utilizados en el criterio de la selección de los SUDS:

- La ciudad de Maturín se encuentra en los llanos orientales por lo que predominan las altiplanicies, debido a esto presentan un relieve de plano a ondulado con pendientes que oscilan entre 1% y 5% (Consalvi et al., 2008).
- De acuerdo con el Anexo N°15, Maturín es una planicie de desbordamiento.
- El consumo de energía eléctrica es utilizado en su mayoría por las actividades petroleras y las zonas residenciales, a pesar de esto como el estado Monagas solo consume entre 1000 y 2000 GWh de energía eléctrica según el Anexo N°16.

Identificación y propuestas de los SUDS:

Dentro del estudio realizado, esta entidad es la que posee la mayor precipitación anual por lo que es necesario manejar y hacer uso de estas aguas con eficiencia. En primer lugar, se deberían atenuar los efectos ocasionados por las frecuentes lluvias con la realización de zanjas y pozos de infiltración, pavimentos permeables y estanques de retención, siendo tipologías de SUDS óptimas para contrarrestar los efectos de desbordamiento, acotando que no se presentan ningún inconveniente a la hora de sus instalaciones por poseer pendientes entre 1-5%, suelos con capacidad de infiltración adecuada y una serie de espacios disponibles para su realización. En segundo lugar, al existir esos niveles de precipitaciones se recomendaría implementar sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales para así poder reutilizar estas aguas y disminuir la demanda de las zonas residenciales.

Es necesario saber que Maturín es una de las tres ciudades más calurosas del estudio, siendo el calor y la lluvia una incomodidad para sus habitantes. Una posible solución para disminuir estas problemáticas podría ser la realización de techos verdes, inclusive ayudando a disminuir la

temperatura de las edificaciones, reduciendo los efectos de la isla de calor y reutilizando las aguas que capturan como aguas grises.

En la parte sur se establece el Barrio Morichal II, en donde existe la posibilidad de realizar cunetas verdes que solventarían algunos de los inconvenientes que presenta este sector. Igualmente, existen varias áreas donde se podrían desarrollar sistemas de bioretención, que además de ser una ayuda para las otras técnicas recomendadas anteriormente, también mejorarían el paisaje urbanístico de estos.

4.3.7 Oriente (Zona XIII)

En dicha región se encuentra la ciudad de Barcelona, del estado Anzoátegui, que posee una población de 421.424 habitantes (INE, 2011). Según la clasificación climática de Köppen, el territorio barcelonés cuenta con un clima semiárido cálido (BSh) y una temperatura promedio anual de 26.9 °C (Ver Anexo N°17). La precipitación media histórica de la estación de Barcelona tuvo un promedio de precipitación anual igual a 624mm, (Consalvi et al., 2008). Esta zona cuenta con una serie de condiciones que se describirán seguidamente para comprender mejor el criterio de selección de los SUDS:

- Se encuentra en el tramo oriental de la Serranía del Interior con un relieve de tipo planicie litoral, cuyas pendientes no sobrepasan al 1% (Consalvi et al., 2008).
- En el Anexo N°15, Barcelona se encuentra en una zona de poca o nula inundación, con la excepción de eventos de crecida del río Neverí.
- El consumo de energía eléctrica es similar al de las ciudades de Valencia y Maracay, predominando su uso en las zonas residenciales y comerciales. En cuanto al estado Anzoátegui consume entre 2000 a 5000 GWh al año (ver Anexo N° 16).

Identificación y propuestas de los SUDS:

Al igual que la mayoría de las ciudades estudiadas, Barcelona presenta una topografía plana que permite la construcción de cualquier tipología de SUDS. Por poseer una pluviosidad relativamente baja (624mm), esta ciudad no requiere en su mayoría técnicas que permitan reducir volúmenes de escorrentías de crecidas frecuentes, no obstante, es necesaria la colocación de mecanismos como pavimentos permeables e instalaciones de aprovechamiento de aguas pluviales

que ayuden a retener las aguas pluviales de la ciudad, almacenándolos temporal o permanentemente para así contribuir con la posible falta de agua en las épocas de sequía.

Otras opciones serían los techos verdes para mejorar el paisajismo urbano de las viviendas, generando así una mejor calidad de vida a los habitantes. Las zanjas y pozos de infiltración podrían ser realizados en esta zona, no obstante, no se considera primordial su implementación por no ser de sus principales problemáticas.

Actualmente en Barcelona se están construyendo nuevos urbanismos por la cantidad de terrenos baldíos que presenta y para impulsar el desarrollo urbanístico de la entidad, por lo que a la hora de realizar estos desarrollos es necesario tomar en cuenta el diseño de drenajes sustentables para así ayudar a la sostenibilidad de la ciudad.

4.3.8 Guayana (Zona XIV)

En esta zona se encuentra la ciudad de Puerto Ordaz que tiene una población de 706.736 habitantes (INE, 2011). En la clasificación climática de Köppen, Puerto Ordaz se caracteriza por tener un clima tropical de sabana (Aw) y una temperatura promedio anual de 26.5°C (Ver Anexo N°17). Al encontrarse al norte del estado Bolívar el promedio anual de las precipitaciones se ubica entre 1000 y 1500mm (Consalvi et al., 2008). Esta ciudad presenta distintos aspectos señalados a continuación:

- Esta constituida por planicies de inundación y colinas bajas que presenta un tipo de relieve plano a suavemente ondulado.
- Este territorio presenta una planicie de explayamiento parcialmente inundable, de acuerdo con el Anexo N°15.
- Por ser una zona industrial, la mayor parte del consumo eléctrico se inclina hacia ese sector. Cabe resaltar que el estado Bolívar es el territorio con el mayor nivel de consumo de energía eléctrica; se encuentra entre 11.000 y 27.000 GWh al año, debido a las industrias básicas de hierro y aluminio (ver Anexo N°16).

Identificación y propuestas de los SUDS:

Puerto Ordaz, al igual que Maturín, posee altas precipitaciones y temperaturas elevadas, a pesar de esto cuentan con una serie de pequeñas diferencias. En primer lugar, la ciudad de Puerto Ordaz limita con dos de los ríos más imponentes del país, siendo estos el río Orinoco y el río Caroní; por tal motivo, esta ciudad es considerada una planicie de explayamiento, considerándose así una región con un riesgo alto a presentar inundaciones por crecidas en sus zonas de bajas cotas aledañas a los ríos y por lo tanto requiere soluciones que permitan disminuir los impactos generados por los desbordamientos. En este caso se recomendaría realizar pavimentos permeables debido a que permitirían reducir los flujos de las crecidas y atenuar los efectos de los volúmenes de escorrentía, manteniendo en parte la habitualidad de los ciudadanos; las alternativas de pozos y zanjas de infiltración no son consideradas buenas soluciones por las bajas tasas de infiltración presentes en el estado.

