



018530 - SWITCH

Sustainable Water Management in the City of the Future

Integrated Project
Global Change and Ecosystems

Selección de Tecnología para la Recolección y Transporte de Aguas Lluvias y Aguas Residuales en Áreas Urbanas

Due date of deliverable: January, 2011
Actual submission date: January, 2011

Start date of project: 1 February 2006

Duration: 60 months

Lead partner: UNIVALLE

Revision: final

Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006)		
Dissemination Level		
PU	Public	x
PP	Restricted to other programme participants (including the Commission Services)	
RE	Restricted to a group specified by the consortium (including the Commission Services)	
CO	Confidential, only for members of the consortium (including the Commission Services)	

Selección de Tecnología para la Recolección y Transporte de Aguas Lluvias y Aguas Residuales en Áreas Urbanas

**Por:
Faber Montaña Duque**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA SANITARIA
SANTIAGO DE CALI
2010**



Selección de Tecnología para la Recolección y Transporte de Aguas Lluvias y Aguas Residuales en Áreas Urbanas

Por:
Faber Montaña Duque

Trabajo de grado presentado como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero Sanitario

Director:
Alberto Galvis Castaño, M.Sc.
Instituto Cinara - Universidad del Valle

Asesor:
Luis Hernando Villaquirán, Ing.
Empresas Municipales de Cali - EMCALI -

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA SANITARIA
SANTIAGO DE CALI
2010**

Tabla de Contenido

Abreviaturas.....	vii
Resumen.....	ix
1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	2
3. Objetivos	3
3.1 Objetivo General.....	3
3.2 Objetivos Específicos	3
4. Marco Conceptual.....	4
4.1 Teoría General de Sistemas	4
4.2 Sostenibilidad.....	4
4.3 Producción Más Limpia.....	5
4.4 Tecnología	5
4.5 Gestión Integrada del Recurso Hídrico.....	6
4.6 Ciclo Urbano del Agua	6
5. Revisión de Literatura.....	8
5.1 Aspectos Históricos	8
5.2 Modelos de selección.....	10
6. Metodología	12
6.1 Identificación de Factores y Criterios de Selección.....	12
6.2 Construcción del Modelo Conceptual de Selección de Tecnología	12
6.3 Aplicación del Modelo Conceptual al Estudio de Caso	13
7. Resultados.....	14
7.1 Factores y Criterios de Selección.....	14
7.2 Modelo Conceptual de Selección de Tecnología.....	21
7.2.1 Bloque 1. Prevención de la Contaminación.....	21
7.2.2 Bloque 2. Infiltración y Almacenamiento de la Escorrentía.....	23
7.2.3 Bloque 3. Drenaje Superficial.....	26
7.2.4 Bloque 4. Drenaje Combinado vs. Drenaje Separado	27
7.2.5 Bloque 5. Drenaje de Aguas Residuales	32
7.2.6 Diagrama del Modelo Conceptual	33
7.3 Estudio de Caso: Plan Parcial Las Vegas	38

8. Conclusiones	41
9. Recomendaciones	42
10. Referencias.....	43

Abreviaturas

ASAS	alcantarillado sin arrastre de sólidos
BMPs	best management practices
DSP	descargas del sistema pluvial
EMCALI	Empresas Municipales de Cali
GIRH	gestión integrada del recurso hídrico
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
O&M	operación y mantenimiento
PML	producción más limpia
PTAR	planta de tratamiento de aguas residuales
RSC	reboses del sistema combinado
SUDS	sistemas urbanos de drenaje sostenible
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
WSM	Weighted Sum Model

Resumen

El desarrollo de áreas urbanas implica la provisión de sistemas de drenaje para la evacuación de aguas de escorrentía y aguas residuales. Aunque los alcantarillados combinado y separado han sido las tecnologías utilizadas tradicionalmente para tal fin, existen otras opciones que podrían ser implementadas de acuerdo a las condiciones locales. Las diferentes características de cada contexto, las múltiples opciones tecnológicas para el drenaje urbano y los problemas relacionados con conexiones erradas, reboses del sistema combinado y descargas del primer lavado al cuerpo receptor, dificultan la selección de tecnologías sostenibles para cada caso. Con el propósito de ayudar en la toma de esta decisión, se desarrolló un modelo conceptual de selección de tecnología para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales en ambientes urbanos, con énfasis en aspectos tecnológicos. El modelo considera dentro de las alternativas de selección cinco opciones de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), el drenaje superficial, el alcantarillado pluvial, el alcantarillado combinado, el alcantarillado sin arrastre de sólidos, el alcantarillado simplificado y el alcantarillado sanitario convencional. El modelo fue aplicado a un estudio de caso, donde se encontró que la opción más adecuada es implementar dos depósitos de detención junto con un alcantarillado combinado.

Palabras clave: Drenaje urbano; selección de tecnología; sistemas de alcantarillado; sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)

1. Introducción

El desarrollo de áreas urbanas implica la provisión de sistemas de drenaje para la evacuación de aguas de escorrentía y aguas residuales. Aunque los sistemas de alcantarillado combinado y separado han sido las tecnologías comúnmente utilizadas para tal fin, opciones como el alcantarillado sin arrastre de sólidos, el alcantarillado simplificado, y los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), también se encuentran dentro de la oferta tecnológica y podrían ser implementadas de acuerdo a las condiciones del contexto en estudio.

En el proceso de selección de tecnología, las características físicas, ambientales, socio-culturales, técnicas, económicas y urbanísticas propias de cada contexto, frente a las múltiples opciones tecnológicas para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales en ambientes urbanos, dificultan la selección de una alternativa en búsqueda de la sostenibilidad de estos sistemas. La decisión se complica aún más si se tienen en cuenta los problemas relacionados con conexiones erradas, descargas de estructuras de separación y descargas del primer lavado al cuerpo receptor; problemas que actualmente presentan los sistemas de drenaje urbano y por ende, inciden en la selección.

Aunque se trata de una decisión que a diario enfrentan empresas prestadoras del servicio de alcantarillado y firmas consultoras encargadas de la ejecución de proyectos relacionados con la planificación, diseño y construcción de estos sistemas, la selección de tecnología está sujeta, muchas veces, al criterio de los profesionales participantes en estos proyectos o a normas técnicas que definen el tipo de tecnología a implementar.

Los elevados costos que se requieren para la construcción de sistemas de recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales en ambientes urbanos y la dificultad presente al momento de seleccionar tecnología, hacen que la implementación de tecnologías sostenibles represente un gran reto para las administraciones municipales y empresas prestadoras del servicio de alcantarillado, pues tendrán que utilizar eficientemente sus recursos para que las inversiones generen el impacto esperado en las comunidades y el ambiente.

Para facilitar el proceso de toma decisiones, este trabajo de investigación tiene por objeto identificar los factores y criterios que inciden en la selección de tecnologías para el drenaje de aguas lluvias y aguas residuales con potencial aplicación en localidades urbanas de Colombia, para luego relacionarlos en un modelo conceptual de selección con énfasis en aspectos tecnológicos que permita encontrar alternativas sostenibles de acuerdo al contexto de aplicación. Este trabajo está enmarcado dentro del proyecto SWITCH “Sustainable Water Improves Tomorrow’s Cities’ Health” (<http://switchurbanwater.lboro.ac.uk>), el cual se orienta al desarrollo efectivo y sostenible del manejo del agua en las zonas urbanas. En el proyecto SWITCH participan 34 instituciones de diferentes países, siendo el Instituto Cinara de la Universidad del Valle una de ellas.

2. Planteamiento del Problema

La mayoría de regiones del mundo presentan un continuo crecimiento de la población urbana. En América Latina y el Caribe, el porcentaje de población urbana ha pasado del 61% en 1975 al 78% en 2007 y, según estimaciones de Naciones Unidas, será del 84% en el año 2025 (United Nations, 2008). Este crecimiento implica el desarrollo de nuevas áreas urbanas que deberán ser provistas de sistemas de drenaje, para lo cual en ciudades de Europa, Estados Unidos y América Latina se utilizan tradicionalmente los alcantarillados combinado y separado (Metcalf & Eddy, 1997; Marsalek *et al.*, 2006; WSP, 2007).

Aunque el interrogante sobre cuál de los dos sistemas es mejor ha sido discutido a lo largo de la historia sin llegar a una respuesta general, desde finales del siglo XX la tendencia a nivel mundial es implementar sistemas separados (De Toffol *et al.*, 2007). La no ocurrencia de reboses del sistema combinado (RSC) y una mayor facilidad para optimizar plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), han justificado esta decisión. Sin embargo, estudios han demostrado que el sistema separado no siempre es la mejor opción y recomiendan evaluar las condiciones locales previo a la selección de una tecnología (Carleton, 1990; Giraldo, 2000; Brombach *et al.*, 2005; Stanko, 2009).

El proceso de selección se complica aún más si se tiene en cuenta que los alcantarillados combinado y separado no son las únicas alternativas dentro de la oferta tecnológica disponible. Tecnologías como el alcantarillado sin arrastre de sólidos (ASAS) y el alcantarillado simplificado, son opciones para el drenaje de aguas residuales y se reportan aplicaciones en varios países de América Latina (WSP, 2004). En cuanto al drenaje de aguas lluvias, se vienen aplicando los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), tecnologías que buscan reproducir de la manera más fiel posible, el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o actuación humana (Woods-Ballard *et al.*, 2007). Cada una de estas opciones tiene ventajas y desventajas que las hacen aplicables a un contexto urbano, por lo cual no debe descartarse a priori el uso de ninguno de estos sistemas.

Además de evaluar las condiciones locales y la oferta tecnológica, la selección de tecnologías de recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales, debe considerar la interacción entre el alcantarillado, la PTAR y el cuerpo receptor. Aspectos como la descarga directa de la carga contaminante del primer lavado (*first flush*) al cuerpo receptor, la dilución del agua residual que se conduce a la PTAR, el vertimiento de RSC y las conexiones erradas en el sistema separado, son problemas que se evidencian en los actuales sistemas de drenaje urbano (Marsalek *et al.*, 2006), pero a la vez representan una gran oportunidad para prevenir o minimizar los impactos potenciales de estos sistemas si son considerados desde la etapa de selección de tecnología.

Las diferentes características físicas, urbanísticas, sociales, económicas y ambientales que varían de un contexto a otro, la oferta tecnológica disponible para el drenaje de aguas lluvias y aguas residuales en áreas urbanas y la interacción entre el alcantarillado, la PTAR y el cuerpo receptor señalada anteriormente, dificultan el proceso de selección de tecnología ante la falta de herramientas metodológicas que permitan encontrar soluciones sostenibles para cada caso en particular.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Contribuir a la sostenibilidad de los sistemas de recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales en áreas urbanas, mediante la construcción de un modelo conceptual de selección de tecnología con énfasis en aspectos tecnológicos.

3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los factores y criterios tecnológicos que influyen en la selección de tecnologías de recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales en áreas urbanas.
- Construir un modelo conceptual de selección de tecnología para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales en áreas urbanas, con énfasis en aspectos tecnológicos.
- Aplicar el modelo conceptual a un estudio de caso localizado en el valle geográfico del río Cauca.

4. Marco Conceptual

4.1 Teoría General de Sistemas

La teoría general de sistemas es una ciencia general de la “totalidad”. Su tema es la formulación de principios válidos para “sistemas” en general, sea cual fuere la naturaleza de sus elementos, componentes y las relaciones o fuerzas reinantes entre ellos (Bertalanffy, 2001).

El enfoque de resolver problemas analizando unidades elementales por separado es insuficiente al enfrentar problemas de totalidad, interacción dinámica y organización, o aquellas situaciones en las que intervienen varias disciplinas. En este sentido, es necesario estudiar no sólo partes y procesos aislados, sino también resolver problemas resultantes de la interacción dinámica de partes y que hacen diferente el comportamiento de estas cuando se estudian aisladas o dentro del todo.

4.2 Sostenibilidad

El concepto de sostenibilidad está definido por Restrepo (2000) como la capacidad de un sistema de desempeñar sus funciones a un nivel al menos aceptable y brindar los beneficios esperados durante toda su vida proyectada, utilizando el mínimo posible de recursos, incluso los ambientales. De esta manera, la sostenibilidad de un proyecto de agua y saneamiento, más que una meta por alcanzar, es un proceso dinámico que se construye día a día con la participación de todos los actores involucrados; cada uno desempeñando su función para que el proyecto se mantenga en el tiempo.

En la búsqueda de la sostenibilidad de los proyectos de agua y saneamiento el Instituto Cinara ha identificado tres dimensiones básicas: la comunidad, el entorno natural y construido y la tecnología. Dimensiones que se ubican en un contexto político-jurídico e institucional específico (Figura 4.1).

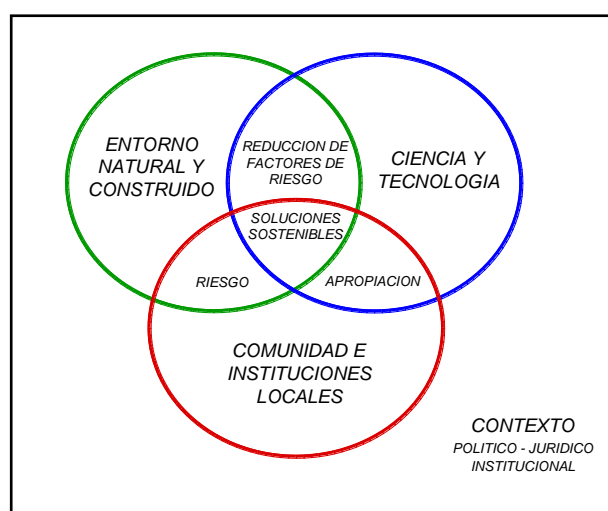


Figura 4.1. Marco conceptual que ilustra la búsqueda de soluciones sostenibles en programas de desarrollo en agua y saneamiento (Galvis *et al.*, 1999)

El planteamiento de la Figura 4.1 sugiere que para seleccionar tecnología con criterios de sostenibilidad, no se mira solamente la relación costo beneficio de cada alternativa, sino también la interacción de las tres dimensiones consideradas anteriormente (Galvis *et al.*, 1999). Las tecnologías que logren quedar en el intercepto de las tres dimensiones, son objeto de análisis posteriores para la toma de decisión final.

4.3 Producción Más Limpia

En el campo del desarrollo sostenible, la producción más limpia (PML) es un conjunto de tácticas organizadas sistemáticamente que se aplican a las actividades de producción para mejorar la protección del medio ambiente y reducir los riesgos para los organismos vivos. Las tácticas incluyen la minimización en el uso de recursos, eco-eficiencia y la reducción en la fuente (Glavič y Lukman, 2007).

La PML que inicialmente fue planteada para el sector productivo, es un concepto que obedece a un proceso dinámico y sistemático, el cual no se aplica una vez, sino de manera continua. En el contexto del manejo urbano del agua, los elementos esenciales de PML que se aplican son: seleccionar apropiadamente los materiales a utilizar, mejorar la eficiencia de los procesos, reuso y reciclaje de materiales, y minimizar el impacto en el tratamiento con la recuperación de recursos (Siebel y Gijzen, 2002).

4.4 Tecnología

En términos generales, la tecnología puede definirse como el conjunto de conocimientos, procedimientos e instrumentos que le permiten a un equipo humano realizar una tarea. Para Visscher (2005) la tecnología es el resultado de la relación entre herramientas y tareas, es un producto que puede ser un elemento tangible o intangible generado porque el equipo humano ha tenido una razón fundamental o una motivación para resolver una tarea o problema, o para alcanzar una meta establecida.

Toda tecnología consta no solamente del sistema físico sino también de elementos organizacionales para su manejo, requiere determinado tipo de personal para su administración, operación y mantenimiento, lo cual define las necesidades de capacitación para facilitar la asimilación de la tecnología por la comunidad y por lo tanto asegurar su correcta operación y mantenimiento (García y Galvis, 2000).

Transferencia de Tecnología

La expresión transferencia de tecnología hace referencia al proceso mediante el cual la tecnología se difunde desde un individuo u organización a otro. En el sector de agua y saneamiento como en otros sectores, este concepto se planteó inicialmente bajo un enfoque en el que los esfuerzos se concentraron básicamente en traspasar equipos y herramientas. La implantación de estas tecnologías sin reconocer y tener en cuenta las condiciones locales, dio como resultado, en muchos casos y en proyectos de alto coste, fracasos que todavía en la actualidad tienen consecuencias funestas para la población y el ambiente (Visscher, 2005).

La transferencia de tecnología no solo es la transferencia de la técnica y el conocimiento de cómo operarla, sino lo que es más importante, el conocimiento necesario para adaptarla y desarrollarla en un contexto específico identificando similitudes, los recursos, el conocimiento

disponible, la experiencia y las facilidades existentes en ese nuevo ámbito (Visscher *et al.*, 1999).

En general, se puede decir que la tecnología que se transfiere es la que se conoce plenamente y en la que se tiene confianza. No obstante, esto no implica necesariamente que se esté seleccionando la tecnología más adecuada y eficiente para la solución de un determinado problema, ni que ésta sea acorde con el contexto específico. El objetivo final de la transferencia de tecnología es solucionar un problema local, asegurando que las personas puedan disfrutar de la mejor manera posible de su derecho de acceso a un nivel de servicio aceptable, usado y sostenido sin mayores riesgos ambientales (Visscher *et al.*, 1999).

4.5 Gestión Integrada del Recurso Hídrico

En el fondo, la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) no es más que el proceso de implementación de los principios de Dublín. Se trata de que la gente (profesionales y usuarios) se comunique más entre sí; sobre la planificación conjunta de actividades a través de las fronteras sectoriales; sobre la planificación integrada en la cuenca pero también en el ámbito comunitario. Fundamentalmente, la GIRH se trata de información y comunicación; sobre buena planificación en base a la comprensión amplia y sólida de los deseos y necesidades de la gente; pero también de sus capacidades y de las restricciones que impone trabajar con un recurso finito (Moriarty *et al.*, 2006).

Los objetivos de la GIRH son:

- Promover el acceso más equitativo a los recursos hídricos y a los beneficios que se derivan del agua, como medio para enfrentar la pobreza.
- Asegurar que el agua escasa se use con eficacia y para el mayor beneficio de un gran número de gente.
- Lograr el aprovechamiento más sostenible del agua, incluyendo el uso para un mejor medio ambiente.

Aunque los principios de la GIRH pueden ser de gran uso para asegurar las buenas prácticas de un sistema de abastecimiento de agua doméstico (e.g. cuando se aplica a la gestión descentralizada), la GIRH es más obvia en aquellos puntos donde el agua para uso doméstico (y el vertido de aguas residuales) interactúa directamente con otros usos y con el medio ambiente.

4.6 Ciclo Urbano del Agua

El ciclo urbano del agua presenta la interrelación entre el ciclo del agua natural y la presencia de las actividades antropogénicas considerando los diversos usos que se le dan al recurso hídrico. El ciclo urbano del agua comienza con la extracción de agua, el almacenamiento, potabilización y distribución en red a las áreas residenciales, comerciales e industriales. El agua potable se usa para la ingesta, el aseo personal y del hogar, riego de parques y jardines. Parte de esta agua es utilizada para el transporte de residuos a través de una red de alcantarillado hasta una planta de tratamiento, los efluentes son vertidos posteriormente en fuentes receptoras como ríos, lagos y océanos. Las precipitaciones que caen en el área urbana se recogen por medio de un sistema de drenaje para su posterior vertimiento en fuentes receptoras. La Figura 4.2 presenta un diagrama del ciclo descrito (Marsalek *et al.*, 2006).

5. Revisión de Literatura

5.1 Aspectos Históricos

La revisión de los aspectos históricos de los sistemas de drenaje urbano, está basada en Burian *et al.* (1999), Burian y Edwards (2002) y Vélez (2007). De acuerdo a la literatura consultada, la historia se puede dividir en cuatro periodos:

Antiguos Sistemas de Drenaje Urbano. Relatos históricos sugieren que antiguas civilizaciones construyeron sistemas de drenaje para el desarrollo de sus ciudades. En la civilización Indo (3000 – 2000 AC), la ciudad de Mohenjo-Daro tuvo un sistema de drenaje combinado en el que los canales pluviales recibían la descarga de aguas residuales previamente decantadas; un sistema avanzado para la época. Los Persas consideraban el agua lluvia como un recurso sagrado que recolectaban en cisternas para uso potable y promulgaron leyes para no mezclar aguas residuales con aguas lluvias. En la civilización Minoica (2800 – 1100 AC), las ruinas de Cnosos revelan el uso de un elaborado sistema de drenaje combinado y de elementos que permitían recolectar el agua lluvia y mantenerla pura para su uso posterior. El Imperio Mesopotámico marcó grandes avances durante el segundo milenio AC. Las ruinas de las ciudades de Ur y Babilonia, revelan el uso de sistemas de drenaje separado construidos con técnicas avanzadas. El agua lluvia también era recolectada para uso doméstico y riego.

El Imperio Romano (800 AC – 300 DC) introdujo importantes avances tecnológicos al drenaje urbano. Ejemplos notables incluyen el desarrollo de sistemas para drenar carreteras y la construcción de canales y grandes colectores subterráneos (cloacas) que formaban complejas redes de alcantarillado. La *Cloaca Maxima* (510 AC) fue construida para drenar las partes más bajas de Roma hasta el río Tíber. El drenaje de la escorrentía superficial y la disposición del exceso de agua de los acueductos, eran los principales objetivos del sistema de alcantarillado. Sin embargo, también se utilizaban para evacuar aguas residuales y basuras lejos de las áreas residenciales. Otra práctica de los Romanos fue la recolección de aguas lluvias para su aprovechamiento en viviendas o para uso público.

Egipcios, Hititas, Griegos y Chinos también construyeron este tipo de infraestructura con objetivos similares a los de las civilizaciones descritas anteriormente. Aunque los antiguos sistemas de drenaje urbano cumplían con sus funciones, su planificación era limitada y su optimización se basaba en un proceso iterativo de ensayo y error.

Drenaje Urbano en la Era Post-Romana hasta los 1700s. Tras la caída del Imperio Romano, la población emigró de las ciudades dando lugar al abandono de los servicios municipales - alumbrado público, acueducto y alcantarillado. Además, durante la Edad Media (siglo V al XV) la sociedad fue indiferente frente a aspectos como la higiene y la limpieza, por lo que el drenaje urbano era visto como un servicio innecesario. Los anteriores factores hicieron que durante este periodo se presentaran pequeños avances tecnológicos en los sistemas de drenaje.

Durante los 1300s y 1400s, Londres, París y otras ciudades de Europa implementaron zanjias abiertas para drenar la escorrentía. Estas zanjias también fueron utilizadas para transportar basuras y aguas residuales, lo cual generó molestias para los residentes urbanos. Como remedio, los Europeos cubrieron las zanjias, convirtiéndolas en alcantarillados combinados;

una solución similar a la utilizada 1500 años atrás por los Romanos. Luego de la cobertura de alcantarillas, se presentaron problemas como la sedimentación de sólidos, malos olores y bloqueos, debido al uso de pendientes inadecuadas y a la falta de mantenimiento. A pesar de ello, las autoridades municipales continuaron cubriendo las alcantarillas en las principales ciudades Europeas, lo cual agravó el problema.

La insuficiente planificación, la falta de técnicas de ingeniería en el diseño y la inadecuada O&M de los alcantarillados construidos en Europa durante los 1600s y 1700s, dieron lugar al mal funcionamiento de los sistemas, con bloqueos y molestias frecuentes para la comunidad.

Sistemas de Drenaje Urbano Modernos: Años 1800s. A finales de los 1700s, fue mejorando la percepción pública sobre los sistemas de drenaje. La sociedad mantuvo una perspectiva de progreso que fue reflejada en el desarrollo tecnológico de los años 1800s. Burian *et al.* (1999) agrupan en seis categorías los avances tecnológicos logrados durante este periodo:

- *Mejoras en el diseño y construcción de alcantarillados.* A partir de 1820 se utilizaron nuevos materiales de construcción que permitieron mejorar la eficiencia hidráulica de los alcantarillados. A mediados de los 1800s, se instituyeron en la mayor parte de Europa, normas de velocidad mínima para prevenir la sedimentación de sólidos en colectores.
- *Diseño integral de sistemas de alcantarillado.* Hamburgo, en 1843, implementó el primer sistema de alcantarillado planificado integralmente. Londres, París, Chicago y Brooklyn hicieron lo propio durante los 1850s. Además, se utilizaron los primeros cálculos de ingeniería en el diseño de alcantarillados.
- *Alcantarillado combinado versus separado.* Se cuestiona el tipo de alcantarillado que debería ser construido: combinado o separado. A pesar de ello, se extiende en Europa el uso del alcantarillado combinado debido a la falta de precedentes con sistemas separados y a aspectos económicos. A finales de los 1800s, se construyen en Estados Unidos varios alcantarillados separados y se plantean algunos criterios para ayudar en la selección.
- *Identificación de enfermedades transmitidas por el agua.* Pasteur en 1857, Koch en 1876 y otros, dieron las bases científicas para demostrar el vínculo entre las descargas de aguas residuales, la contaminación de fuentes receptoras y los brotes de enfermedad. Luego en 1890, estudios cuestionaron la práctica de verter aguas residuales directamente en fuentes receptoras, especialmente en aquellas utilizadas como fuente para agua potable.
- *Tratamiento de aguas residuales.* Durante los 1800s, las descargas de los alcantarillados eran planificadas para ser diluidas por el cuerpo receptor. El tratamiento de aguas residuales se incorporó al drenaje urbano a finales de los 1800s en sistemas separados, y a principios de los 1900s en sistemas combinados.
- *Hidrología urbana.* En la segunda mitad de los 1800s, se sustituyeron las ecuaciones empíricas para dimensionar colectores, por métodos basados en hidráulica e hidrología. El método racional fue el más notable de ellos. En Estados Unidos se estudió la relación entre la intensidad de las lluvias con su duración, y se construyeron curvas de diseño.

Drenaje Urbano en la Actualidad: Años 1900s – 2000s. Este periodo se caracteriza por el gran avance técnico y por una mayor conciencia de los impactos ambientales. En la primera parte de los 1900s, los investigadores se enfocaron en estudiar el proceso precipitación-escurrimiento para optimizar el diseño de los sistemas de drenaje. El concepto de hidrograma unitario fue presentado en 1930, pero su aplicación fue limitada debido a la escasez de datos

fiabiles en las cuencas de trabajo. En razón a lo anterior, a mediados de los 1900s se desarrollaron en Estados Unidos métodos simplificados y efectivos para determinar el escurrimiento a partir de la precipitación.

Los avances en la tecnología informática a finales de los 1960s y principios de los 1970s, permitieron el desarrollo de modelos como el Storm Water Management Model (SWMM) en 1971 y el Storage, Treatment and Overflow Model (STORM) en 1973. La introducción de modelos informáticos en los 1970s, permitió a los ingenieros diseñar sistemas de drenaje utilizando simulación continua; método definido como el más satisfactorio, teniendo en cuenta que el método racional resultaba en el sobredimensionamiento de estructuras. Técnicas avanzadas de matemáticas y estadísticas desarrolladas en la época, también fueron aplicadas a la planificación y diseño de sistemas de drenaje. Dado que a finales de los 1980s, los métodos para planificar, diseñar, construir, mantener y rehabilitar sistemas de drenaje, tenían margen para mejoras e innovación; el trabajo durante los 1900s se centró en mejorar la tecnología y las ideas introducidas en las dos décadas anteriores.

En los 1960s, las descargas de los drenajes urbanos durante los periodos de lluvia, fueron identificadas como una de las principales causas del deterioro de la calidad de fuentes receptoras. Esta situación planteó la necesidad de que en los 1960s y 1970s, se considerara el control de la calidad de tales descargas en los planes de manejo de sistemas de drenaje urbano. A finales de los 1970s y principios de los 1980s, la mitigación de los impactos en las fuentes hídricas fue planificada considerando la cuenca como escala de trabajo, en lugar de planificar a partir de descargas puntuales o un tramo del río. Desde inicios de los años 1980s, los estudios se han concentrado en estudiar los impactos hidráulicos, bioquímicos, ecológicos, y químicos de las descargas de los sistemas de drenaje en las fuentes receptoras.

5.2 Modelos de selección

Red de Decisión para el Manejo del Agua Urbana. Veldkamp *et al.* (1997) plantearon un método para seleccionar técnicas de manejo de aguas lluvias en áreas residenciales. El método, denominado red de decisión, consta de seis pasos: definición del problema, tecnologías, procedimiento de selección, combinación, ranking por sostenibilidad, y costos. La red de decisión se debe aplicar de manera iterativa por un equipo experto para optimizar la decisión final.

El equipo experto debe considerar la posibilidad de implementar técnicas de infiltración, uso, retención, almacenamiento de aguas lluvias y sistemas de alcantarillado. Luego se descartan técnicas en función de las limitaciones del contexto y, las que resultan factibles, se combinan para formar escenarios. De acuerdo al método, el escenario más sostenible es aquel que maneje las aguas lluvias más cerca de la fuente y de una manera visible para la comunidad. Desde este punto de vista, el uso y la infiltración del agua lluvia es más sostenible que los sistemas de alcantarillado separado y combinado.

Matriz de Comparación entre Sistemas Combinados y Separados. En el estudio de alternativas de dotación de servicios públicos de acueducto y alcantarillado en la zona de expansión de la ciudad de Cali – Colombia, EMCALI e HIDRO-OCCIDENTE S.A. (2006)

aplicaron un método de decisión para seleccionar la mejor opción entre el alcantarillado combinado y el separado. El método se basa en la construcción de una matriz de comparación en la que se ponderan los criterios de decisión identificados previamente, y luego se calculan índices para seleccionar la mejor alternativa. La descripción detallada del método de decisión se encuentra en Canter (1998).

La matriz de comparación construida para el estudio mencionado, utiliza 45 criterios de decisión asociados a seis factores: ambiental; social; amenaza, vulnerabilidad y riesgo; técnico; económico; y tratamiento de aguas residuales. La ponderación de tales criterios fue realizada por profesionales de la firma ejecutora del estudio, encontrando que los criterios con mayor incidencia en la decisión, son: la cultura ciudadana; la capacidad de gestión y control de la autoridad ambiental; y la capacidad operativa del prestador del servicio.

Comparador Multi-Criterio (MCC) del DayWater Adaptive Decision Support System (ADSS)

El proyecto DayWater del 5° Programa Marco de la Unión Europea (www.daywater.org), desarrolló el Comparador Multi-Criterio (MCC) Adaptive Decision Support System (ADSS). El objetivo del MCC es ayudar en el proceso de toma de decisión para identificar BMPs (best management practices; también conocidos como SUDS) adecuados para el manejo de aguas lluvias en un determinado contexto.

El MCC, disponible en web (<http://daywater.in2p3.fr/EN/>), fue desarrollado a partir de la experiencia con BMPs implementados en diferentes países de Europa, dándole un carácter pan-Europeo a la decisión final. El MCC evalúa 15 BMPs individuales respecto a 16 indicadores pertenecientes a seis criterios: técnico; ambiental; O&M; social y beneficios comunitarios; económico; y legal y planificación urbana. Esta herramienta permite que el usuario pondere los indicadores y criterios, de acuerdo a las condiciones particulares del caso. La toma de decisión se realiza en dos etapas. Primero una preselección con base en el nivel freático, la tasa de infiltración y el área tributaria al BMP; y segundo, se aplica el método multicriterio Modelo de Suma Ponderada (Weighted Sum Model) para la decisión final.

Metodología para la selección de alternativas de sistemas de drenaje. Brito (2006) desarrolló una metodología para seleccionar alternativas de drenaje de aguas lluvias en áreas urbanas. La metodología utiliza seis criterios (físico, hidrológico, hidráulico, económico, ambiental y social), diez indicadores y el método multicriterio Programación Compromiso, para identificar la mejor alternativa de acuerdo al caso. Una característica importante de esta metodología, es que las alternativas son introducidas por el usuario y pueden estar constituidas por SUDS, sistemas de alcantarillado, o por una combinación SUDS-alcantarillado pluvial.