Los estanques de retención y depósitos de detención son propuestas viables ya que existen espacios extensos considerables los cuales permiten la incorporación de estos mecanismos para así ayudar a reducir los caudales picos de las crecidas y mejorarían los aspectos paisajísticos. Esta ciudad, además de ser la cuna de la producción de la energía eléctrica del país, cuenta con varias zonas de gran consumo energético (Bolívar es el estado con mayor consumo de energía eléctrica del país), por lo que se debería considerar la implementación de los techos verdes para que ayuden a disminuir el uso de energía, principalmente en las zonas residenciales y comerciales. Esta técnica no solo serviría como aislante térmico de edificios, sino que también se podría utilizar para capturar las grandes cantidades de agua de lluvia que precipita en la ciudad, obteniendo un recurso disponible a ser utilizado como aguas grises para el sistema sanitario de la edificación o para el mismo riego del techo.

4.3.9 Aspectos Generales del Estudio

Luego de haber analizado cada una de estas zonas, es necesario enfatizar que cada proyecto presenta sus características únicas que los definen, es decir, cada obra requiere distintas acciones que se ejecutan dependiendo de las diferentes variables que pueden surgir en un desarrollo; el detalle específico de cada proyecto se escapa del alcance de esta tesis.

Otro aspecto que hay que tener en cuenta es el mantenimiento constante que cada una de estas obras requiere, es decir, no solo hace falta implementar estas metodologías, sino que hay que garantizar que se mantengan a través del tiempo.

Como un valor inicial para los cálculos de estos sistemas, se recomienda utilizar las curvas de intensidad-frecuencia-duración con un período de retorno de 10 años a la hora de seleccionar y diseñar una técnica de SUDS en caso de no tener los datos hidrológicos necesarios para el estudio.

En general se observa que el país aún se encuentra en desarrollo, por lo que se debe comenzar a diseñar con estas técnicas como complemento de los drenajes convencionales para así garantizar la planificación, construcción y operación adecuado de una ciudad. Sin embargo, es fundamental conocer que, por la situación actual de Venezuela, el uso de estos nuevos drenajes sustentables no es una acción prioritaria para ejecutar debido a que existen una serie de metas a cumplir antes de considerar los drenajes; cabe acotar que en un futuro es primordial la realización de estos sistemas.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. En la actualidad, los países más desarrollados en el ámbito de la sostenibilidad en sistemas de drenajes urbanos han comenzado a implementar estas nuevas técnicas desde comienzos del siglo XXI y todavía presentan inconvenientes en los proyectos que realizan por falta de experiencia.
2. Las técnicas de SUDS son infraestructuras que, además de necesitar una adecuada construcción, es necesario operarlas correctamente y hacerle un seguimiento continuo, de manera que se realice un mantenimiento apropiado con el fin de asegurar su funcionamiento óptimo en el tiempo.
3. La construcción de los sistemas de drenaje urbano sustentable no sustituye al drenaje convencional, sino que hace función de complemento para lograr una gestión integral sustentable de las aguas pluviales en las zonas urbanas, a pesar de que algún día los SUDS serán la opción técnica para los nuevos desarrollos. Algunos países en sus manuales de drenaje ya contemplan las tipologías de SUDS como parte del diseño cotidiano de los drenajes urbanos.
4. Es fundamental tener en cuenta que la sustentabilidad no solo se logra actualizando las infraestructuras de una ciudad, sino que también se requiere un cambio trascendental en el pensamiento de las personas para que el desarrollo sustentable se alcance; mediante la aplicación de las medidas no estructurales se podría lograr concientizar a la sociedad.
5. En el análisis de los diferentes mecanismos de SUDS se determinó que si se combinan entre ellos se puede lograr potenciar su funcionamiento en conjunto, logrando una mejor gestión integral de las aguas pluviales.
6. Con respecto a los casos mundiales estudiados se puede apreciar que aplicando las técnicas de SUDS no solo se obtienen beneficios ambientales, sino también económicos y sociales, disminuyendo consumos energéticos al largo plazo, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos, incrementando la seguridad de los habitantes de una población, entre otras ventajas.
7. En la investigación realizada se obtuvo escasa información acerca de análisis costos-beneficios de las obras de drenajes sustentables realizadas en el mundo, limitando el conocimiento de las atribuciones económicas que cada proyecto generó.

8. La implementación de los SUDS en Venezuela permite pensar en un futuro sostenible, sin embargo, si no se aprovechan y se manejan los recursos hídricos adecuadamente, esto afectará directamente en el desarrollo del país, siendo vital enseñar a los ciudadanos como conservar y reutilizar las aguas.
9. Con los estudios realizados se puede establecer que Venezuela es un país donde los SUDS son aplicables por sus características hidrometeorológicas y físicas.
10. Venezuela hoy en día es un país desactualizado en las áreas de control y manejo de las aguas pluviales sustentables, por lo que es necesario comenzar a evolucionar en este sector de la construcción para poder algún día equipararse con los otros países que les han llevado años lograr aplicar adecuadamente estos nuevos sistemas.
11. Las aguas pluviales son un recurso hídrico que está a la disposición para su aprovechamiento, pero las personas no perciben el alcance tan próximo de una fuente dispuesta como complemento para suplir las demandas de agua que cada día aumentan por el mal manejo de los servicios de las ciudades venezolanas.
12. El país presenta una deficiencia a la hora de tener datos esenciales para el análisis de la selección adecuada para la implementación de las diferentes tipologías de SUDS. Para poder garantizar la correcta aplicación hace falta realizar nuevas y actualizadas documentación en el territorio nacional.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

1. Es importante la actualización de las pocas normas y manuales de la gestión de aguas pluviales del país, con el fin de asegurar la construcción y uso sustentable de los recursos hídricos. Igualmente, es indispensable la vigilancia en cuanto al cumplimiento de las normas y el poder ejercer la autoridad de manera de que se practique la justicia ambiental.
2. Realizar un manual técnico de los diferentes mecanismos de los SUDS, donde se incluya el diseño de cada uno de estos, con el fin de tener una guía a seguir a la hora de la construcción.
3. Realizar actividades con las comunidades que sirvan para la concientización de la temática ambiental y el uso adecuado de las aguas en general.
4. Se deben realizar investigaciones más detalladas de cada técnica de SUDS, así como evaluaciones de cada ciudad del territorio Nacional, de modo que se puedan desarrollar análisis más precisos para la selección e implementación de los drenajes urbanos sustentables para cada una de las ciudades venezolanas.
5. Como solución a la contaminación de las aguas de lluvia, se pueden utilizar una serie de sistemas de tratamiento que se pueden colocar en los sumideros de las ciudades con el objetivo de atrapar sólidos o disminuir los agentes contaminantes presentes en el agua superficial.
6. Con respecto a los nuevos desarrollos que se desean realizar en las ciudades, es necesario tomar en cuenta los efectos que se generan aguas abajo del urbanismo y garantizar que se mantengan los niveles de agua de los cauces donde se disponen las aguas pluviales finales.