Modelo Experto DELTANOE. Barraud *et al.* (1999) desarrollaron el programa de computadora DELTANOE, para orientar a los encargados del manejo de aguas pluviales en el proceso de selección de BMPs. Con la entrada de algunos datos específicos del sitio, el programa puede generar una lista de posibles soluciones, o cuando se le suministra una solución, puede generar información sobre su viabilidad técnica y posibles escenarios de falla. Como beneficio adicional, DELTANOE también ofrece orientación sobre el diseño, construcción y mantenimiento de cada solución propuesta.

6. Metodología

6.1 Identificación de Factores y Criterios de Selección

Los factores y criterios de selección se identificaron en tres etapas. La primera etapa consistió en la revisión del estado del arte en tecnologías de drenaje urbano. En esta revisión se encontró la oferta tecnológica disponible y se identificaron características, principios de funcionamiento, ventajas y desventajas de cada opción tecnológica. Los criterios de selección mencionados por los autores consultados, fueron analizados conceptualmente para entender su incidencia en la selección de tecnología, y posteriormente clasificados de acuerdo a factores que representaban la naturaleza de cada criterio. En la segunda etapa se complementó el resultado de la etapa anterior con los factores y criterios identificados en la revisión de casos y experiencias, y aquellos utilizados en los métodos de selección de tecnología para el drenaje urbano. Luego, la tercera etapa consistió en la construcción del cuadro que clasifica en factores los criterios de selección identificados.

6.2 Construcción del Modelo Conceptual de Selección de Tecnología

La construcción del modelo se realizó en tres etapas: definición de bloques temáticos, desarrollo de la toma de decisión y esquematización.

Definición de bloques temáticos. Se realizó teniendo en cuenta los siguientes aspectos identificados durante la revisión de literatura: tendencias relacionadas con la selección de tecnología para el drenaje urbano, la oferta tecnológica disponible y la necesidad de reducir la carga contaminante descargada por el sistema de drenaje al cuerpo receptor. A partir de las tendencias relacionadas con la selección de tecnología y considerando las diferencias conceptuales, se definieron dos bloques temáticos: uno dirigido a la selección de SUDS y el otro a la selección entre el alcantarillado combinado y el alcantarillado pluvial. Por otra parte, con el objetivo de considerar dentro del proceso de selección opciones como el drenaje superficial de la escorrentía y los alcantarillados sin arrastre de sólidos y simplificado, se adicionaron a los dos bloques anteriores, un bloque orientado a determinar la factibilidad del drenaje superficial y otro para seleccionar el tipo de alcantarillado sanitario. Luego, para reducir la carga contaminante descargada por el sistema de drenaje al cuerpo receptor, se incluyó un quinto bloque temático orientado a la prevención de la contaminación.

Desarrollo de la toma de decisión. En esta etapa se desarrolló un algoritmo para seleccionar tecnología en los bloques temáticos definidos en la etapa anterior. El bloque dedicado a la prevención de la contaminación fue excluido de esta etapa, dado que el alcance de este trabajo no considera la selección de técnicas o tecnologías para este bloque. En los bloques dedicados a la selección de SUDS y a la selección entre el alcantarillado combinado y el alcantarillado pluvial, el método de toma de decisión utilizado fue el Modelo de Suma Ponderada (Weighted Sum Model - WSM) (Triantaphyllou, 2000). WSM es un método de toma de decisión multicriterio que selecciona la mejor alternativa entre varias opciones con base en un puntaje que representa el rendimiento global de la alternativa. Este puntaje se conoce como puntaje de suma ponderada y se calcula con la Ecuación 1.

$$P_{i WSM} = \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad (1)$$

Donde $P_{i\ WSM}$ es el puntaje de suma ponderada de la alternativa i , n es el número de criterios de decisión, a_{ij} es el rendimiento de la alternativa i en términos del criterio de decisión j y w_j es el peso del criterio j . El peso de cada criterio (w_j) representa su importancia relativa dentro de la toma de decisión y el rendimiento de la alternativa (a_{ij}) corresponde a un puntaje de calificación asignado cuando la alternativa i es evaluada respecto al criterio j . Al finalizar los cálculos, se selecciona la alternativa con el mayor puntaje $P_{i\ WSM}$ como la mejor opción.

El uso del WSM se justifica por tres razones. Primero, la selección de la mejor alternativa se realiza considerando simultáneamente múltiples criterios que representan diferentes dimensiones. Segundo, el ranking de las alternativas es directo y simple. Tercero, los criterios pueden ser ponderados para reflejar su importancia relativa dentro de un contexto particular. Los criterios utilizados en los WSM del modelo se definieron a partir de los criterios identificados en 7.1, y su ponderación fue realizada por expertos del área académica, del sector de servicios públicos y de empresas consultoras. La ponderación se realizó teniendo en cuenta las condiciones de las localidades urbanas ubicadas en el valle geográfico del río Cauca, en el Departamento del Valle del Cauca; zona correspondiente al ámbito de aplicación del modelo. El rendimiento de las alternativas respecto a cada criterio de selección fue calificado con base en la revisión de literatura y el juicio de expertos. El formato utilizado en la consulta a expertos se presenta en el Anexo 1.

En los bloques orientados a determinar la factibilidad del drenaje superficial y a la selección del tipo de alcantarillado sanitario, el método de toma de decisión utilizado fue el árbol de decisión (Lara *et al.*, 2004). Este método utiliza el valor de una característica o atributo para tomar una decisión, que en este caso es la selección de una tecnología. Los atributos utilizados en estos dos bloques fueron identificados a partir de la revisión de literatura.

Esquematisación. Para facilitar el manejo de información a través del proceso de selección de tecnología, en esta etapa se ensamblaron los bloques temáticos en un diagrama basado en el Diagrama de Bloques del Modelo Conceptual SELTAR (Galvis *et al.*, 2005). En el diagrama construido, el orden de los bloques temáticos se definió considerando los siguientes aspectos: (i) la prevención de la contaminación como punto de partida para seleccionar tecnologías de drenaje urbano; (ii) seleccionar tecnología primero para drenar la escorrentía y luego para drenar el agua residual; (iii) conseguir un control hidráulico y mejorar la calidad de la escorrentía, previo a su recolección y transporte; y (iv) los alcantarillados combinado y pluvial como opciones para casos en los que no sea posible drenar toda la escorrentía mediante SUDS y/o drenaje superficial. Definido el orden de los bloques dentro del diagrama, el ensamble se realizó teniendo en cuenta el propósito de cada bloque y su relación con el bloque siguiente.

6.3 Aplicación del Modelo Conceptual al Estudio de Caso

Teniendo en cuenta el ámbito de aplicación del modelo y la disponibilidad de información, se seleccionó el Plan Parcial Las Vegas (Cali - Colombia) como un caso de aplicación del modelo conceptual. Una vez definido el caso, se ejecutaron dos pasos: recopilación de información y selección. En la recopilación de información se consultaron fuentes secundarias en su mayoría, y algunas fuentes primarias para obtener los datos requeridos en cada uno de los bloques del modelo; y en el segundo paso, se utilizaron los datos anteriores, el diagrama del numeral 7.2.6 y el Anexo 2.

7. Resultados

7.1 Factores y Criterios de Selección

Conceptualmente, las tecnologías para el drenaje urbano se pueden clasificar en dos grupos. Por una parte se encuentran los sistemas de alcantarillado, cuyo objetivo es evacuar lo más rápido posible la escorrentía y el agua residual generada; y por otra parte se encuentran los SUDS, cuyo objetivo es minimizar la generación de escorrentía favoreciendo la infiltración y el almacenamiento. Dada la diferencia conceptual entre los dos grupos de tecnologías y que ambos están considerados dentro del modelo, los factores y criterios de selección identificados se presentan en los Cuadros 7.1 y 7.2.

Cuadro 7.1 Factores y criterios que inciden en la selección de tecnologías para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales en áreas urbanas

Factores	Criterios	Incidencia en la selección	Autor
Características del área de drenaje	Topografía	Los colectores de cada tecnología requieren de una pendiente específica para garantizar el comportamiento autolimpiante del flujo. En áreas planas, la instalación de colectores que requieren de pendientes mayores aumentan el volumen de excavación y las alturas de bombeo, lo cual se refleja en mayores costos de inversión y de O&M.	<i>a, e, f, g, i, k, o</i>
	Disponibilidad de pequeños cauces superficiales	Áreas de drenaje con esta característica favorecen la implementación del alcantarillado separado, puesto que la escorrentía puede ser descargada en los cauces disponibles mediante drenes de corta longitud y pequeño diámetro.	<i>a, c, e, k, n</i>
	Nivel freático	Áreas con nivel freático alto propician la infiltración de agua subterránea al alcantarillado sanitario, lo cual diluye el agua residual y aumenta el caudal de bombeo. Esta condición favorece la implementación de tecnologías cuyos colectores requieren pendientes menores para su autolimpieza, o aquellas que se instalan a menores profundidades.	<i>e, f</i>
	Riesgo de inundación	Áreas anegables deben ser atendidas mediante sistemas de drenaje separado dado que, ante la ocurrencia de una inundación, el impacto sanitario sería mayor si se implementan sistemas combinados.	<i>a, c, d, h, i, j, k, n</i>
	Necesidad de bombeo para evacuar aguas residuales	En áreas con tal condición se debe evitar la dilución del agua residual con aguas de escorrentía para no incrementar los costos de inversión y de O&M de estaciones de bombeo.	<i>a, c, d, g, h, i, j, k, n</i>
Climático	Variación estacional de las lluvias	En regiones áridas o semiáridas con pocas precipitaciones al año y también en regiones tropicales u otros con una precipitación estacional, la provisión del alcantarillado combinado puede generar malos olores debido a la putrefacción de sedimentos acumulados durante periodos secos.	<i>e, i, j, k</i>
	Intensidad de las lluvias	Áreas con lluvias de alta intensidad requieren colectores de gran diámetro para evacuar la escorrentía. En la medida que la tecnología seleccionada requiera de mayores pendientes para autolimpieza, se va a necesitar de una mayor excavación para instalar tales colectores, lo cual incrementa los costos de inversión.	<i>e, k</i>
Urbanístico	Espacio disponible para instalación de colectores	De acuerdo al tipo de tecnología, los colectores se instalan por las vías o aceras del desarrollo urbano. El ancho de estos espacios favorece o limita la aplicación de ciertas tecnologías.	<i>a, c, d, e, k</i>
	Área disponible para instalación de estructuras complementarias	Se refiere particularmente a la disponibilidad de área para la instalación del tanque interceptor del ASAS. La aplicación de esta tecnología es limitada en caso de no disponer de tales áreas.	<i>o</i>
	Uso del suelo	Aguas residuales con características diferentes a las del agua residual doméstica, limitan la aplicación de tecnologías como el ASAS y el alcantarillado simplificado. En zonas industriales, no es recomendable la implementación de alcantarillados combinados debido a la ocurrencia de RSC durante los periodos de lluvia.	<i>e, f, j, k, m, o</i>

Factores	Criterios	Incidencia en la selección	Autor
Urbanístico (Cont.)	Tipo de desarrollo urbanístico	Desarrollos urbanos sin posibilidad de ampliación o reforma de viviendas (e.g., viviendas de interés social, conjuntos cerrados y edificios), ayudan a mantener la densidad poblacional. Esta condición favorece la aplicación de ASAS y alcantarillados simplificados y facilita el control de conexiones erradas en alcantarillados separados.	<i>i, j, k</i>
	Densidad poblacional	En áreas urbanas densamente pobladas donde el volumen anual drenado de aguas residuales es mayor que el de aguas de escorrentía, es recomendable la provisión del alcantarillado combinado. Áreas con densidades entre 100 y 300 hab/ha favorecen la aplicación del ASAS.	<i>e, f, i, m, o</i>
Sociocultural	Aceptación comunitaria	Se refiere a la aceptación de una tecnología por parte de la comunidad.	<i>c, i, j</i>
	Cultura ciudadana	El conocimiento de la comunidad sobre el funcionamiento y uso del sistema de alcantarillado es fundamental para la sostenibilidad de la tecnología. Opciones como el alcantarillado separado, el alcantarillado simplificado y el ASAS, son más vulnerables a la falta de cultura ciudadana.	<i>j, k, l</i>
Cuerpo receptor	Impacto en la calidad del agua	Las descargas de los alcantarillados combinado y separado durante el periodo de lluvias (RSC y DSP respectivamente), generan un impacto en la calidad del agua del cuerpo receptor. Con base en el impacto de tales descargas y en la calidad del agua requerida para garantizar los usos de la fuente receptora, la decisión puede favorecer la implementación de una u otra tecnología.	<i>a, b, c, e, g, i, k, l, n</i>
	Impacto hidráulico	Se refiere al efecto erosivo de las descargas pluviales de cada alternativa (RSC y DSP) sobre el cuerpo receptor. La magnitud de este efecto depende de las condiciones biológicas y morfológicas del cuerpo receptor, por lo que una evaluación de cada caso es necesaria para favorecer la implementación de una u otra tecnología.	<i>b, p</i>
Tecnológico	Carga contaminante vertida durante el periodo de lluvias	Para una misma cuenca urbana, las descargas de los alcantarillados combinado y separado durante el periodo de lluvias difieren en términos de cantidad y calidad de agua. Con base en la carga contaminante vertida al cuerpo receptor, la selección puede favorecer a una de estas dos opciones.	<i>a, b, c, d, e, g, i, j, k, l, m, n, p</i>
	Dilución del agua residual a tratar	La dilución del agua residual incrementa el caudal a tratar y reduce la eficiencia de la PTAR, lo cual implica mayores costos de inversión y de O&M. Bajo esta consideración, la selección puede favorecer al sistema separado sobre el sistema combinado.	<i>a, b, c, d, e, g, j, k, l, m</i>
	Tratamiento de la fracción inicial de la escorrentía	La fracción inicial de la escorrentía suele estar asociada a una concentración pico de contaminantes. En los sistemas combinados esta fracción se conduce a la PTAR, mientras que en los sistemas separados se descarga directamente al cuerpo receptor.	<i>a, c, d, e, k, m</i>
	Posibilidad de conexiones erradas	En los sistemas separados se pueden presentar conexiones erradas entre las redes pluvial y sanitaria, generando inconvenientes en el alcantarillado, en la PTAR y en el cuerpo receptor. Para evitar tales inconvenientes, se requieren mayores esfuerzos en la construcción y mantenimiento de la doble conexión al sistema. Respecto a este criterio, el sistema combinado resulta mucho más simple debido a que requiere una sola conexión.	<i>a, b, c, d, e, f, i, l</i>

Factores	Criterios	Incidencia en la selección	Autor
Tecnológico (Cont.)	Requerimientos de limpieza de colectores	Durante el periodo de caudales mínimos se sedimentan sólidos al interior de colectores, siendo necesaria una limpieza regular. En el sistema combinado, esta situación es crítica debido a que el tránsito de caudales mínimos ocurre durante todo el periodo seco. En el ASAS, los colectores se mantienen libres de sólidos debido a los tanques interceptores.	<i>a, c, d, f, k</i>
	Generación de malos olores	La generación de olores desagradables puede llevar al rechazo de una tecnología por parte de la comunidad. Este aspecto es particularmente crítico en los sistemas combinados y en los ASAS debido a la descomposición de sedimentos en los primeros, y a la falta de aireación del flujo de aguas residuales en los segundos.	<i>e, f, j</i>
	Mejoramiento de la calidad del agua residual	Se refiere a la capacidad de la tecnología para mejorar la calidad del agua residual antes de su disposición final. En este sentido, el ASAS aventaja a las demás tecnologías ya que proporciona un tratamiento primario al agua residual recolectada.	<i>f, i, o</i>
	Flexibilidad hidráulica	Se refiere a la flexibilidad de la tecnología para recibir aportes de caudal no considerados en la etapa de diseño, sin afectar considerablemente su rendimiento hidráulico. El alcantarillado simplificado y el ASAS presentan una menor flexibilidad hidráulica comparados con los alcantarillados combinado y sanitario convencional.	<i>f, i</i>
	Reuso del agua residual	Si se tiene proyectado el uso del agua residual para riego agrícola, se debe incrementar el valor del agua residual como fertilizante. Bajo esta condición, el alcantarillado combinado no resulta viable pues diluye los nutrientes contenidos en el agua residual.	<i>m</i>
Institucional	Capacidad técnica y administrativa del prestador del servicio	Se refiere a las aptitudes técnicas y administrativas de la empresa prestadora del servicio para operar y mantener la tecnología de manera correcta, evitando sobrecostos y mitigando los impactos ambientales generados. Respecto a este criterio, los sistemas separados demandan mayores esfuerzos debido a la doble red de colectores.	<i>c, e, f, i, j, k, l</i>
	Capacidad de control urbanístico por parte de planeación municipal	Se refiere a la capacidad de planeación municipal para controlar asentamientos de desarrollo incompleto, reformas a viviendas existentes y nuevos desarrollos urbanos, para evitar conexiones erradas o ilícitas al sistema de alcantarillado. El sistema separado y las tecnologías con menor flexibilidad hidráulica, requieren de un mayor control urbanístico.	<i>i, j, k</i>
Costos	Costos de inversión	Los costos de inversión pueden limitar la selección de una tecnología. Estos costos incluyen: construcción, interventoría, diseño, ingeniería, estudios preliminares, gastos administrativos de la inversión inicial, gastos legales y gastos financieros.	<i>a, b, c, d, e, f, g, i, j, k, l, o</i>
	Costos de O&M	Los costos de O&M pueden limitar la selección de una tecnología. Estos costos incluyen: reposiciones, reparaciones, limpieza colectores y canales, mano de obra para O&M, disposición de sedimentos, inspecciones de la red y educación comunitaria.	<i>a, c, d, i, j, k, l, o</i>
	Costos administrativos	Los costos administrativos pueden limitar la selección de una tecnología. Estos costos incluyen: mantenimiento de equipos, personal administrativo, gastos generales y tasas retributivas.	<i>c, j, l</i>

a: URL-1; *b*: Meirlaen (2002); *c*: Butler y Davies (2004); *d*: Saldarriaga (2008); *e*: van Duijl (1992); *f*: U.S. EPA (2000); *g*: Arocha (1983); *h*: EMCALI (1999); *i*: Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia (2000); *j*: EMCALI e HIDRO-OCCIDENTE S.A. (2006); *k*: EMCALI (2000); *l*: Giraldo (2000); *m*: Latham (1878 en Giraldo, 2000); *n*: Fair *et al.* (1958 en Giraldo, 2000); *o*: Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia (1995); *p*: De Toffol *et al.* (2007).

Cuadro 7.2 Factores y criterios que inciden en la selección de sistemas urbanos de drenaje sostenible - SUDS

Factores	Criterios	Incidencia en la selección	Autor
Características del sitio	Nivel freático	Áreas con nivel freático alto, reducen la eficiencia de tratamiento del SUDS, ocasionando la contaminación del agua subterránea. e.g. en los depósitos de infiltración, se reduce la capacidad de adsorción del suelo y con ello la capacidad de retención de contaminantes. En el caso de los estanques de retención y humedales, se reduce la capacidad hidráulica del SUDS, afectando el tiempo de retención necesario para el tratamiento.	<i>a, b, e, i, j</i>
	Permeabilidad del suelo	La permeabilidad del suelo puede tener un impacto adverso o favorable en el rendimiento de los SUDS. e.g., suelos permeables favorecen la implementación de SUDS que utilizan la infiltración como principio de funcionamiento; pero dificultan la implementación de SUDS que necesitan mantener un estanque de agua para el tratamiento de la escorrentía.	<i>a, b, e, g</i>
	Disponibilidad de espacio	Se refiere al espacio disponible en el área de desarrollo para la implementación de SUDS. Dado que cada SUDS requiere de un espacio particular para su instalación, el espacio disponible puede limitar o favorecer la aplicación de determinados SUDS.	<i>b, d</i>
	Área tributaria	El área tributaria es la porción del área de la cuenca que drena la escorrentía hacia el SUDS durante un evento de lluvia. Aunque un grupo de SUDS puede ser implementado para atender el área total de una cuenca, existe un valor límite de área tributaria con el que se garantiza la operación efectiva de cada SUDS.	<i>a, b, d, f</i>
	Uso del suelo	La calidad de la escorrentía urbana varía de acuerdo al uso del suelo en el área de drenaje. Dado que cada SUDS obtiene su mejor rendimiento para cierta calidad de agua, el uso del suelo constituye un factor determinante en la selección de SUDS. En este trabajo solo se consideran áreas urbanas cuyo uso del suelo es de tipo residencial.	<i>b, d, g</i>
	Clima	El funcionamiento de los SUDS es afectado por el clima y características meteorológicas tales como: frecuencia, duración e intensidad de las lluvias y la evapotranspiración. El efecto del clima sobre el funcionamiento de los SUDS, depende de las características y del tipo de operación de cada alternativa (infiltración o retención).	<i>b, g, h</i>
Técnico	Control hidráulico	El control hidráulico se refiere al potencial del SUDS para controlar el caudal pico y el volumen de escorrentía para un determinado rango de periodos de retorno. Aunque cada SUDS tiene un potencial diferente, el control hidráulico de la escorrentía se puede realizar mediante la operación conjunta de varios SUDS.	<i>a, b, d</i>
	Remoción de contaminantes	Los SUDS se caracterizan por tener un potencial de mejoramiento de la calidad de la escorrentía. Cada alternativa tiene una eficiencia de remoción diferente para cada contaminante, y al igual que en el control hidráulico, varios SUDS pueden ser agrupados para alcanzar el nivel de remoción requerido.	<i>a, b, d</i>
	Adaptabilidad al crecimiento urbano	Se refiere a la adaptabilidad del SUDS para controlar y manejar picos de caudal adicionales generados por la expansión urbana. SUDS como estanques y depósitos tienen una mayor adaptabilidad al incremento de superficies impermeables en la cuenca.	<i>a, d, e</i>

Factores	Criterios	Incidencia en la selección	Autor
Técnico (Cont.)	Posibilidad de reuso del agua de escorrentía	El agua de escorrentía puede ser recolectada y reutilizada para riego de jardines, descarga de inodoros, procesos industriales o en sistemas contra incendios. Si se tiene proyectado el reuso de la escorrentía, SUDS de almacenamiento o retención (depósitos, estanques y humedales) son favorecidos en la selección antes que los SUDS de infiltración.	<i>b, c, i, j</i>
Ambiental	Impacto hidráulico en la fuente receptora	El impacto hidráulico generado por la descarga pluvial de un SUDS, depende de su control sobre las descargas pico y de las características del cuerpo receptor. De acuerdo a lo anterior, una evaluación de cada caso es necesaria para favorecer o descartar una u otra alternativa en el proceso de selección.	<i>a, g, j</i>
	Impacto en la calidad de la fuente receptora	Aunque los SUDS realizan un mejoramiento de la calidad de la escorrentía, sus efluentes pueden generar un impacto en la calidad del agua del cuerpo receptor. Con base en el impacto de tales efluentes y en la calidad del agua requerida para garantizar los usos de la fuente receptora, la decisión puede favorecer la implementación de uno u otro SUDS.	<i>a, c, j</i>
	Impacto ecológico en la fuente receptora	Se refiere al efecto potencial de las descargas del SUDS en la fauna acuática del cuerpo receptor. Estas descargas tienen un efecto diferente dependiendo del tipo de SUDS, y pueden alterar características del ecosistema tales como: cadena trófica, biodiversidad, diversidad genética, dispersión y migración, y desarrollo del ecosistema.	<i>a, d, f, h</i>
	Recarga de acuíferos	En áreas donde la recarga de acuíferos sea un objetivo, se ve favorecida la selección de tecnologías tales como: zanjas de infiltración, depósitos de infiltración y pavimentos porosos. Además de la recarga de acuíferos, estas alternativas reducen el volumen de escorrentía descargado en el cuerpo receptor.	<i>a, b</i>
O&M	Requerimientos de O&M	Se refiere a los servicios de O&M requeridos por cada SUDS para mantener su capacidad de control hidráulico y de mejoramiento de la calidad del agua. Los servicios requeridos dependen de las condiciones locales, y deben considerarse actividades de O&M de tipo regular, ocasional, de seguimiento y reparación.	<i>a, b, c, f</i>
	Confiabilidad del sistema	Se refiere a la capacidad del SUDS de mantener su rendimiento a pesar de posibles variaciones en las condiciones de operación durante su vida útil. Este rendimiento se refiere a la eficiencia hidráulica y de tratamiento que ofrece el SUDS.	<i>a, b, c</i>
Social y beneficios urbanos	Salud pública y seguridad	La instalación de SUDS trae consigo riesgos relacionados con: ahogamiento de personas, proliferación de mosquitos, exposición a agentes patógenos e inundaciones. Aunque cada SUDS potencia o minimiza tales riesgos de acuerdo a sus características de operación, en cualquier caso se deben mitigar con un buen diseño y educación a la comunidad.	<i>a, h, j</i>
	Estética y amenidad	Los SUDS se caracterizan por dar un valor estético y mejorar el paisaje en aquellos desarrollos urbanos donde son implementados. Para contribuir con este propósito, cada SUDS tiene un potencial que depende de sus características, principio de funcionamiento y de la O&M, siendo necesaria una evaluación previa a la toma de decisión.	<i>a, b, d</i>
	Creación de hábitats	Se refiere al potencial del SUDS de proporcionar un hábitat para la fauna silvestre del sitio. Estanques y humedales tienen un gran potencial debido a su vegetación acuática, mientras que los depósitos de infiltración se pueden integrar para crear corredores verdes.	<i>a, b, d</i>

Factores	Criterios	Incidencia en la selección	Autor
Costos	Costos de inversión	Los costos de inversión pueden limitar la selección de un SUDS. Estos costos incluyen: construcción, interventoría, diseño, ingeniería, estudios preliminares, gastos administrativos de la inversión inicial, gastos legales y gastos financieros.	<i>b, c, d, f, e, g, h, i, j</i>
	Costos de O&M	Los costos de O&M pueden limitar la selección de un SUDS. Estos costos incluyen: reposiciones, reparaciones, limpieza de instalaciones, mano de obra para O&M, disposición de sedimentos, inspecciones del sistema y educación comunitaria.	<i>b, c, d, e, g, h, i</i>

a: Ellis et al. (2008); b: Madge (2004); c: Martin et al. (2007); d: Woods-Ballard et al. (2007); e: Brito (2006); f: Torres (2004); g: Perales y Andrés-Doménech (2007); h: Barraud et al. (1999); i: Veldkamp et al. (1997); j: Azzout et al. (1995).

7.2 Modelo Conceptual de Selección de Tecnología

El modelo conceptual de selección de tecnología para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales en áreas urbanas, está constituido por cinco bloques temáticos: (1) Prevención de la Contaminación, (2) Infiltración y Almacenamiento de la Escorrentía, (3) Drenaje Superficial, (4) Drenaje Combinado vs. Drenaje Separado, y (5) Drenaje de Aguas Residuales. A continuación se describe cada uno de estos bloques temáticos.

7.2.1 Bloque 1. Prevención de la Contaminación

Considerando la selección de tecnología como una oportunidad para minimizar el impacto de los sistemas de drenaje en el ambiente, este primer bloque del modelo utiliza la prevención de la contaminación como una estrategia para reducir la carga contaminante vertida por el sistema de drenaje al cuerpo receptor. Dado que la prevención de la contaminación implica el uso de materiales, procesos y prácticas que reducen o eliminan la generación de contaminantes en la fuente (U.S. EPA, 1999), las prácticas de prevención propuestas en este bloque, se plantearon teniendo en cuenta el origen de algunos contaminantes que llegan a los sistemas de drenaje.

El origen de los contaminantes presentes en las descargas de sistemas de drenaje urbano, depende del tipo de flujo transportado: agua residual o agua de escorrentía. En el caso del agua residual, los contaminantes provienen de la descarga de inodoros, de diversos tipos de lavado, de la industria y de otros usos del agua (Butler y Davies, 2004). En el caso del agua de escorrentía, los contaminantes provienen de fuentes como: el desgaste de pavimentos, la disposición de basuras en calles y aceras, residuos orgánicos de aves y animales domésticos, actividades de construcción, sustancias derramadas por vehículos, sustancias tóxicas, la erosión y la contaminación atmosférica (Porto, 2001). Con el propósito de minimizar el aporte contaminante de las fuentes mencionadas, se consideran cinco prácticas de prevención que, independientemente de la tecnología seleccionada, se deben adoptar en la cuenca urbana. Cabe resaltar que ante la existencia de otras fuentes de contaminación en el contexto en estudio, se deben adoptar prácticas adicionales dirigidas a su mitigación. Las prácticas de prevención de la contaminación consideradas en este bloque, son las siguientes:

Control de la erosión y mantenimiento de la cuenca

El control de la erosión juega un papel importante en la reducción del volumen de escorrentía y de la cantidad de sedimentos que llega al sistema de drenaje. En áreas donde no se ejecutan prácticas en este sentido, se genera un exceso de escorrentía que reduce la capacidad del sistema de drenaje, incrementando el volumen y la frecuencia de las descargas durante los periodos de lluvia (RSC y DSP). Adicionalmente, se produce una alta carga de sedimentos que obstruye sumideros, canales y otros componentes, dando lugar al mal funcionamiento del sistema de drenaje. Respecto al impacto sobre la calidad del agua del cuerpo receptor, la descarga de sedimentos incrementa la turbiedad y la concentración de nutrientes, metales y otras sustancias tóxicas que alteran el hábitat natural y la vida acuática (U.S. EPA, 1999).

Para minimizar los impactos mencionados anteriormente, se deben implementar prácticas que ayuden a retener el agua lluvia en el suelo y a mantener los sedimentos en el sitio, e.g. la conservación de la cobertura vegetal en parques, espacios abiertos y parte alta de la cuenca; la planificación del uso del suelo para reducir el área de superficies impermeables; el control del uso del suelo para evitar la erosión y deforestación de la cuenca; y el control en el sitio de

sedimentos generados durante la construcción de obras civiles. Estas prácticas buscan reducir tanto el volumen de contaminantes que entran al sistema de drenaje, como el número de descargas durante los periodos de lluvia, y su efectividad depende de la participación de la autoridad ambiental, la empresa prestadora del servicio de alcantarillado, la comunidad, la entidad encargada del control urbanístico y constructores.

Manejo integral de residuos sólidos

En áreas urbanas, el manejo inadecuado de residuos sólidos incrementa la cantidad de basura y contaminantes que entran al sistema de drenaje. La falta de recolección de residuos y su disposición en calles y aceras, son situaciones que deben ser controladas para evitar que durante los eventos de lluvia, la escorrentía arrastre estos residuos hacia la red de colectores (Porto, 2001). Una vez este material llega al sistema de drenaje, se pueden presentar obstrucciones y en consecuencia inundaciones que ponen en riesgo la salud pública. Además, RSC y DSP traen consigo la carga contaminante que resulta del lavado de tales residuos y de las superficies donde han sido dispuestos, deteriorando la calidad del agua del cuerpo receptor.

Mediante la ejecución de un plan de manejo integral de residuos sólidos, no solo se buscan los beneficios sanitarios, ambientales, económicos y sociales propios del manejo adecuado de residuos; sino también que contribuya a un mejor funcionamiento del sistema de drenaje y a la reducción de la carga contaminante contenida en RSC y DSP. Para ello el plan debe considerar aspectos como la disposición de residuos de gran volumen (e.g. electrodomésticos, baterías y neumáticos), botaderos ilegales de carácter comercial y residencial, la recolección y disposición de residuos peligrosos, y la reducción y el reciclaje de residuos (U.S. EPA, 1999). Dentro de las actividades del plan, se deben realizar campañas educativas con el objetivo de crear conciencia ciudadana sobre el funcionamiento del sistema de alcantarillado y de cómo las estrategias y acciones del plan, contribuyen en este sentido.

Limpieza de calles

La limpieza de calles es considerada como una medida efectiva para mejorar la calidad de la escorrentía mediante la reducción de los contaminantes acumulados en calles y zonas parqueo. Esta medida consiste en utilizar prácticas de limpieza de pavimentos en forma regular para eliminar de las calles y áreas de estacionamiento, sedimentos, material flotante y otros contaminantes que pueden afectar la calidad del cuerpo receptor. El barrido de calles es una de las mejores prácticas utilizadas para este propósito, y actualmente se puede realizar mediante los siguientes métodos: manual, mecánico, barrido por aspiración, barrido tándem (barrido mecánico seguido de barrido por aspiración), barrido con aire regenerativo y el barrido seco asistido por vacío (Muthukrishnan *et al.*, 2004).