BIBLIOGRAFÍA

- Abellán, A., (2017). *SuD Sostenible*. Consultado en <http://sudsostenible.com/>
- Acuña, R. y Estevez, C., (2013). *Factibilidad, Diseño e instalación de un Techo Verde en el Edificio de Postgrado de la Universidad Católica Andrés Bello en Caracas*. UCAB, Caracas.
- Alfonzo, I., (1995). *Técnicas de investigación bibliográfica*. Contexto Ediciones, Caracas.
- Aquaval Project, (2010). *The Efficient Management of Rain Water in Urban Environments*. Consultado en http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=AQUAVAL_Factsheet_EN.pdf
- Ayala, U. y Mendoza, R., (1980). *Regionalización de Lluvias Extremas en Venezuela para Uso en el Drenaje Vial*. Inédito, Caracas, Venezuela.
- Ballester-Olmos, J., Doménech, I., Escuder, I., Morales, A., Perales, S. y Peris, P., (2015). *El Agua en Benaguasil un Viaje en el Tiempo*. Ajuntament de Benaguasil, Benaguasil.
- Banco Mundial, (2018). *Población urbana (% del total)*. Consultado en <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS>
- Bausson, M., (2008). *Estado del Arte de las Tecnologías de Bioremediación en el Mundo para el Control de Erosión en Zonas Tórridas*. UCAB, Caracas.
- Bolinaga, J.J., (1979). *Drenaje Urbano (INOS)*. Instituto Nacional de Obras Sanitarias, Caracas.
- Bolinaga, J.J., (1999). *Proyectos de Ingeniería Hidráulica*. Fundación Empresas Polar, Caracas.
- Buranen, M (2010). *Seattle Takes Natural Drainage to a High Point*. Consultado en <https://foresternetwork.com/weekly/stormwater-weekly/water/seattle-takes-natural-drainage-to-a-high-point/>
- Buroz, E., Córdova, J., Gabaldón, A., Iskandar, L., Rosales, A. y Uzcátegui, G., (2016). *Agua en Venezuela: una riqueza escasa*. Fundación Empresas Polar. Caracas.
- Castro, D.; Gómez, E.; Rodríguez, H. J. y Rodríguez, B. J., (2008). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. SUDS*. Consultado en <http://www.caminospaisvasco.com/Profesion/Publicaciones%20de%20nuestros%20colegiados/suds>

CEDEX, (2008). *Gestión de las Aguas Pluviales. Implicaciones en el Diseño de los Sistemas de Saneamiento y Drenaje Urbano*. Centro de publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, A Coruña.

Cervantes, E.; Falcón, A.; García, L.; Segura, I. y Vázquez, S. (2018) *Tecnologías Apropriadas para el Acceso Sostenible al Agua en el Medio Rural Marginado*. Jiutepec, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Chow, V.T.; Maidment, D. y Mays, L., (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill Interamerica, S.A. Bogotá.

CIIA., (2017). *Producto 2- Informe sobre la Investigación y Desarrollo de las Tecnologías y/o Tipologías de SUDS que más se Adapten a la Problemática de la Escorrentía Urbana en la Ciudad de Bogotá D.C.* Universidad de los Andes, Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Bogotá.

CIIA., (2017). *Producto 3- Investigación de las Tipologías y/o Tecnologías de SUDS que más se Adapten a las Condiciones de la Ciudad de Bogotá D.C.* Universidad de los Andes, Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Bogotá.

CIRIA C697, (2007). *The SUDS Manual*. CIRIA, London.

CIRIA C753, (2015). *The SuDS Manual*. CIRIA, London

Consalvi, S.; Grau, P.; Hernández, A.; Martínez, N.; Pantin, G.; Quintero, C.; Reyes, A.; Rodríguez Campos, M. y Rosales, A., (2008). *GeoVenezuela*. Fundación Empresas Polar, Caracas.

Decreto 883, (1995) *Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos*. Consultado en: <http://www.adan.org.ve/documentos/decreto-883.pdf>

De Pinho, K. y González, C., (2015). *Factibilidad para el Desarrollo de Drenajes Sustentables en el Campus de la Universidad Católica Andrés Bello*. UCAB, Caracas.

Dickhaut, W. Hoyer, J., Kronawitter, L. y Weber, B. (2011) *Water Sensitive Urban Design Principles and Inspiration for Sustainable Stormwater Management in the City of the Future –Manual-*.

Consultado

en

https://issuu.com/alleycreek/docs/2006_water_sensitive_urban_design_manual_wsud_kron/94

- Doménech, I. y Perales, S., (2008). *Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Una Alternativa a la Gestión del Agua de Lluvia*. Revista Técnica de Medio Ambiente, C&M Publicaciones.
- Dreiseitl, A., (2006) *Tanner Springs Park*. Consultado en <http://www.dreiseitl.com/en/portfolio#tanner-springs-park>
- E2STORMED, (2013). *Project Improvement of Energy Efficiency in the Water Cycle by the Use of Innovative Storm Water Management in Smart Mediterranean Cities*. Consultado en <https://www.keep.eu/keep/project-ext/39873/E2STORMED>
- El Nacional, (1997). *Atlas Práctico de Venezuela*. El Nacional, Caracas.
- EPA, (2000). *Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales*. Office of Water, Washington D.C.
- Flores-Lucero, M., (2013). *El Ecobarrio, una Alternativa para el Mejoramiento Urbano de los Asentamientos Irregulares*. Consultado en <https://biblat.unam.mx/es/revista/economia-sociedad-y-territorio/articulo/el-ecobarrio-una-alternativa-para-el-mejoramiento-urbano-de-los-asentamientos-irregulares>
- Franceschi, L., (1984). *Drenaje vial*. Fundación Juan José Aguerrevere (C.I.V.), Caracas.
- Friends of Tanner Springs, (2018). *Park Design*. Consultado en <https://friendsoftnnaersprings.org/park-design/>
- Gallopín, G., (2003). *Sostenibilidad y desarrollo Sostenible: un enfoque sistémico*. CEPAL, Santiago de Chile.
- García G, E., Ibáñez, M. y Mosqueira, G., (2012). *Análisis Crítico de la Problemática y las Soluciones Adoptadas a Nivel Europeo en la Gestión de las Aguas Pluviales en Entornos Urbanos. Posibles Aplicaciones en España*. Consultado en http://observatoriaigua.uib.es/repositori/suds_analisis_2012.pdf
- García H, E., (2011). *Control de Escorrentías Urbanas Mediante Pavimentos Permeables: Aplicación en Climas Mediterráneos*. Universidad Politécnica de Valencia, España.

Greenroads Manual v1.5, (2011). *Low Impact Development*. Consultado en <https://www.greenroads.org/files/96.pdf>

GreenWorks, (2018). *Tanner Springs Park*. Consultado en <https://greenworkspc.com/ourwork/tanner-springs-park>

Ine, (2011). *Censos de Población y Vivienda*. Consultado en http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com_content&view=category&id=95&Itemid

Isoscol, (2017). *Introducción a los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible* Consultado en <http://www.isoscol.com/wp-content/uploads/Introduccion-a-SUDS-V2.pdf>

Jiménez, S., (2017). *Metodología para la Integración del Espacio Público y los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible en Proyectos Urbanos*. Universidad de los Andes, Bogotá.

Kissi, J.y Jessop, M., (2015). *Herne Hill & Dulwich Flood Alleviation Scheme*. Consultado en [http://www.waterprojectsonline.com/case_studies/2015-](http://www.waterprojectsonline.com/case_studies/2015-Virtual/Southwark_CC_Herne_Hill_2015.pdf)

[Virtual/Southwark_CC_Herne_Hill_2015.pdf](http://www.waterprojectsonline.com/case_studies/2015-Virtual/Southwark_CC_Herne_Hill_2015.pdf)

LA Network, (2018). *Techos Verdes bajan la Temperatura en Clima Tropical*. Consultado en <http://la.network/techos-verdes-bajan-la-temperatura-en-clima-tropical/>

Ley de Aguas, (2007). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 35595 Ordinaria, 2 de Enero de 2007. Consultado en

http://www.uc.edu.ve/mega_uc/archivos/leyes/d_Ley_de_Aguas.pdf

Manual de Drenaje Urbano (2013). *Guía para el Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras de Drenaje Urbano*. Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

Novaplas, (2018). *Stormwater Infiltration Tanks*. Consultado en https://www.novaplas.com.au/thw_inustrial/stormwater-infiltration-tanks/

Ochoa, J., (2017). *El drenaje y su importancia para una ciudad sustentable*. Consultado en http://www.acading.org.ve/info/publicaciones/TRABAJOS_INCORPORACION/TI_JOSE_OCHOA.pdf

- ONU, (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Consultado en <https://undocs.org/es/A/42/427>
- ONU, (1992). *Convenio de sobre Diversidad Biológica*. Consultado en <http://www.un.org/es/events/biodiversityday/convention.shtml>
- Ospina-Zúñiga, Ó. y Ramírez-Arcila, H., (2014). *Evaluación de la Calidad del Agua de Lluvia para su Aprovechamiento y Uso Doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia*. Consultado en <https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/download/812/771>
- Palou, N., (2017). *Jardines en Azoteas, una Forma de Combatir la Contaminación y Ahorrar en Energía*. Consultado en <https://www.lavanguardia.com/vivo/ecologia/20170206/414074741450/jardin-azotea-contaminacion-co2-ciudades.html>
- Susdrain, (2018). *Suds Components*. Consultado en <https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/suds-components/suds-components.html>
- Perales, S. y Valls, G., (2013). *Sustainable Drainage Systems (SuDS)*. Paísea. Consultado en http://planifica.org/uploads/docs/articulos/SuDS_PAISEA024_Mar13.pdf
- Pérez, J. y Salas, E., (2016) *Análisis Mediante un Modelo de la Utilidad de Pavimentos Permeables para Recolección de Aguas Pluviales en Estacionamientos. Caso: Unimet*. Unimet, Caracas.
- Prince George's County, (1999). *Low Impact Development Design Strategies*. An Integrated Design Approach. Largo: Department of Environmental Resources.
- Project for Public Spaces, (2009). *What is Placemaking*. Consultado en <https://www.pps.org/article/what-is-placemaking>
- Rainwater Harvesting System, (2018). *Types of Rainwater Harvesting Systems*. Consultado en <http://rainharvesting.co.uk/types-of-rainwater-harvesting-systems/>
- Rodríguez A., A. (2017). *S.U.D.S Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, Hacia una gestión integral del ciclo urbano del agua*. Consultado en http://oa.upm.es/47528/1/TFG_Rodriguez_Arbelo_AntonioMiguel.pdf

Rodríguez H., J., (2008). *Estudio, Análisis y Diseño de Secciones Permeables de Firmes para Vías Urbanas con un Comportamiento Adecuado Frente a la Colmatación y con la Capacidad Portante Necesaria para Soportar Tráficos Ligeros*. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.

Scottish Environmental Protection Agency, (2017). *Sustainable Urban Drainage Systems* Consultado en www.sepa.org.uk

Seattle Public Utilities, (2008). *Measuring Success*. Consultado en <http://www.seattle.gov/util/EnvironmentConservation/Projects/GreenStormwaterInfrastructure/CompletedGSIPrompts/MeasuringSuccess/index.htm>

Singapore's National Water Agency, (2013). *Managing Urban Runoff*. Consultado en <https://www.pub.gov.sg/Documents/managingUrbanRunoff.pdf>

SWITCH, (2011). *Kit de Capacitación Switch Gestión Integral del Agua Urbana para la Ciudad del Futuro*. Consultado en http://www.switchtraining.eu/fileadmin/template/projects/switch_training/files/Modules/Modules_Spanish/SWITCH_Modulo1_esp.pdf

Thames Water, (2016). *Case Study – Delivering Flood Alleviation in Partnership*. Consultado en <https://www.thameswater.co.uk/-/media/site-content/corporate-responsibility/pdfs/climate-change/0100tw-arp2-3-case-study--herne-hill.pdf>

Trapote, A., (2013). *Infraestructuras Hidráulico-Sanitarias II. Saneamiento y Drenaje Urbano*. 2da Edición, Unión de Editoriales de Universidades Españolas, Alicante.

Universidad de Alberta, (2013). *What is Sustainability?* Consultado en <https://www.mcgill.ca/sustainability/files/sustainability/what-is-sustainability.pdf>

Victorian Stormwater Committee, (1999). *Urban Stormwater Best practice environmental management guidelines*. CSIRO, Melbourne, Australia.

Villalonga, M., (2017). *Rehabilitación de las Redes de alcantarillado mediante técnicas de Drenaje Urbano Sostenible*. Consultado en <https://www.iagua.es/blogs/miguel-valbuena-villalonga/rehabilitacion-redes-alcantarillado-mediante-tecnicas-drenaje>

ANEXOS

Parámetro	Tipo de restricción	Tipología									
		Cunetas verdes	Zanjas de infiltración	Pavimentos porosos	Pondajes húmedos	Zonas de bioretención	Alcorques inundables	Filtros de arena	Humedales artificiales	Cuencas de infiltración	Cuenca seca de drenaje extendido
Pendiente Longitudinal (%)	Máximo	10 ¹	5 ¹	5 ¹¹	15 ¹	10 ¹	10 ¹	5 ¹	15 ¹	3 ⁴	15 ¹
	Mínimo	1 ¹¹	X	0 ⁶	X	X	X	1 ²	X	0 ¹	1 ²
Distancia al nivel freático (m)	Mínimo	1.5 ¹	3 ²	3 ⁸	1.3 ⁷	1.8 ³	1 ³	1.5 ¹	1.3 ⁷	1.2 ⁷	3 ¹
Tasa de Infiltración del suelo (mm/h)	Mínimo	13 ³	7 ⁷	13 ³	X	7 ¹⁰	7 ¹⁰	13 ⁷	X	13 ⁷	7 ²
Distancia a cimientos (m)	Mínimo	4 ⁹	6 ¹²	6 ¹²	6 ¹²	6 ¹²	2 ¹³	1.5 ⁶	6 ¹²	6 ¹²	6 ²

Anexo N°1. Restricciones presentadas para las tipologías analizadas con respecto a la pendiente del terreno, distancia al nivel freático, tasa de infiltración y distancia a cimientos. Fuente: Jimenez, 2017.