Como práctica para el control de la contaminación de la escorrentía, la efectividad de un programa de barrido de calles depende de factores como el uso del suelo, la duración del periodo seco, el momento y la frecuencia del barrido, el acceso a las superficies a limpiar, el mecanismo de barrido utilizado y de su operación. El rendimiento del mecanismo de barrido es afectado significativamente por factores que incluyen la cantidad de sedimentos, el tipo de pavimento, la basura y su humedad, el parqueo de automóviles y las condiciones de operación del equipo. Cabe señalar que la limpieza de calles puede ser de gran beneficio en áreas secas donde la frecuencia de lluvias es baja, lo cual favorece la acumulación de mayores cantidades de contaminantes en las calles (Muthukrishnan *et al.*, 2004).

Manejo adecuado de productos químicos de uso doméstico

El manejo inadecuado de productos químicos como fertilizantes, pesticidas, disolventes, pinturas, productos de limpieza y productos para automóviles, puede potenciar la contaminación de la escorrentía que entra al sistema de drenaje y posteriormente se descarga al cuerpo receptor. Con el objetivo de reducir este potencial contaminante, se deben promover prácticas para el manejo eficiente y seguro de tales productos, teniendo en cuenta que en el almacenamiento, uso y disposición final, se evite o reduzca la posibilidad de contacto con la escorrentía (Muthukrishnan *et al.*, 2004). En las campañas educativas se debe resaltar la importancia de que el uso de este tipo de productos se limite a la cantidad mínima, cuándo y dónde sea necesario, siguiendo en cualquier caso las recomendaciones de la etiqueta.

Uso eficiente del agua

El uso eficiente del agua es un concepto que pretende aprovechar el recurso mediante prácticas, técnicas y tecnologías que reducen o hacen más eficiente el uso del agua. Para este propósito, es necesario emprender acciones que permitan crear conciencia respecto al uso del agua, resaltando los beneficios ambientales, sociales y económicos que se obtienen con la aplicación de este concepto. En cuanto a los beneficios para el sistema de drenaje, la implementación de un programa de uso eficiente reduce el caudal de aguas residuales a transportar, lo cual ayuda a reducir la ocurrencia de RSC durante los periodos de lluvia (U.S. EPA, 1999). Adicionalmente, el agua residual que llega a la PTAR tiene una mayor concentración de contaminantes, lo cual permite alcanzar mayores eficiencias en el tratamiento biológico, a la vez que se economiza espacio y volumen por requerirse sistemas más pequeños (Sánchez y Sánchez, 2004).

7.2.2 Bloque 2. Infiltración y Almacenamiento de la Escorrentía

Para controlar la cantidad y mejorar la calidad de la escorrentía urbana, previo a su recolección y transporte, en este bloque se consideran los siguientes SUDS: pavimentos porosos, depósitos de infiltración, depósitos de detención, estanques de retención y humedales construidos. Entre los múltiples SUDS reportados en la literatura, se seleccionaron estas cinco opciones por dos razones: primero, este trabajo es un primer paso en el desarrollo de una herramienta que facilite la selección de tecnologías para el drenaje urbano en la zona de estudio; y segundo, son sistemas centralizados que pueden ser instalados en espacios públicos, lo cual facilita el acceso del personal y equipos de mantenimiento.

Antes de iniciar el proceso de selección de SUDS, se debe definir la disponibilidad de un espacio para la construcción de tales sistemas dentro del área de desarrollo. Teniendo en cuenta las opciones de SUDS consideradas, el espacio disponible debe ser de alguno de los siguientes tipos: parque, zona verde, espacio abierto, parqueadero o acera. Independientemente del tipo, el espacio debe ser de carácter público y su ubicación debe favorecer el drenaje de una parte o el total de la escorrentía generada. En el caso de no disponer de un espacio para la construcción de SUDS, se abandona la posibilidad de implementar este tipo de tecnologías y se continúa en el Bloque 3. Por otra parte, en el caso de disponer de más de un espacio con las características anteriores, se elige uno y se continúa con el proceso de selección de SUDS.

La estructura de toma de decisión para seleccionar SUDS está diseñada para identificar entre las cinco opciones consideradas, la que mejor se adapta a un contexto particular. De acuerdo

con los trabajos realizados por Azzout *et al.* (1995), Barraud *et al.* (1999), y Ellis *et al.* (2008), la toma de decisión para seleccionar SUDS está dividida en dos etapas: preselección y decisión. Para esta última, Brito (2006) recomienda utilizar un método de toma de decisión multicriterio, por lo cual se utilizó el WSM.

Etapas de Preselección

Una vez definido el espacio disponible para la construcción de SUDS, la preselección de alternativas se realiza en función de los siguientes datos de entrada: tipo de espacio disponible, tasa de infiltración del suelo, profundidad del nivel freático estacional más alto y área tributaria. Cabe señalar que el área tributaria es el área que durante un evento de lluvia, drena al SUDS la escorrentía superficial. Dependiendo de la topografía, esta área puede corresponder a una parte o al área total del desarrollo urbano. Una vez suministrados los datos de entrada, se comparan con las características requeridas para la preselección de SUDS (Cuadro 7.3) y se descartan las alternativas no viables.

Cuadro 7.3 Características requeridas para la preselección de SUDS

SUDS	Tipo de espacio	Tasa de infiltración del suelo (mm/h)	Profundidad del nivel freático ^a (m)	Área tributaria al SUDS ^b (ha)
Pavimento poroso	Parqueadero o acera	≥12	≥0.6	^c
Depósito de infiltración	Parque, zona verde o espacio abierto	12 - 76	≥1.2	≤5.0
Depósito de detención		^d	≥1.0	≥4.0
Estanque de retención		^d	≥1.0	≥6.0
Humedal construido		^d	≥1.0	≥8.0

Fuente: Basado en la revisión de Madge (2004), Woods-Ballard *et al.* (2007) y Ellis *et al.* (2008).

^a Profundidad desde el fondo de la instalación al nivel freático.

^b Dependiendo de la topografía, puede corresponder a una parte o al área total del desarrollo urbano.

^c Relación máxima área tributaria : área de pavimento poroso = 3:1

^d No es una característica influyente en la tecnología.

Teniendo en cuenta el tipo de espacio requerido por cada SUDS (ver Cuadro 7.3), la preselección del pavimento poroso implica el descarte de las demás alternativas y viceversa, pues compiten por espacios de diferente tipo. Los SUDS preseleccionados en esta etapa continúan en la etapa de decisión para realizar la selección final. En caso de no resultar viable ninguna opción, entonces se abandona el proceso de selección de SUDS y se continúa en el Bloque 3.

Etapas de Decisión

En esta etapa se toma la decisión sobre cuál de las alternativas preseleccionadas en la etapa anterior, es la más adecuada para el contexto particular. Si luego de la preselección resulta viable una sola alternativa, esta será la opción seleccionada en la etapa de decisión; en cambio, si más de una alternativa resulta viable, se aplica el WSM para tomar la decisión. Teniendo en cuenta el énfasis del modelo y los factores y criterios identificados en el capítulo 7.1, se definieron cuatro factores y siete criterios para seleccionar SUDS mediante el WSM:

Factor: Técnico

- **Control hidráulico.** Este criterio se refiere a la eficacia del SUDS para controlar el caudal de escorrentía, i.e., su eficacia en el control del volumen y el caudal pico de la escorrentía.
- **Mejoramiento de la calidad del escurrimiento superficial.** Se refiere al rendimiento del SUDS en la remoción de contaminantes del escurrimiento superficial. Dentro de estos

contaminantes se incluyen: sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nutrientes, coliformes fecales, metales, hidrocarburos poliaromáticos (polyaromatic hydrocarbons - PAH), herbicidas y otros contaminantes orgánicos.

- *Opción de reuso del agua de escurrimiento.* Posibilidad que ofrece la tecnología para el reuso del agua de escurrimiento dispuesta en ella.

Factor: Operación y mantenimiento (O&M)

- *Requerimientos de mantenimiento.* Se refiere a los servicios de O&M requeridos por la tecnología para controlar el caudal y mejorar la calidad del agua de escurrimiento durante toda su vida útil. Los servicios de O&M considerados son de tipo regular, ocasional y de monitoreo.

Factor: Urbanístico

- *Estética y amenidad.* Este criterio evalúa el potencial estético, paisajístico y recreativo aportado por la tecnología al entorno urbano. Este aporte es una función complementaria a la función de control hidráulico y mejoramiento de la calidad del agua de escurrimiento que ofrece la tecnología.

Factor: Costos

- *Costos de inversión.* Los costos de inversión incluyen todos los costos requeridos para la construcción de la tecnología: terreno, mano de obra, materiales y equipos, excavación y nivelación, construcción de estructuras de control, control de sedimentos y restitución paisajística. Los costos de inversión también incluyen el costo por servicios profesionales o técnicos necesarios para la construcción de la tecnología.
- *Costos de O&M.* Los costos de O&M incluyen: costos de mano de obra, materiales, energía y equipos requeridos para la operación y funcionamiento adecuado de la tecnología. Estos costos incluyen los costos para el mantenimiento del paisaje, el mantenimiento estructural, mantenimiento de la infiltración, de estructuras de remoción de sedimentos y la remoción de desechos y basuras de los depósitos.

Ante la falta de experiencias a nivel nacional que permitieran definir el rendimiento de los SUDS respecto a cada criterio de selección, los rendimientos utilizados en el WSM se definieron con base en los puntajes por defecto del Comparador Multi-Criterio (MCC) del DayWater Adaptive Decision Support System (ADSS) (herramienta descrita en el numeral 5.2), y en los trabajos realizados por Madge (2004) y Selvakumar (2004). Dado que los rendimientos se definieron a partir de la revisión de literatura, cada uno de ellos se debe interpretar como el rendimiento de la alternativa i respecto al criterio de selección j , en condiciones generales; lo cual debe ser ajustado a las condiciones del ámbito de aplicación del modelo en la medida que se disponga de experiencias con el uso SUDS. El Cuadro 7.4 presenta el rendimiento de cada alternativa respecto a cada criterio de selección (a_{ij}) y el peso de cada criterio (w_j) asignado por los expertos consultados. En el Cuadro 7.4 se excluye como alternativa al pavimento poroso pues como se mencionó anteriormente, su preselección implica el descarte de las demás alternativas.

Cuadro 7.4 Elementos de decisión utilizados en el WSM para la selección de SUDS

Factor	Criterio	Peso (%) w_i	Rendimiento alternativa* a_{ij}			
			DI	DD	ER	HC
Técnico	Control hidráulico	18.9	4	5	5	4
	Mejoramiento de la calidad del escurrimiento	11.3	5	2	2	4
	Opción de reuso del agua de escurrimiento	7.3	0	0	5	3
O&M	Requerimientos de mantenimiento	21.5	4	3	2	1
Urbanístico	Estética y amenidad	14.5	3	4	5	5
Costos	Costos de inversión	13.7	5	3	3	2
	Costos de O&M	12.8	2	5	2	1

DI: Depósito de infiltración; DD: Depósito de detención; ER: Estanque de retención; HC: Humedal construido.

* Rendimiento: 5 - Muy alto; 4 - Alto; 3 - Medio; 2 - Bajo; 1 - Muy bajo; 0 - Nulo.

Con base en los elementos de decisión presentados en el Cuadro 7.4 y utilizando la Ecuación 1, se calcula el puntaje de suma ponderada de cada alternativa ($P_{i\ WSM}$) preseleccionada y se selecciona la de mayor puntaje como la alternativa más adecuada para el contexto.

Al final del bloque se calcula el área no drenada por SUDS y se continúa con el proceso de selección. Si toda el área del desarrollo es drenada por el SUDS seleccionado, se procede a seleccionar tecnología para el drenaje de aguas residuales (Bloque 5). Por el contrario, si el SUDS seleccionado no atiende toda el área del desarrollo, la solución será entonces combinar el SUDS con una tecnología de recolección y transporte de aguas de escorrentía, para lo cual se selecciona tecnología en los Bloques 3 y 4.

7.2.3 Bloque 3. Drenaje Superficial

En este bloque se estudia la posibilidad de utilizar el drenaje superficial para recolectar y transportar la escorrentía del área no drenada por SUDS. El drenaje superficial se considera como una opción de recolección y transporte antes que los sistemas de alcantarillado (sistemas considerados en el Bloque 4), puesto que su implementación puede reducir el diámetro de tuberías o potenciar la capacidad hidráulica de la red de alcantarillado existente aguas abajo.

El método de toma de decisión utilizado para definir la factibilidad del drenaje superficial en un área urbana, es el árbol de decisión. Con base en la revisión de literatura (Bolinaga, 1979; van Duijl, 1992), se definieron dos atributos para la toma de decisión:

- *Disponibilidad de una red de cauces naturales en el área de desarrollo.* Se refiere a la existencia de quebradas naturales que sirvan como fuentes receptoras de la escorrentía. En áreas con esta condición, la escorrentía se puede descargar a través de varios puntos, requiriendo conductos de menor capacidad hidráulica para su transporte. Los dos valores que puede tomar este atributo son: afirmativo o negativo. En el caso afirmativo se utiliza un segundo atributo para definir la factibilidad del drenaje superficial; y en el caso negativo se abandona la opción de drenaje superficial y se continúa en el Bloque 4.
- *¿La escorrentía generada se puede evacuar mediante vías y cunetas?* Para responder este atributo se sigue el procedimiento de cálculo utilizado en el diseño de alcantarillados pluviales, solo que en vez de utilizar tuberías, se utilizan vías y cunetas para drenar la escorrentía hasta la quebrada más cercana. El caudal de escorrentía a evacuar en un área se puede calcular utilizando el método racional, siempre y cuando se tengan en cuenta las

restricciones para su aplicación (López, 2006). Para el cálculo de la capacidad hidráulica de vías y cunetas, se pueden utilizar las ecuaciones descritas en Bolinaga (1979). En ambos cálculos se deben considerar los criterios de diseño dispuestos por la entidad prestadora del servicio de drenaje de aguas lluvias. En el caso en que la capacidad hidráulica de vías y cunetas es mayor o igual al caudal de escorrentía generado en el área tributaria, el atributo es afirmativo y se selecciona el drenaje superficial para la recolectar y transportar la escorrentía. En el caso contrario, el atributo es negativo y se abandona la opción de drenaje superficial y se continúa en el Bloque 4.

Una vez estudiada la posibilidad del drenaje superficial, se calcula el área del desarrollo no atendida por SUDS ni por drenaje superficial y se continúa con el proceso de selección. Para el caso en el que esta área sea igual a cero, se procede a seleccionar tecnología para drenar aguas residuales (Bloque 5); de lo contrario, se continúa en el Bloque 4 para seleccionar el tipo de alcantarillado a implementar para evacuar la escorrentía.

7.2.4 Bloque 4. Drenaje Combinado vs. Drenaje Separado

Para recolectar y transportar la escorrentía del área no atendida por SUDS ni por drenaje superficial, se consideran dos alternativas: el alcantarillado combinado y el alcantarillado pluvial. Teniendo en cuenta el énfasis del modelo y los factores y criterios identificados en el capítulo 7.1, se definieron cuatro factores y seis criterios para seleccionar tecnología mediante el método de toma de decisión multicriterio WSM:

Factor: Técnico

- *Topografía.* Este criterio evalúa el potencial de aplicación de la tecnología en función de la pendiente media del terreno para evitar el enterramiento excesivo de colectores de un determinado diámetro. Se relaciona con el hecho de que el drenaje combinado requiere que los colectores sean instalados en mayores pendientes respecto a los colectores del drenaje pluvial, pues se debe garantizar su autolimpieza durante los periodos secos.
- *Tipo de drenaje proyectado para las aguas residuales.* Este criterio evalúa el potencial de aplicación de la tecnología de acuerdo al tipo de drenaje proyectado para las aguas residuales, es decir, si las aguas residuales generadas requieren o no bombeo para ser drenadas a un punto de entrega final, que puede ser una estación de bombeo o una PTAR.

Factor: Impacto en la calidad del cuerpo receptor

- *Control a descargas contaminantes del primer lavado.* Este criterio evalúa el potencial de la tecnología para reducir la concentración pico de contaminantes durante la etapa inicial de la lluvia (primer lavado). En el drenaje combinado, parte de esta carga se conduce a la PTAR, mientras que en drenaje pluvial ocurre una descarga directa del primer lavado al cuerpo receptor. También se considera el beneficio potencial que se puede obtener al operar en conjunto el sistema de alcantarillado con SUDS.
- *Capacidad de dilución y asimilación del cuerpo receptor.* Este criterio evalúa el potencial de aplicación de la tecnología en función de la capacidad de dilución del cuerpo receptor entendida como la relación entre el caudal del cuerpo receptor en periodo seco versus el caudal pico vertido por la tecnología para la lluvia de diseño.

Factor: Operación y mantenimiento (O&M)

- **Complejidad de O&M.** Se refiere a la complejidad de las actividades de O&M requeridas por la tecnología para garantizar el correcto funcionamiento durante su vida útil. La complejidad involucra aspectos como la frecuencia de las labores de O&M, y la demanda de materiales, equipos y personal para la realización de estas labores.

Factor: Institucional

- **Capacidad de control de conexiones erradas.** Con este criterio se evalúa el potencial de aplicación de la tecnología con base en la capacidad de control de conexiones erradas por parte de las entidades encargadas de la prestación del servicio y del control urbanístico.

El Cuadro 7.5 presenta factores, criterios de selección y pesos (w_j) utilizados dentro del WSM para la toma de decisión. La ponderación de los criterios de selección fue realizada por los expertos consultados, considerando las condiciones de localidades urbanas ubicadas en la cuenca del río Cauca en el Departamento del Valle del Cauca.

Cuadro 7.5 Factores, criterios y pesos utilizados en el WSM para seleccionar tecnología en el Bloque 4

Factor	Criterio	Peso (%) w_j
Técnico	Topografía	19.0
	Tipo de drenaje proyectado para las aguas residuales	15.5
Impacto en la calidad del cuerpo receptor	Control a descargas contaminantes del primer lavado	11.5
	Capacidad de dilución y asimilación del cuerpo receptor	17.0
O&M	Complejidad de O&M	18.5
Institucional	Capacidad de control de conexiones erradas	18.5

La selección de tecnología se realiza en dos pasos. En el primer paso, se asigna el rendimiento de las alternativas respecto a los criterios de selección (a_{ij}) teniendo en cuenta las condiciones del contexto; y en el segundo paso, se calcula el puntaje de suma ponderada de cada alternativa (P_i WSM) utilizando la Ecuación 1, el rendimiento de las alternativas asignado en el primer paso y el peso de los criterios de selección presentados en el Cuadro 7.5. Realizado este cálculo, se selecciona la alternativa con el mayor P_i WSM para drenar la escorrentía remanente y se continúa en el Bloque 5 para seleccionar el tipo de alcantarillado para la recolección y transporte de aguas residuales.

Rendimiento de las alternativas respecto a los criterios de selección

A continuación se describen las bases de la calificación y los procedimientos requeridos para obtener el rendimiento de las alternativas respecto a cada criterio de selección, teniendo en cuenta las condiciones del contexto.

Topografía

El rendimiento de las alternativas se calificó con base en la comparación entre la pendiente predominante del sitio y la pendiente requerida por cada tecnología para la autolimpieza de colectores. Para el cálculo de esta última se tuvo en cuenta el esfuerzo cortante medio exigido por el Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia (2000), los diámetros comerciales de las tuberías de PVC y recomendaciones dadas por algunos de los expertos consultados. En el Anexo 3 se explica el procedimiento que se siguió para calificar el rendimiento de cada alternativa respecto a posibles valores de pendiente predominante en el sitio.

Los datos a suministrar al modelo para obtener el rendimiento de las tecnologías de acuerdo a las condiciones del contexto, son: pendiente predominante del sitio (%) y diámetro de colectores principales ("). Se entiende por pendiente predominante a la pendiente media del terreno donde al menos el 50% de los colectores principales quedaran instalados, y por colectores principales a aquellos que se instalan para conducir el flujo en el sentido natural del escurrimiento. El diámetro de colectores principales se obtiene a partir del predimensionamiento de un alcantarillado para evacuar la escorrentía. Este alcantarillado puede ser de tipo combinado o pluvial dado que para una misma zona de estudio, la diferencia de diámetros entre estas opciones es mínima. A partir de los datos anteriores y utilizando el Cuadro 7.6, se obtiene el rendimiento de cada alternativa de acuerdo al caso en estudio.

Cuadro 7.6 Rendimiento de las alternativas respecto a la pendiente predominante y al diámetro de colectores principales

Pendiente predominante (%)	Diámetro de colectores principales							
	10"		12" - 18"		20" - 39"		> 39"	
	AC	AP	AC	AP	AC	AP	AC	AP
≥ 1.1	5	5	5	5	5	5	5	5
1.1 - 0.6	3	5	5	5	5	5	5	5
0.6 - 0.25	1	3	3	5	5	5	5	5
< 0.25	NR	1	1	3	3	5	5	5

AC: Alcantarillado Combinado; AP: Alcantarillado Pluvial.

Rendimiento: 5 - Alto; 3 - Medio; 1 - Bajo; NR - Tecnología no recomendada.

Tipo de drenaje proyectado para las aguas residuales

El agua residual generada en un desarrollo urbano se puede drenar por gravedad o por bombeo hasta un punto de disposición final. Mediante la consulta a expertos en el tema objeto de este trabajo, se calificó el rendimiento de las tecnologías respecto a cuatro condiciones del contexto que consideran los tipos de drenaje mencionados (ver Cuadro 7.7). Para casos en los que una parte del desarrollo urbano se pueda drenar por gravedad y la otra parte requiera de bombeo, se debe especificar el porcentaje de agua residual a drenar por bombeo y a partir de este dato obtener del Cuadro 7.7 el rendimiento de cada tecnología.

Cuadro 7.7 Rendimiento de las alternativas respecto al tipo de drenaje proyectado para las aguas residuales

Condición del contexto	Rendimiento de la alternativa a_{ij}	
	Alcantarillado Combinado	Alcantarillado Pluvial
Drenaje por gravedad	4	3
%DB $\leq 20\%$	3	3
%DB 21 – 50%	2	4
%DB > 50%	1	4

%DB: Porcentaje de agua residual a drenar por bombeo.

Rendimiento: 5 - Muy alto; 4 - Alto; 3 - Medio; 2 - Bajo; 1 - Muy bajo.

Control a descargas contaminantes del primer lavado

El rendimiento de las alternativas se calificó con base en estudios realizados sobre el fenómeno del primer lavado en sistemas de drenaje (Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998; Barco *et al.*, 2008), y sobre la eficiencia de los SUDS en cuanto al mejoramiento de la calidad del primer lavado (Ellis *et al.*, 2008). El procedimiento seguido para tal calificación se presenta en el Anexo 3. A partir del análisis realizado, se definió que para obtener los puntajes de rendimiento de acuerdo al caso en estudio, se debe suministrar al modelo el porcentaje de área

drenada por SUDS y el SUDS seleccionado en el Bloque 2. Este porcentaje es igual a cero en los casos donde no sea viable la implementación de SUDS; y en los casos contrarios, el porcentaje es diferente de cero y se debe especificar el tipo de SUDS seleccionado.

Para casos en los que no sea posible la implementación de SUDS, el sistema de alcantarillado a implementar funcionará como un sistema tradicional (i.e. no obtendrá los beneficios de operar en conjunto con un SUDS), y por tanto se le asigna un puntaje de 2 al alcantarillado pluvial, y de 4 al alcantarillado combinado; lo anterior se definió a partir del estudio de Bertrand-Krajewski *et al.* (1998). En los casos contrarios, se entiende que el sistema de alcantarillado funcionará en combinación con un SUDS, obteniendo una mejor calidad de la escorrentía en la medida que el SUDS seleccionado en el Bloque 2 sea más eficiente. En el Cuadro 7.8 se presenta el rendimiento de las alternativas para casos en los que es posible la implementación de SUDS.

Cuadro 7.8 Rendimiento de las alternativas respecto al control a descargas contaminantes del primer lavado

SUDS seleccionado en el Bloque 2	Porcentaje de área drenada por SUDS			
	< 20%		≥ 20%	
	AC	AP	AC	AP
Depósito de infiltración	4	3	5	4
Depósito de detención	3	2	4	3
Estanque de retención	3	2	4	3
Humedal construido	4	3	5	4
Pavimento poroso	4	3	5	4

AC: Alcantarillado Combinado; AP: Alcantarillado Pluvial.

Rendimiento: 5 - Muy alto; 4 - Alto; 3 - Medio; 2 - Bajo; 1 - Muy bajo.

Capacidad de dilución y asimilación del cuerpo receptor

Para obtener el rendimiento de las alternativas respecto a este criterio, se debe definir el tipo de información disponible para evaluar el impacto de RSC y DSP en la calidad del cuerpo receptor. En este sentido, se considera que un contexto urbano puede disponer de dos tipos de información: uno, que es contar con un modelo hidráulico y de calidad de agua calibrado para el cuerpo receptor en estudio, polutogramas e hidrogramas de descarga tipo para RSC y DSP; y dos, que es contar con datos sobre el caudal del cuerpo receptor en periodo seco y el caudal de escorrentía pico generado por el área no drenada por SUDS ni por drenaje superficial.

En el caso de disponer de información tipo uno, se deben realizar los estudios de modelación que permitan evaluar el impacto de las descargas de RSC y DSP en la calidad del cuerpo receptor y, con base en los resultados, calificar el rendimiento de cada alternativa para el caso particular. En los ítems D.1.7.10 y E.4.3.2 del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia, 2000), se dan algunas especificaciones para realizar tales modelaciones. Por otra parte, en el caso de disponer de información tipo dos, se debe calcular la relación entre el caudal del cuerpo receptor en periodo seco y el caudal de escorrentía pico (relación conocida como factor de dilución), para luego utilizar el Cuadro 7.9 y obtener el rendimiento de cada tecnología respecto a la capacidad de dilución del cuerpo receptor. En el Anexo 3 se presentan algunas consideraciones para realizar este cálculo.

Cuadro 7.9 Rendimiento de las alternativas respecto a la capacidad de dilución del cuerpo receptor

Factor de dilución*	Rendimiento de la alternativa a_{ij}	
	Alcantarillado Combinado	Alcantarillado Pluvial
≥ 40	4	4
< 40	2	3

Rendimiento: 5 - Muy alto; 4 - Alto; 3 - Medio; 2 - Bajo; 1 - Muy bajo.

* Factor de dilución: relación entre el caudal del cuerpo receptor en periodo seco y el caudal de escorrentía pico.

Los puntajes de rendimiento que se relacionan en el Cuadro 7.9 se definieron a partir de la revisión de literatura sobre la capacidad de dilución de cuerpos receptores (Reid, 1982), y de estudios de caso sobre la calidad de los vertimientos de RSC y DSP (Martins *et al.*, 1991 en Porto, 2001; Barco *et al.*, 2008). En el Anexo 3 se presentan los aspectos tenidos en cuenta para definir tales puntajes de rendimiento.

Complejidad de O&M

El rendimiento de los alcantarillados combinado y pluvial fue calificado por expertos en el tema objeto de este trabajo, teniendo en cuenta la complejidad de labores como inspección y limpieza de colectores y estructuras especiales, inspección de conexiones domiciliarias y disposición de lodos, en ambas tecnologías (ver Anexo 1). Al analizar los resultados de esta calificación, se le asignó un puntaje de 2 al alcantarillado combinado y de 3 al alcantarillado pluvial; puntajes que representan el rendimiento de las alternativas para el caso general de una localidad urbana ubicada dentro ámbito de aplicación del modelo.

Capacidad de control de conexiones erradas

El rendimiento de las alternativas se calificó con base en un indicador que utiliza la probabilidad de ejecutar actividades para el control de conexiones erradas y la importancia de cada actividad, para estimar la capacidad de control a este tipo de conexiones. En este indicador se consideran seis actividades que fueron identificadas a partir de la revisión de Butler y Davies (2004), Muthukrishnan *et al.* (2004) y Universidad del Valle (2008), y están orientadas a la educación comunitaria, a la correcta instalación, inspección y mantenimiento de acometidas, al control de desarrollos urbanos y al control de asentamientos ilegales. La importancia de cada actividad fue asignada por los expertos consultados, considerando las condiciones del área de estudio. Por otra parte, el indicador utilizado fue formulado con base en la propuesta de Andjelkovic (2001) para analizar riesgos mediante técnicas multi-atributo.

Para obtener el rendimiento de cada alternativa de acuerdo a las condiciones de un contexto particular, se debe suministrar en términos cualitativos, la probabilidad de ejecutar cada una de las seis actividades consideradas para el control de conexiones erradas. Utilizando tales probabilidades y la importancia asignada a cada actividad, se calcula el indicador mediante el cual se estima como alta, media o baja, la capacidad de control de conexiones erradas. Finalmente, con base en esa capacidad de control, se utiliza el Cuadro 7.10 para obtener el rendimiento de ambas alternativas. En el ítem B.4.4 del Anexo 2 se describe el procedimiento para calcular este indicador de acuerdo a las condiciones del contexto.

Cuadro 7.10 Rendimiento de las alternativas respecto a la capacidad de control de conexiones erradas

Capacidad de control de conexiones erradas	Rendimiento de la alternativa a_{ij}	
	Alcantarillado Combinado	Alcantarillado Pluvial
Alta	5	5
Media	5	3
Baja	5	1

Rendimiento: 5 - Muy alto; 4 - Alto; 3 - Medio; 2 - Bajo; 1 - Muy bajo.

7.2.5 Bloque 5. Drenaje de Aguas Residuales

En este bloque se selecciona el tipo de alcantarillado para drenar las aguas residuales generadas en el desarrollo urbano. Las opciones consideradas son: ASAS, alcantarillado simplificado, alcantarillado sanitario convencional y alcantarillado combinado. Este último se selecciona para casos en los que, de acuerdo al Bloque 4, resulta ser la mejor opción para el drenaje de toda o parte de la escurrimiento. Para los demás casos, la opción a implementar se selecciona mediante un árbol de decisión.

El árbol de decisión inicia evaluando la posibilidad de implementar ASAS, utilizando para ello cuatro atributos: (1) *¿la densidad poblacional es menor a 300 hab/ha?*, (2) *¿el porcentaje de habitantes que aceptan el ASAS es mayor al 50%?*, (3) *¿el prestador del servicio garantiza el mantenimiento de tanques interceptores?*, y (4) *disponibilidad de espacios públicos para la construcción de tanques interceptores*. En el caso de que los cuatro atributos sean afirmativos, se selecciona el ASAS como la alternativa a implementar para el drenaje de aguas residuales. Por otro lado, si al menos uno de los cuatro atributos es negativo, no es factible la implementación de ASAS y se debe seleccionar entre el alcantarillado simplificado y el alcantarillado sanitario convencional utilizando el atributo: *¿el ancho de aceras permite la instalación de colectores de pequeño diámetro y cajas de paso?* Si este último es afirmativo, se selecciona el alcantarillado simplificado; sino, se selecciona el alcantarillado sanitario convencional. A continuación se describen los atributos utilizados para la toma de decisión:

- *¿La densidad poblacional es menor a 300 hab/ha?* Para responder este atributo es necesario suministrar la densidad poblacional que se proyecta en el desarrollo urbano. En términos generales, el ASAS se hace fácilmente aplicable en comunidades que cumplan con una densidad entre 100 y 300 hab/ha, ya que se logra una reducción en los costos de construcción, O&M, y una mayor confiabilidad en el funcionamiento del sistema (Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia, 1995).
- *¿El porcentaje de habitantes que aceptan el ASAS es mayor al 50%?* Para responder este atributo es necesario suministrar el porcentaje de habitantes que acepta el ASAS como opción para el drenaje de aguas residuales. Este dato se obtiene de manera indirecta, ya que en el área de futuro desarrollo no existe una comunidad que se pueda consultar. En este sentido, la consulta se debe realizar en una comunidad de estrato socioeconómico y tipo de desarrollo urbano similar a la del área en estudio, explicando previamente aspectos como el funcionamiento del sistema, las ventajas y desventajas de su implementación y las responsabilidades del usuario y del prestador del servicio.
- *¿El prestador del servicio garantiza el mantenimiento de tanques interceptores?* Uno de los factores más importantes para el correcto funcionamiento del ASAS, es el

mantenimiento de tanques interceptores. Si los lodos y las natas no se retiran de manera periódica, los tanques dejarán de retener sólidos, ocasionando la obstrucción de colectores (IDEAM y CARINSA S.A., 2003). Con el objetivo de contribuir al éxito del ASAS, este atributo pretende evaluar la capacidad técnica, operativa y administrativa del prestador del servicio para realizar el mantenimiento periódico de los tanques interceptores del sistema. En el caso de que el prestador del servicio no pueda garantizar tal mantenimiento, se debe abandonar la posibilidad de implementar ASAS en el desarrollo urbano.