Tipología	Pico	Volumen	
	Atenuación del flujo	Infiltración	Evapotranspiración
Cunetas Verdes ¹	NO	SI	NO
Zanjas de Infiltración ²	NO	SI	NO
Pavimentos Porosos ¹	SI	SI	NO
Pondajes Húmedos ¹	SI	NO	SI
Zonas de Bioretención ¹	SI	SI	SI
Alcorques Inundables ²	SI	SI	SI
Filtros de Arena ¹	SI	SI	NO
Humedales Artificiales ¹	SI	NO	SI
Cuencas de Infiltración ^{1*}	SI	SI	NO
Cuenca Seca de Drenaje Extendida ¹	SI	NO	NO

Anexo N°2. Procesos principales en las tipologías evaluadas. Fuente: Jimenez, 2017

Condiciones especiales del lugar que requieren atención	Obras de infiltración						
	DAI	Techos verdes	Jardín de lluvia	Pavimentos permeables	Estanques	Zanjas	Pozos
Topográficas y de suelos							
Pendiente fuerte, sobre 5%				Requieren colocar divisiones interiores			
Poco espacio en superficie	No				No		
Poca capacidad de soporte							
Poca capacidad de infiltración			No	No	No	No	No
Suelo poco propicio a la presencia de agua	No		No	No	No	No	No
Muchas redes en subsuelo			Prever posibles conflictos del agua infiltrada con las redes				
Simbología		Sin inconvenientes para desarrollar la obra.					
	(texto)	Es posible realizar la obra pero con las condiciones y restricciones indicadas en el texto.					
	No	La obra no es adecuada para las condiciones del lugar					

Anexo N°3. Selección de obras de infiltración por condiciones del lugar. Fuente: Manual de Drenaje Urbano, 2013

Condiciones especiales del lugar que requieren atención	Obras de almacenamiento			
	Tanques pequeños y barriles	Piletas, fuentes	Estanques	Lagunas
Topográficas y de suelos				
Pendiente fuerte, sobre 5%			Pueden colocarse a lo largo de la curva de nivel	
Poco espacio en superficie			No	No
Poca capacidad de soporte			Cuidar el diseño estructural de las obras anexas y muros	
Poca capacidad de infiltración				
Suelo poco propicio a la presencia de agua			No	No
Muchas redes en subsuelo				
Simbología		Sin inconvenientes para desarrollar la obra.		
	(texto)	Es posible realizar la obra pero con las condiciones y restricciones indicadas en el texto.		
	No	La obra no es adecuada para las condiciones del lugar		

Anexo N°4. Selección de obras de almacenamiento por condiciones del lugar. Fuente: Manual de Drenaje Urbano, 2013

Tipo de construcción o urbanización	Obras de infiltración						
	DAI	Techos verdes	Jardín de lluvia	Pavimentos permeables	Estanques	Zanjas	Pozos
Red domiciliaria. Propiedad Privada							
Vivienda aislada							
Vivienda social		No	No	No	No		
Edificio					Cuidar acceso para mantención y que no afecte fundaciones		
Comercio					Cuidar acceso para mantención y que no afecte fundaciones		
Industria			Atender calidad del agua		Cuidar acceso para mantención y que no afecte fundaciones		
Estacionamiento							
Red secundaria. Propiedad pública							
Ciudad jardín							
Urbanización social		No		No			
Alta densidad							
Comercial							
Industrial					No		
Estacionamientos		No					
Pasajes y veredas		No	No		No		
Calles y avenidas		No	No	No	No		
Áreas verdes		No	No	No			
Simbología		Sin inconvenientes para desarrollar la obra.					
	(texto)	Es posible realizar la obra pero con las condiciones y restricciones indicadas en el texto.					
	No	La obra no es adecuada para las condiciones de la red					

Anexo N°5. Selección de obras de infiltración por tipo de red y urbanización. Fuente: Manual de Drenaje Urbano, 2013

Condiciones especiales del lugar que requieren atención	Obras de almacenamiento			
	Tanques pequeños y barriles	Piletas, fuentes	Estanques	Lagunas
Red domiciliaria. Propiedad Privada				
Vivienda aislada			No	No
Vivienda social			No	No
Edificio			No	No
Comercio				
Industria				
Estacionamiento	No			
Red secundaria. Propiedad pública				
Ciudad jardín				
Urbanización social			Atender al espacio y seguridad	
Alta densidad				
Comercial				
Industrial				
Estacionamientos				
Pasajes y veredas	No	No	Atender al espacio y seguridad	
Calles y avenidas	No	No		
Áreas verdes	No	No		
Simbología		Sin inconvenientes para desarrollar la obra.		
	(texto)	Es posible realizar la obra pero con las condiciones y restricciones indicadas en el texto.		
	No	La obra no es adecuada para las condiciones del lugar		

Anexo N°6. Selección de obras de almacenamiento por tipo de red y urbanización. Fuente: Manual de Drenaje Urbano, 2013

Tipo de SUDS	Práctica	Baja Densidad	Residencial	Carreteras locales	Comercial	Hotspots	Zonas en construcción	Terrenos baldíos	Zonas Contaminadas
		Retención	Laguna de retención	1	1	2	3	3	4
	Almacenamiento subsuperficial	1	1	2	1	1	4	1	1
Humedales	Humedal	1	1	2	3	3	0	1	3
	Humedal de detención	1	1	2	3	3	0	1	3
	Pondaje/Humedal	1	1	2	3	3	0	1	3
	Humedal compactos	1	1	2	3	3	0	1	3
Infiltración	Zanja de infiltración	1	1	2	3	0	0	1	5
	Cuenca de infiltración	1	1	2	3	0	0	1	5
	Sumideros de infiltración	1	1	2	3	0	0	1	5

0 – No apto, 1 – Apto, 2 – Apto, se recomiendan dos etapas del tren de tratamiento, 3 – Apto, se recomiendan 3 etapas en el tren de tratamiento, 4 – Apto siempre y cuando se realicen actividades de rehabilitación post- construcción, 5 – Apto si se realizan diseños de prevención de contaminación.

Anexo N°7. Ejemplo de matriz de selección por uso de suelo. Producto 2 Fuente: CIIA, 2015.

Tipología	Coberturas de Espacio Público				
	Parques	Plazas	Separadores	Andenes	Parqueaderos
Zonas Bioretención	X	X	X	X	
Soakaways	X	X	X	X	
Zanjas de Infiltración	X		X		
Cuenca Seca de Drenaje Extendida	X		X		
Pondajes Húmedos	X		X		
Filtros de Arena	X		X		
Cunetas Verdes	X		X		
Humedales Artificiales	X		X		
Cuencas de Infiltración	X		X		
Pavimentos Porosos		X		X	X

Anexo N°8. Selección de la tipología según coberturas de espacio público. Producto 2 Fuente: CIIA, 2015.

Parámetro	Tipo de Restricción Por Valor	Tipología										
		Cunetas Verdes	Zanjas de Infiltración	Pavimentos Porosos	Pondajes Húmedos	Zonas de Bioretención	Alcorques Inundables	Filtros de Arena	Humedales Artificiales	Soakaways	Cuencas de Infiltración	Cuenca Seca de Drenaje Extendida
Pendiente Longitudinal (%)	Máximo	10 ¹	5 ¹	5 ¹¹	15 ¹	10 ¹	10 ¹	5 ¹	15 ¹	15 ⁹	3 ⁴	15 ¹
	Mínimo	1 ¹¹	1 ²	0.5 ³	X	X	X	1 ²	1 ⁵	X	0 ¹	1 ²
Distancia al nivel freático (m)	Mínimo	1.5 ¹	3 ²	3 ⁸	1.3 ⁷	1.8 ³	1 ³	1.5 ¹	1.3 ⁷	1 ⁴	1.2 ⁷	3 ¹
Tasa de Infiltración del suelo (mm/h)	Mínimo	13 ³	7 ⁷	13 ³	X	7 ¹⁰	7 ¹⁰	13 ⁷	X	13 ⁷	13 ⁷	7 ²
Distancia a cimientos (m)	Mínimo	4 ⁹	6 ¹²	6 ¹²	6 ¹²	6 ¹²	2 ¹³	1.5 ⁶	6 ¹²	6 ¹²	6 ¹²	6 ²

Anexo N°9. Restricciones presentadas para 11 de 12 tipologías propuestas con respecto a: Pendiente del terreno, distancia al nivel freático, tasa de infiltración y distancia a cimientos. Producto 2. Fuente: CIIA, 2015.