- *Disponibilidad de espacios públicos para la construcción de tanques interceptores.* Se refiere a la existencia de espacios públicos donde se puedan construir tanques interceptores. De acuerdo con (U.S. EPA, 2000), uno de los mayores inconvenientes que puede dificultar el mantenimiento de tanques interceptores, es cuando estos son instalados en propiedades privadas, requiriendo de permisos especiales para que el prestador del servicio acceda al sistema. Para evitar este tipo de situaciones, mediante este atributo se busca garantizar que estos tanques sean instalados en espacios públicos, lo cual facilita el acceso del personal y equipos de mantenimiento.
- *¿El ancho de aceras permite la instalación de colectores de pequeño diámetro y cajas de paso?* Este atributo fue planteado con base en la revisión del Ministerio de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente de Brasil (1987) y WSP (2007), y pretende evaluar si el ancho de las aceras y otras áreas públicas libres de tráfico vehicular, facilitan el trazado e instalación de colectores de pequeño diámetro, cajas de paso y demás componentes del alcantarillado simplificado; teniendo en cuenta que el suministro de otros servicios públicos tales como acueducto, energía eléctrica, gas domiciliario y telecomunicaciones, compiten por el mismo tipo de espacio.

7.2.6 Diagrama del Modelo Conceptual

La Figura 7.1 presenta el diagrama construido para facilitar el manejo de información a través de los procesos de selección de tecnología del modelo. Para aplicar el modelo de selección a un caso determinado, es necesario utilizar este diagrama en simultáneo con la guía del usuario presentada en el Anexo 2.

Nomenclatura del Diagrama del Modelo Conceptual

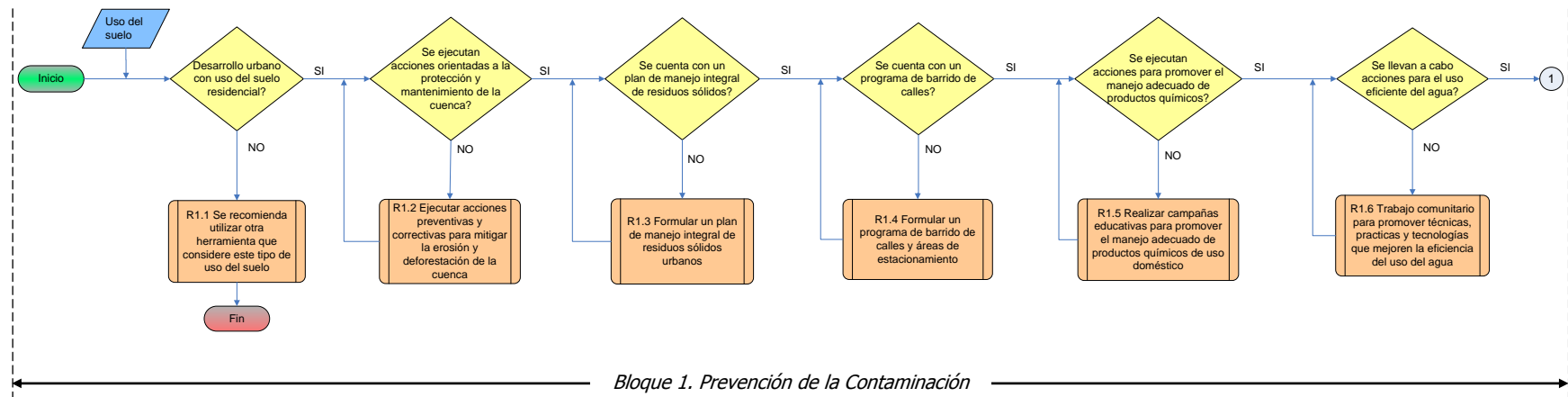
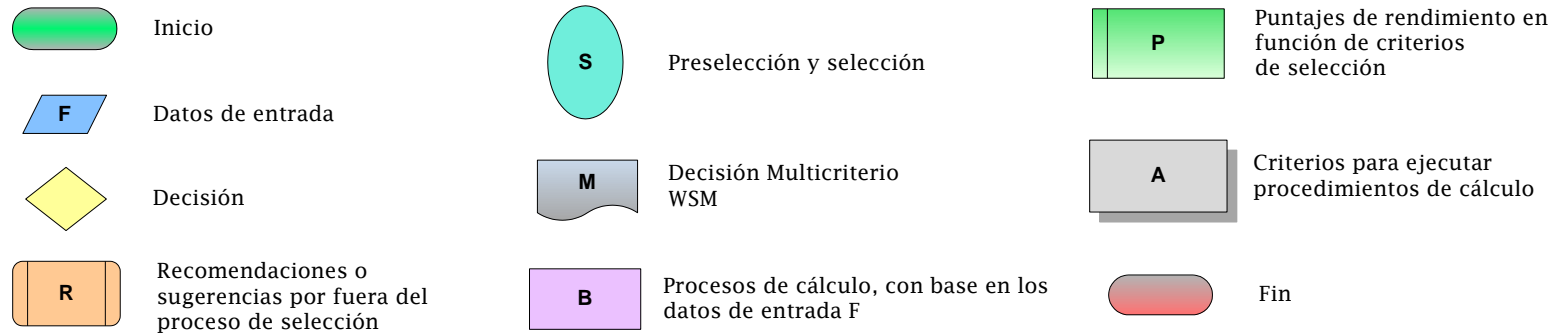


Figura 7.1 Diagrama del modelo conceptual de selección de tecnología para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales

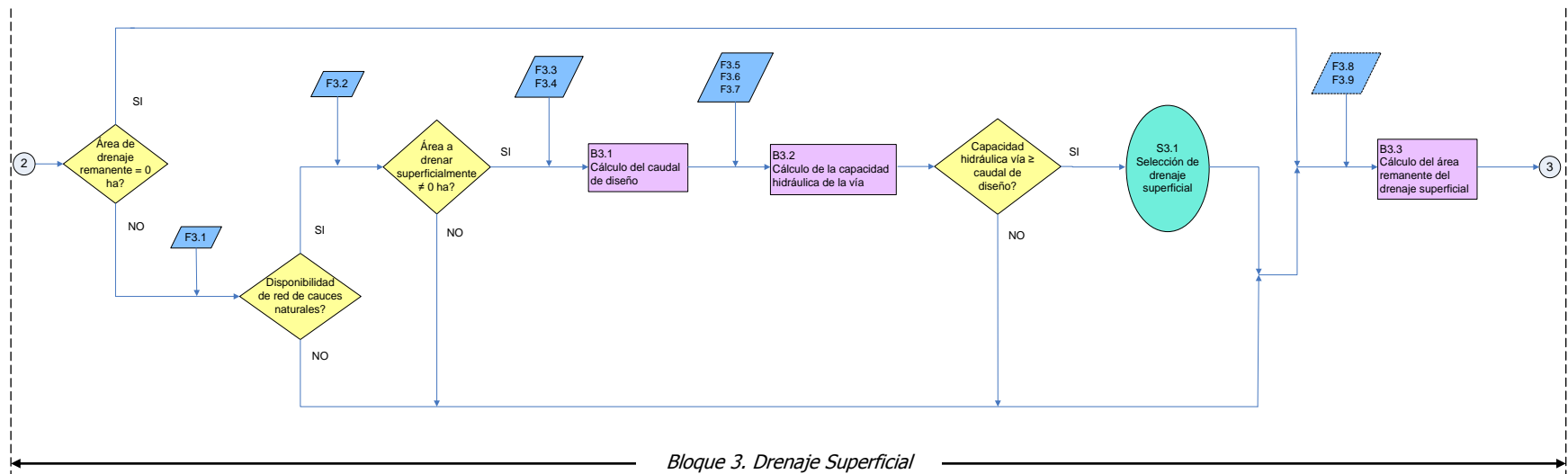
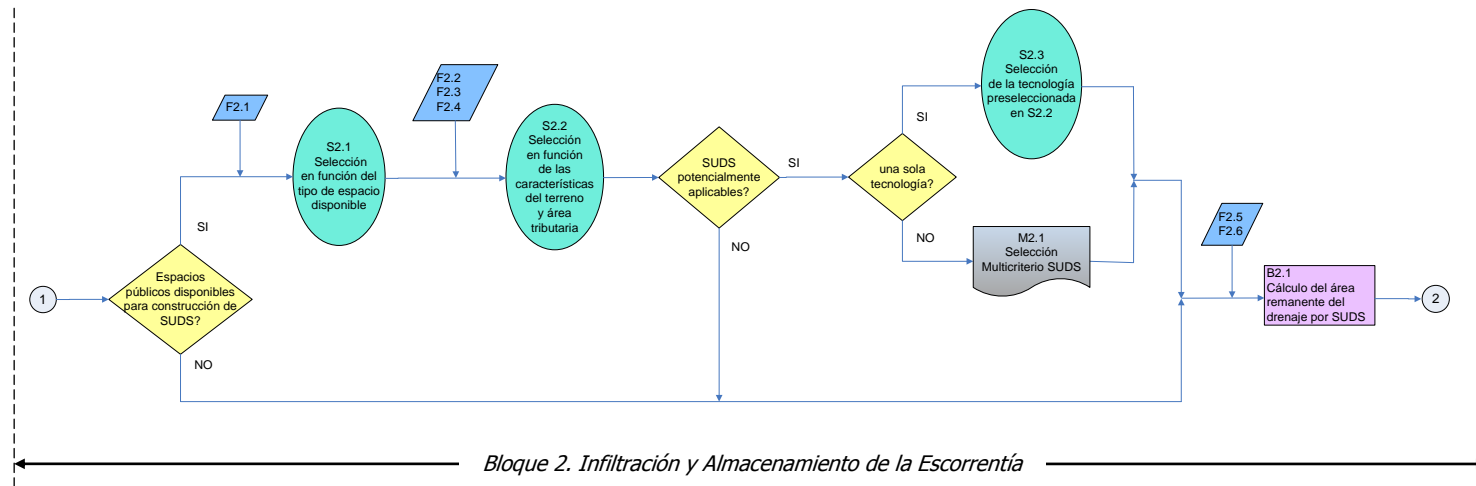


Figura 7.1 Diagrama del modelo conceptual de selección de tecnología para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales (Cont.1)

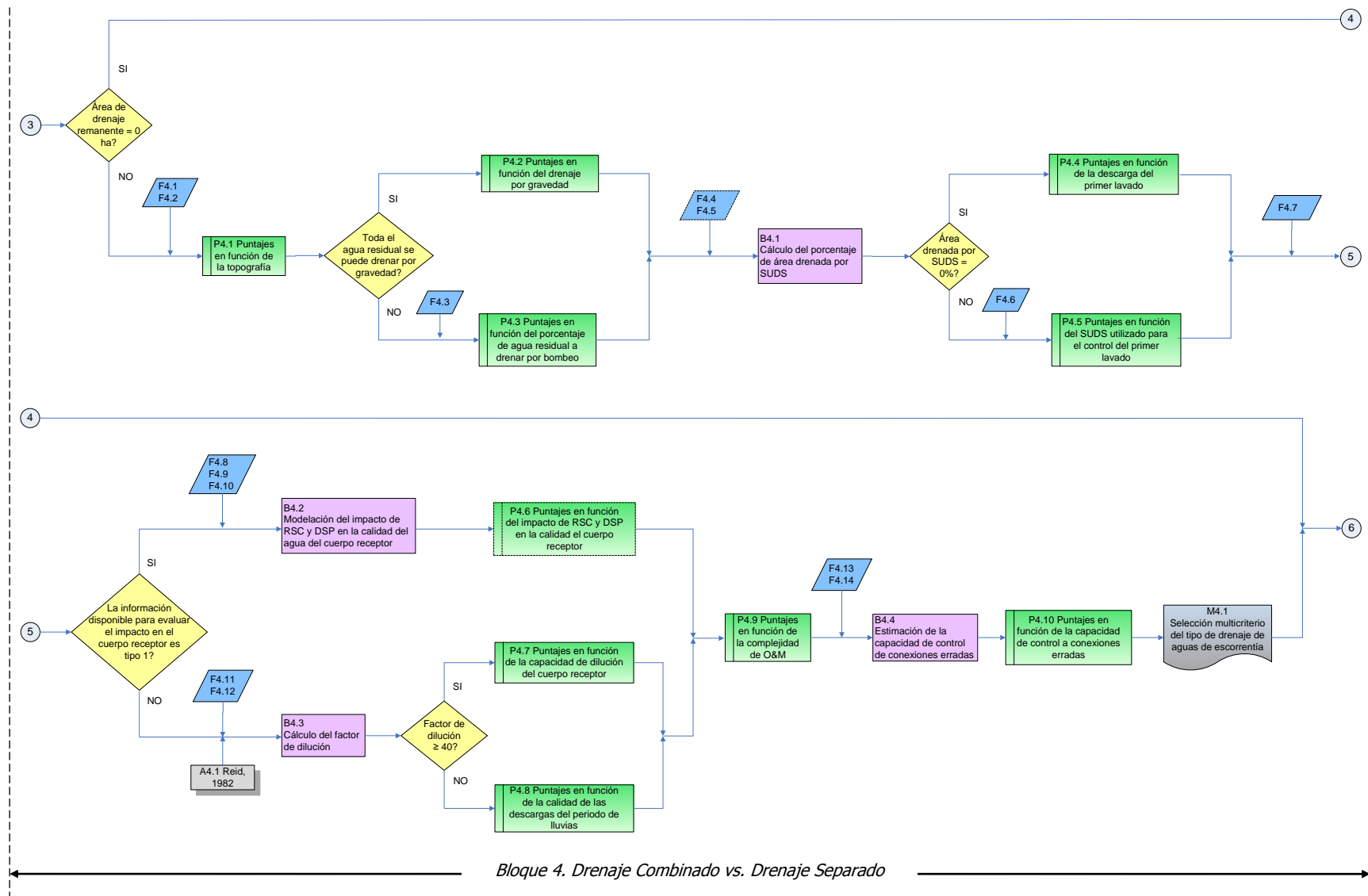


Figura 7.1 Diagrama del modelo conceptual de selección de tecnología para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales (Cont.2)