TIPOLOGÍA		EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE ESCORRENTÍA
DRENAJES FILTRANTES		A
ALCORQUES INUNDABLES		M
CUNETAS VERDES	SD	M
	CD	A
ZONAS DE BIORETENCIÓN	SD	M
	CD	M
PAVIMENTOS POROSOS		M
ZANJAS DE INFILTRACIÓN		M
GRASS BUFFER		M
HUMEDALES ARTIFICIALES		B ¹
PONDAJES HÚMEDOS		M ²
CUENCAS DE INFILTRACIÓN		A ¹
TANQUES DE ALMACENAMIENTO		B ³

Anexo N°10. Comparación cualitativa entre eficiencias de remoción de escorrentía para las diferentes tipologías. Producto 2. Fuente: CIIA, 2015.

Tipologías	Áreas potenciales						
	Tanques de almacenamiento	Zonas de bio-retención	Alcorques inundables	Cunetas verdes	Zanjas de infiltración	Cuenca seca de drenaje extendido	Pavimentos permeables
Parques		x		x	x	x	x
Plazas	x	x	x				x
Andenes	x	x	x				x
Vías (flujo vehicular bajo)	x				x		
Zonas comerciales	x	x	x				
Zonas industriales	x						
Zonas institucionales	x	x	x				
Separadores viales	x	x	x	x	x		x
Corredores verdes		x		x	x		x
Jardines domiciliarios	x	x					x
Parqueaderos	x	x	x		x		x

Anexo N°11. Preselección de tipologías de SUDS de acuerdo con la selección de áreas potenciales. Producto 3. Fuente: CIIA, 2015.

Contaminante / Tipología	Nutrientes	Metales	Patógenos	Sedimentos	Aceites y grasas	Basura y escombros
Cunetas verdes	M ^{1,2,3,4}	B ²	B ¹	M ^{1,2,3,4}	M ¹	M ¹
Tanques de almacenamiento	Diseñados específicamente para reducción del volumen de escorrentía y retención, no para remoción de contaminantes. ¹					
Zonas de bio-retención	M ¹	B ^{2,4}	M ²	M ²	A ¹	A ¹
Alcorques inundables	M ⁴	B ^{2,4}	M ²	M ²	A ¹	A ¹
Cuenca seca de drenaje	B ^{2,3,4}	M ¹	A ¹	M ¹	M ¹	A ¹
Zanjas de infiltración	M ^{3,4}	A ¹	A ¹	A ¹	M ¹	A ¹
Pavimentos permeables	B ^{2,4}	M ¹	M ¹	A ¹	A ¹	M

A: Alta: 3 M: Media: 2 B: Baja: 1

Anexo N°12. Calificación de tipologías según eficiencia de remoción de contaminantes. Producto 3. Fuente: CIIA, 2015.

Tipología / Criterio de volumen	Reducción volumen	Reducción descarga máxima
Cunetas verdes	B	B
Tanques de almacenamiento	M	M
Zonas de bio-retención	M	B
Alcorques inundables	B	B
Cuenca seca de drenaje	B	M
Zanjas de infiltración	A	A
Pavimentos permeables	A	M

A: Alta: 3 M: Media: 2 B: Baja: 1

Anexo N°13. Calificación tipologías según eficiencia de reducción de volúmenes de escorrentía. Producto 3. Fuente: CIIA, 2015.

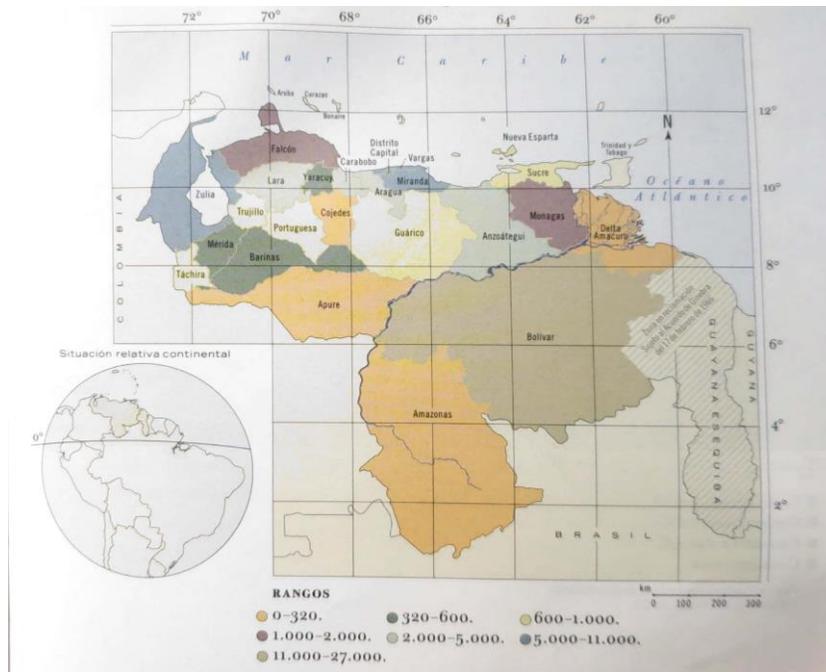
Tipología	Cunetas verdes	Tanques de almacenamiento	Zonas de bio-retención	Alcorques inundables	Cuenca seca de drenaje	Zanjas de infiltración	Pavimentos permeables
Amenidad	M	N	A	M	A	N	N

A: Alta: 3 M: Media: 2 N: Nula: 0

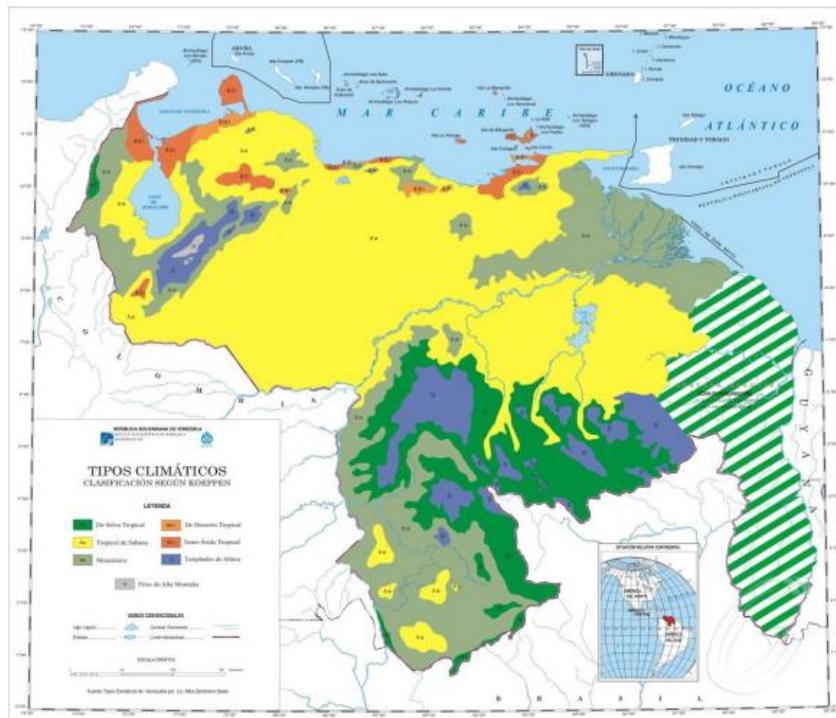
Anexo N°14. Calificación de tipologías según contribución a la amenidad. Fuente: CIIA, 2015.



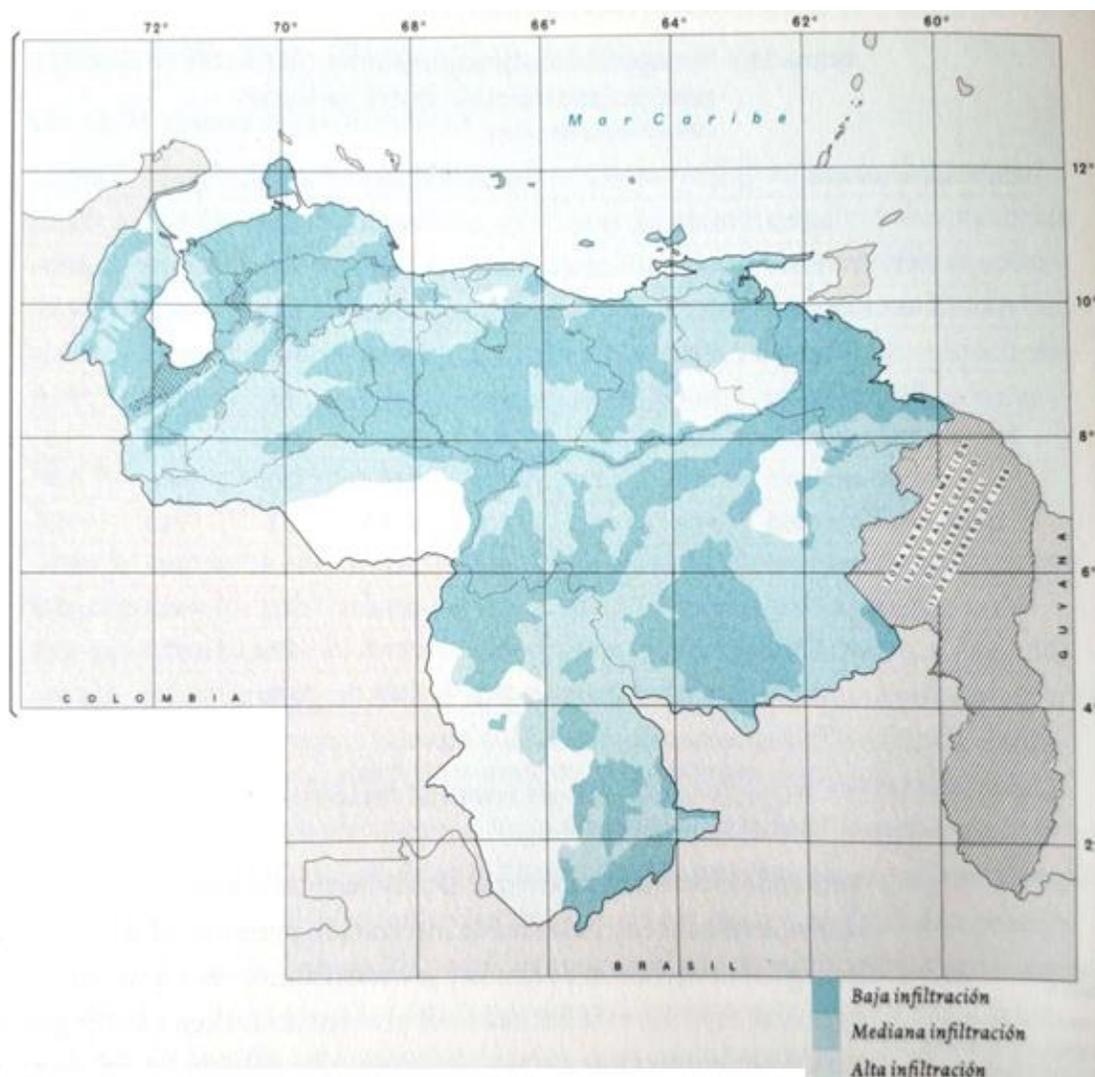
Anexo N°15. Áreas inundables de Venezuela. Fuente: Consalvi et al., 2008



Anexo N°16. Consumo de energía eléctrica por entidad federal (Gwh) en el 2003. Fuente: Consalvi et al., 2008



Anexo N°17. Mapa de tipos climáticos de Venezuela. Fuente: Bausson, 2008.



Anexo N° 18. *Velocidad de infiltración de los suelos en Venezuela.* Fuente: Buroz et al., 2016

Serial	Lugar	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año	Observaciones
2264	Acarigua	6	15	25	106	193	238	218	197	162	177	111	57	1485	-
1773	Barcelona	7	3	2	8	48	105	119	121	84	59	44	24	624	-
3147	Barinas	10	8	23	126	213	202	212	176	173	149	94	14	1400	-
3127	Barinitas	30	27	83	241	267	329	282	296	252	307	188	71	2373	-
1282	Barquisimeto	9	8	14	65	75	78	77	53	39	49	48	25	540	-
3400	Biológica Llanos	2	4	7	68	178	228	232	245	155	131	65	10	1325	-
1060	Cabimas	5	5	6	28	128	54	51	80	73	114	48	15	607	51-70
3494	Calabozo	1	4	9	69	171	191	233	219	183	129	85	13	1307	-
2701	Campo Mata	16	14	9	38	62	146	144	179	95	109	54	29	895	-
5920	Canaima	27	31	27	72	258	413	510	478	366	194	165	60	2601	-
0544	Caracas L.C.	16	13	12	59	80	139	121	124	114	123	73	42	916	-
0531	Caracas O.C.	21	22	12	38	89	119	118	111	106	117	76	41	870	-
1717	Cariaco	53	22	26	23	55	90	137	145	138	102	107	59	957	51-70
1187	Carora	14	14	31	45	66	25	22	44	72	125	110	33	601	-
2562	Carrizal	4	4	9	33	138	181	167	164	112	104	55	14	985	51-70
3882	Ciudad Bolívar	22	13	9	27	102	165	183	160	96	97	62	41	977	-
4903	Ciudad Piar	66	53	50	75	172	266	278	317	183	125	73	100	1758	-
8092	Colón	68	84	102	177	121	79	91	98	158	206	179	142	1305	72-90
1435	Colonia Tovar	28	24	20	84	122	134	130	147	151	154	111	47	1132	-
2277	Colonia Turén	5	5	7	58	195	294	239	233	166	117	70	33	1422	51-70
0232	Coro	14	16	9	18	26	26	35	24	32	53	57	54	364	-
1741	Cumaná	4	6	1	8	29	74	80	103	76	72	75	17	545	-
1278	El Cují	3	3	7	80	75	103	97	63	36	42	64	28	601	51-70
3715	El Tigre	10	7	9	40	80	167	193	177	134	114	60	33	1024	-
1169	El Venado	36	21	37	121	166	145	134	157	185	154	121	67	1344	-
8051	El Vigía	136	125	123	191	171	126	85	109	101	182	258	201	1808	51-70
2299	Guanare	5	25	23	343	108	155	162	300	118	186	165	25	1615	-
-	Guanota	78	87	57	67	79	158	143	159	116	114	105	102	1265	51-70
4172	Guasdualito	8	18	44	141	232	281	286	227	188	187	105	42	1759	-
1928	Güiria	33	20	18	18	62	119	126	128	132	116	97	72	941	-
4970	Guri	60	38	19	52	145	220	197	181	107	96	90	92	1297	-
6933	Kavanayén	60	56	86	186	296	356	319	351	278	245	205	132	2570	-
3176	La Aguada	53	80	118	219	208	127	127	150	185	195	139	58	1639	82-91
1141	La Cañada	2	1	9	63	74	82	40	67	115	139	43	10	645	79-90
-	La Concepción	13	5	8	41	86	76	23	52	77	127	83	21	612	51-60
2013	La Frontalia	80	105	182	416	484	404	429	417	525	567	452	186	4247	-
3177	La Montaña	46	75	87	197	219	136	105	177	195	238	151	73	1699	82-91
1509	La Orchila	32	11	8	6	17	10	30	26	13	29	50	39	271	59-70
3175	Loma Redonda	23	67	61	105	146	128	160	151	149	143	96	40	1269	82-91
1092	Machiques	37	31	46	149	194	195	156	150	178	201	142	48	1527	51-70
0503	Maiquetía	28	17	22	29	36	53	57	50	34	56	54	54	510	-
9308	Mamo	42	9	24	16	42	49	61	55	30	38	47	58	471	-
1015	Maracaibo	5	3	6	52	67	55	26	60	104	114	71	17	580	-
0466	Maracay	4	4	7	45	106	133	129	172	135	99	52	15	901	-
2827	Maturín	58	33	24	37	100	208	215	177	131	107	135	111	1336	-
2117	Mene Grande	28	29	47	120	153	132	102	138	167	178	147	86	1327	-

Anexo N°19. Datos de precipitación mensual en mm. Precipitación media histórica para estaciones seleccionadas. Fuente: Consalvi et.al, 2008

Serial	Lugar	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agg	Sep	Oct	Nov	Dic	Año	observaciones
3047	Mérida	40	48	63	177	236	164	119	152	229	283	195	79	1785	-
1340	Morón	110	53	48	96	117	86	129	131	92	96	142	107	1207	51-70
3122	Mucuchíes	4	13	26	83	91	86	81	82	80	69	41	13	669	74-94
4712	Musinacio	8	11	15	77	159	279	280	250	205	116	77	30	1507	-
2513	P. Tamanaco	8	5	5	24	85	159	169	161	133	98	47	21	915	-
2912	Pedernales	103	83	65	87	170	272	210	230	225	188	147	152	1932	-
-	Petaquire	62	120	31	76	57	77	91	55	94	95	104	54	916	-
3112	Pico El Águila	9	14	28	82	104	126	117	103	90	85	50	18	826	-
3174	Pico Espejo	13	24	41	67	94	73	56	69	80	64	40	42	663	83-91
0871	Porlamar	37	29	8	13	12	35	46	62	34	34	64	55	429	76-90
1806	Porlamar Granja	83	82	47	10	3	25	22	30	20	39	69	118	558	51-54
1740	Punta Piedras	30	16	12	10	1	18	35	45	26	28	51	46	318	51-70
6424	Puerto Ayacucho	31	36	74	163	311	408	398	298	198	183	127	42	2269	-
1328	Puerto Cabello	64	17	20	36	38	47	52	42	31	43	99	81	570	63-70
1751	Puerto La Cruz	9	4	4	7	40	94	108	111	71	53	29	22	552	-
5484	Puerto Páez	11	22	32	112	229	353	377	287	197	154	87	25	1886	-
2204	Quibor	14	15	9	49	72	50	32	39	45	70	61	21	477	51-70
4022	San Antonio del Táchira	35	37	47	108	81	35	26	26	55	120	112	71	753	-
2311	San Carlos de Cojedes	7	9	20	121	203	255	261	228	189	144	98	51	1586	-
9401	San Carlos de Río Negro	213	186	252	303	385	397	361	317	258	243	314	220	3449	-
2311	San Carlos UNE	7	9	20	121	203	255	261	228	189	144	101	65	1603	-
4404	San Fernando de Apure	1	4	6	72	167	243	276	255	173	99	44	10	1350	-
9405	San Fernando de Atabapo	85	93	127	235	394	474	482	339	290	202	178	134	3033	-
7921	San Ignacio Yuruani	58	53	73	137	251	283	246	222	161	175	128	106	1893	-
2417	San Juan de los Morros	10	5	10	67	146	200	184	184	168	136	68	21	1199	-
1831	San Pedro de Coche	23	9	10	6	8	19	20	49	13	19	41	43	260	53-70
1007	San Rafael del Moján	13	1	2	22	32	36	13	56	84	172	121	12	564	54-70
1780	Sabana Neverí	66	66	41	97	174	201	245	283	224	231	172	142	1942	-
2099	Santa Bárbara	74	56	20	130	149	126	121	90	122	135	146	177	1346	-
7947	Santa Elena de Uairén	68	57	87	165	214	254	229	186	113	122	114	85	1694	-
4099	Santo Domingo	46	56	58	137	374	378	331	363	308	372	245	111	2779	83-90
1661	Tacarigua laguna	57	21	13	33	72	96	100	114	97	148	179	165	1035	52-70
9402	Tama-Tama	173	215	186	257	349	510	337	447	285	337	148	155	3399	-
3901	Temblador	51	26	20	40	98	170	149	143	120	60	108	118	1103	-
3506	Toro Negro	2	2	6	40	120	210	245	283	184	125	56	7	1280	-
2914	Tucupita	86	37	38	62	122	199	218	162	85	82	107	110	1308	-
4974	Tumeremo	239	60	42	160	78	206	172	118	133	160	54	124	1546	-
6931	Urimán	70	66	86	216	444	663	669	564	437	326	265	178	3984	-
0461	Valencia	2	2	8	59	115	190	125	148	261	78	66	3	1057	-
7164	Valera	35	48	76	85	113	89	104	131	104	189	89	51	1114	84-90
2589	Valle de la Pascua	9	4	7	26	90	184	163	162	115	88	43	17	908	-
2414	Vaquerito	3	3	3	42	94	161	216	184	117	80	30	9	942	-
7906	Wonken	94	89	127	252	351	445	422	425	292	256	250	173	5176	-
2622	Zoata	6	8	10	30	95	160	194	185	124	112	53	21	998	-

Anexo N° 20. Datos de precipitación mensual en mm. Precipitación media histórica para estaciones seleccionadas. Fuente: Consalvi et al., 20