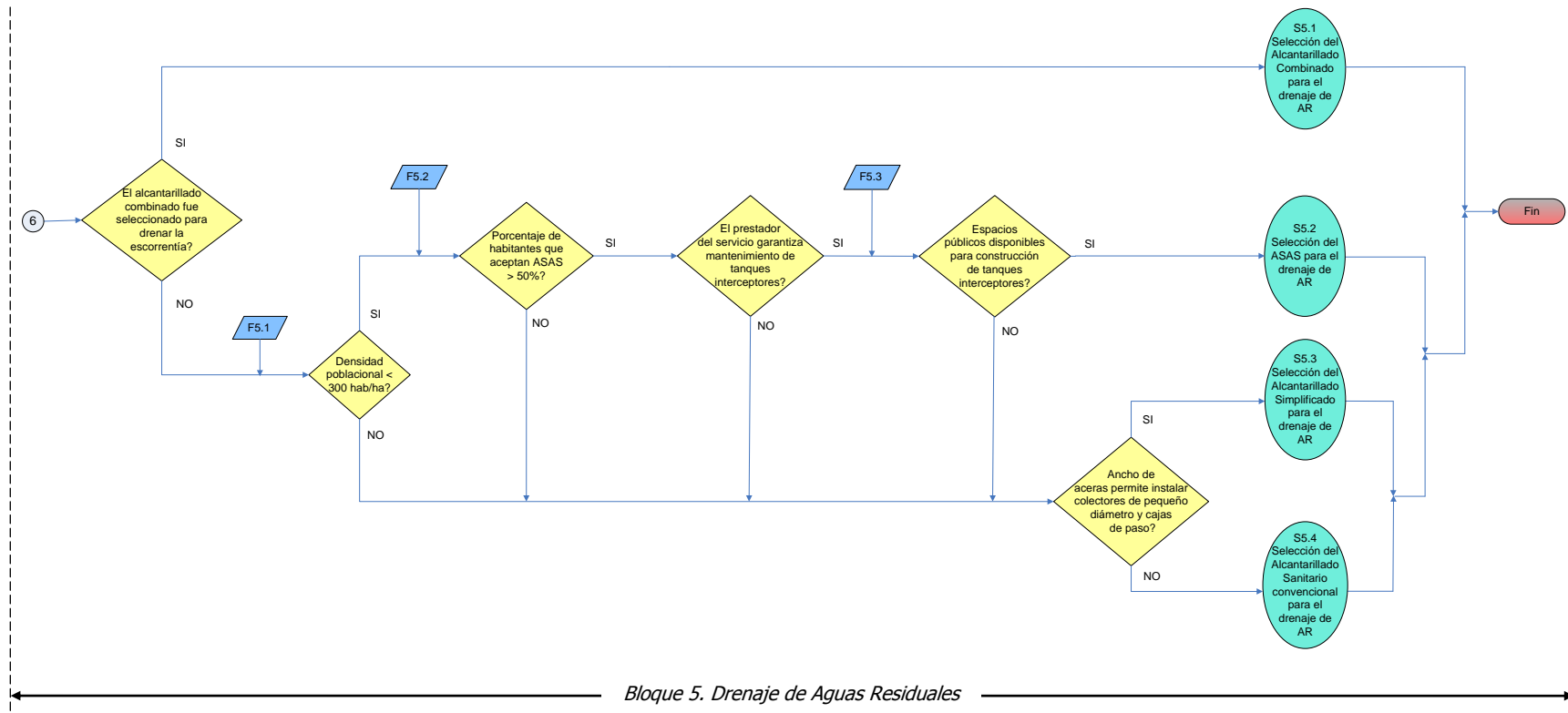


Figura 7.1 Diagrama del modelo conceptual de selección de tecnología para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales (Cont.3)

7.3 Estudio de Caso: Plan Parcial Las Vegas

El Plan Parcial Las Vegas es un desarrollo urbano de tipo residencial ubicado en la ciudad de Cali - Colombia (Figura 7.2), proyectado para una población aproximada de 15,000 habitantes. Su área total es de 59 ha, de las cuales el 84% es impermeable (vías, parqueaderos, aceras y tejados) y el 16% corresponde a zonas verdes. El desarrollo será provisto de una PTAR, dado que la topografía del sitio dificulta la descarga de aguas residuales al sistema de alcantarillado de la ciudad (COMFANDI, 2006).

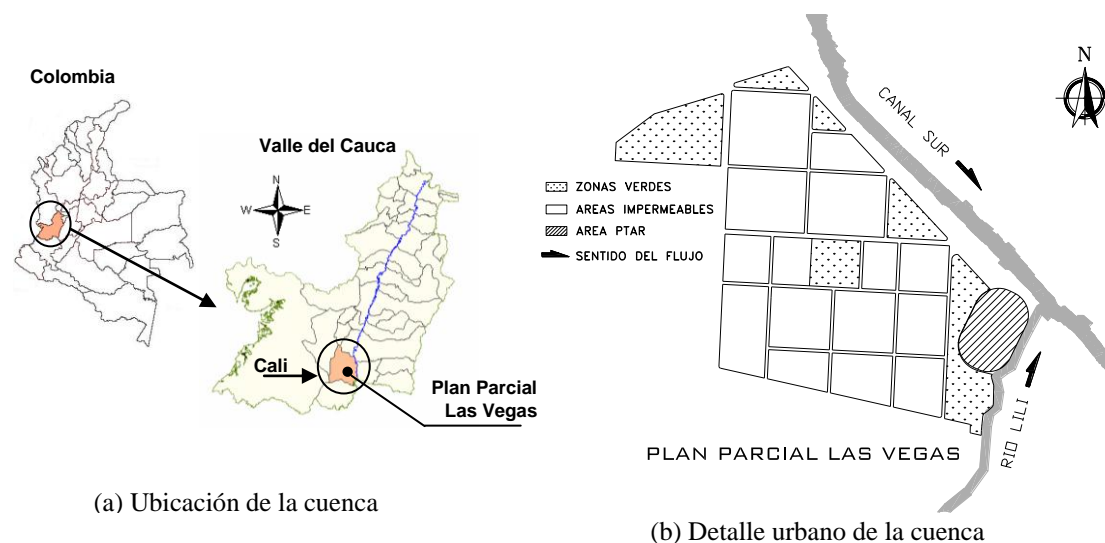


Figura 7.2 Ubicación del Plan Parcial Las Vegas (a) y detalle urbano (b)

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los bloques temáticos, tras la aplicación del modelo:

Bloque 1. Prevención de la contaminación

Aunque en la planificación del desarrollo urbano se proyectan algunas acciones orientadas al control de la erosión y mantenimiento de la cuenca, se recomienda plantear y ejecutar acciones complementarias tales como la conservación de la cobertura vegetal en parques y espacios abiertos, la planificación del uso del suelo para reducir el área de superficies impermeables, y el control en el sitio de sedimentos generados durante la construcción de las obras civiles del desarrollo urbano. Adicionalmente, se recomienda plantear y ejecutar acciones dirigidas hacia las demás prácticas de prevención de la contaminación descritas en el capítulo 7.2.1: manejo integral de residuos sólidos, limpieza de calles, manejo adecuado de productos químicos de uso doméstico, y uso eficiente de agua.

Bloque 2. Infiltración y Almacenamiento de la Escorrentía

En el área de futuro desarrollo se identificaron varios espacios abiertos y zonas verdes en los que se podrían implementar SUDS. Para la aplicación del modelo conceptual, se seleccionaron dos zonas verdes teniendo en cuenta el área tributaria que podrían drenar de acuerdo a su ubicación y a la topografía del sitio. Las características de estos espacios son las siguientes: tasa de infiltración: 61.2 mm/h; profundidad del nivel freático: 3 m; y área tributaria: 21.9 ha (9.5 ha a una de las zonas verdes y 12.4 ha a la otra). A partir de los datos anteriores y

utilizando el Cuadro 7.3, se preseleccionaron tres alternativas: el depósito de detención, el estanque de retención y el humedal construido. Finalmente en la etapa de decisión de este bloque, se seleccionó el depósito de detención debido al mejor rendimiento comparado con las otras dos opciones (ver Cuadro 7.4). De acuerdo a lo anterior, la escorrentía generada en 21.9 ha del desarrollo urbano (37% del área total) sería drenada a dos depósitos de detención y las 37.1 ha restantes (63% del área total), debe ser drenada por la tecnología de recolección y transporte seleccionada en el Bloque 3 y/o en el Bloque 4.

Bloque 3. Drenaje Superficial

No es factible la implementación del drenaje superficial, dado que no se dispone de una red de cauces naturales en el área de futuro desarrollo. La escorrentía generada en el área no atendida por SUDS debe ser drenada mediante el sistema de alcantarillado seleccionado en el Bloque 4.

Bloque 4. Drenaje Combinado vs. Drenaje Separado

Se seleccionó el alcantarillado combinado para drenar las 37.1 ha no atendidas por los depósitos de detención seleccionados en el Bloque 2. En el Cuadro 7.11 se presentan los datos utilizados para la toma de esta decisión. El caudal de escorrentía pico generado en el área de desarrollo, fue calculado para un periodo de retorno de un año, pues de acuerdo a Perales y Andrés-Doménech (2007), los episodios de precipitación más frecuentes son los que generan altas concentraciones de contaminantes en las escorrentías urbanas. En el Cuadro 7.12 se presenta el puntaje de suma ponderada de las alternativas consideradas en este bloque ($P_{i \text{ WSM}}$).

Cuadro 7.11 Datos del caso Plan Parcial Las Vegas utilizados para seleccionar tecnología en el Bloque 4

Datos	Valor	Fuente Bibliográfica
Pendiente predominante del sitio	0.3 - 0.5 %	COMFANDI (2006)
Diámetro de colectores pluviales principales	24" - 30"	COMFANDI (2006)
Tipo de drenaje proyectado para las aguas residuales	Gravedad	COMFANDI (2006)
Porcentaje de área drenada por SUDS	37%	*
SUDS seleccionado en el Bloque 2	Depósito de detención	*
Caudal del cuerpo receptor en periodo seco	0.513 m ³ /s	EMCALI (2007)
Caudal de escorrentía pico	1.5 m ³ /s	EMCALI e HIDRO-OCCIDENTE S.A. (2006)
Probabilidad de ejecutar actividades de control de conexiones erradas	Media	*

* Dato obtenido a partir de la aplicación del modelo conceptual.

Cuadro 7.12 Puntajes $P_{i \text{ WSM}}$ de los alcantarillados combinado y pluvial para el caso Plan Parcial Las Vegas

Criterio	Peso (%) w_j	Rendimiento a_{ij}		Puntaje parcial $a_{ij} \times w_j$		Sumatoria $\sum a_{ij} \times w_j$	
		AC	AP	AC	AP	AC	AP
Topografía	19.0	5	5	95	95	95	95
Tipo de drenaje de aguas residuales	15.5	4	3	62	46.5	157	141.5
Control a descargas contaminantes del primer lavado	11.5	4	3	46	34.5	203	176
Capacidad de dilución y asimilación cuerpo del receptor	17.0	2	3	34	51	237	227
Complejidad de O&M	18.5	2	3	37	55.5	274	282.5
Capacidad de control de conexiones erradas	18.5	5	3	92.5	55.5	366.5	338
$P_{i \text{ WSM}}$						366.5	338

AC: Alcantarillado Combinado; AP: Alcantarillado Pluvial.

Rendimiento: 5 - Muy alto; 4 - Alto; 3 - Medio; 2 - Bajo; 1 - Muy bajo.

Bloque 5. Drenaje de Aguas Residuales

Dado que en el Bloque 4 se seleccionó el alcantarillado combinado para drenar parte de la escorrentía, se seleccionó también esta tecnología para drenar las aguas residuales generadas en el desarrollo urbano.

8. Conclusiones

- En este trabajo se encontró que en la selección de tecnologías para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales en áreas urbanas, inciden criterios ambientales, sociales, técnicos, económicos, urbanísticos e institucionales, que deben ser analizados de manera integral para la toma de una decisión. Además, la oferta tecnológica no se debe limitar a tecnologías utilizadas tradicionalmente, sino que también se deben considerar otras opciones potencialmente aplicables en áreas urbanas ubicadas dentro del valle geográfico del río Cauca, en el Departamento del Valle del Cauca.
- Desde el punto de vista tecnológico, los factores y criterios más relevantes que influyen la selección de tecnologías para el drenaje urbano, tienen que ver con la interacción entre el alcantarillado, la PTAR y el cuerpo receptor. Tales factores y criterios se refieren a la descarga de RSC y DSP durante los periodos de lluvia, la dilución del agua residual que va a la PTAR, la descarga del primer lavado al cuerpo receptor y la existencia de conexiones erradas en el sistema de alcantarillado. Este último es uno de los aspectos de mayor importancia y complejidad en contextos urbanos de países en desarrollo, pues se intersecta con aspectos de carácter institucional y comunitario.
- El modelo conceptual desarrollado se considera como un primer paso en la construcción de una herramienta metodológica que facilite la selección de tecnologías para el drenaje urbano en el valle geográfico del río Cauca, dentro del Departamento del Valle del Cauca. Aporta desde el punto de vista tecnológico, elementos para la toma de decisión que han sido planteados a partir de la revisión de literatura y de la consulta a expertos en el tema. Las características que se destacan del modelo, son: (1) considerar la prevención de la contaminación como punto de partida para la selección de sistemas de drenaje; (2) estudiar la posibilidad de implementar SUDS como una estrategia para reducir la carga contaminante de la escorrentía; (3) considerar la posibilidad de combinar SUDS con sistemas de alcantarillado combinado o separado para el drenaje de un área urbana; y (4) utilizar criterios de selección diferentes a los de tipo económico para seleccionar entre los alcantarillados combinado y separado.
- En el estudio de caso se encontró que la opción más adecuada para el drenaje de aguas de escorrentía y aguas residuales en el Plan Parcial Las Vegas, es implementar dos depósitos de detención junto con un alcantarillado combinado. Además, la aplicación del modelo muestra la importancia de control de conexiones erradas en los sistemas de drenaje, dado que hasta antes de su consideración dentro del proceso de selección, la mejor opción era el alcantarillado pluvial en lugar del combinado.

9. Recomendaciones

- Los factores y criterios de selección identificados en este trabajo, se deben complementar con la experiencia regional adquirida por las empresas prestadoras del servicio de alcantarillado, la autoridad ambiental y entidades de planeación y control urbano, en el manejo de sistemas de drenaje.
- Por tratarse de un primer paso en la construcción de una herramienta metodológica que facilite la selección de tecnologías para el drenaje urbano, se deben fortalecer con investigaciones orientadas a las condiciones del valle geográfico del río Cauca, aquellos elementos de decisión que fueron planteados a partir de casos y experiencias internacionales. Estos elementos se refieren particularmente al rendimiento de las alternativas respecto a los criterios de selección utilizados en los bloques temáticos 2 y 4. En cuanto a los temas que deben ser estudiados, se encuentran los SUDS, las descargas intermitentes de los sistemas de drenaje urbano durante los periodos de lluvia (RSC y DSP) y la modelación hidráulica y de calidad de agua de cuerpos receptores.
- Realizar la validación preliminar del modelo conceptual mediante la evaluación de la estructura general del modelo, los factores y criterios de selección, la estructura de toma de decisiones en cada uno de los bloques y la pertinencia de la información requerida para su utilización, y realizar los ajustes respectivos. Como parte del proceso de validación, también se debe aplicar el modelo de selección a otros casos de estudio ubicados dentro del valle geográfico del río Cauca en el Departamento del Valle del Cauca.
- Desarrollar un software del modelo conceptual con el fin de mejorar el manejo de información a través del proceso de toma de decisión, y facilitar su aplicación a futuros casos de estudio. Este software también debe ser validado.
- Aunque el ámbito de aplicación del modelo conceptual corresponde a las áreas urbanas localizadas dentro del valle geográfico del río Cauca, el modelo puede ser aplicado a contextos ubicados por fuera de esta región, siempre y cuando se tenga en cuenta que el peso de los criterios y el rendimiento de las alternativas, deben ser modificados de acuerdo a las nuevas condiciones.

10. Referencias

- Andjelkovic, I. (2001) *Guidelines on Non-Structural Measures in Urban Flood Management*, Paris, International Hydrological Programme.
- Arocha, S. (1983) *Cloacas y Drenajes. Teoría y Diseño*, Caracas, Venezuela, Ediciones Vega.
- Azzout, Y., Barraud, S., Cres, F. N. y Alfakih, E. (1995) Decision aids for alternative techniques in urban storm management. *Water Science & Technology*, 32 (1), 41-48.
- Barco, J., Papiri, S. y Stenstrom, M. K. (2008) First flush in a combined sewer system. *Chemosphere*, 71 (5), 827-833.
- Barraud, S., Azzout, Y., Cres, F. N. y Chocat, B. (1999) Selection aid of alternative techniques in urban storm drainage - Proposition of an expert system. *Water Science & Technology*, 39 (4), 241-248.
- Bertalanffy, L. v. (2001) *Teoría general de los sistemas: fundamentos, desarrollo, aplicaciones*, México, D.F., Fondo de Cultura Económica.
- Bertrand-Krajewski, J.-L., Chebbo, G. y Saget, A. (1998) Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water Research*, 32 (8), 2341-2356.
- Bolinaga, J. (1979) *Drenaje Urbano*, Caracas, Instituto Nacional de Obras Sanitarias de Venezuela.
- Brito, D. S. (2006) *Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 117.
- Brombach, H., Weiss, G. y Fuchs, S. (2005) A new database on urban runoff pollution: comparison of separate and combined sewer systems. *Water Science and Technology*, 51 (2), 119-128.
- Burian, S. J. y Edwards, F. G. (2002) Historical perspectives of urban drainage. *9th International Conference on Urban Drainage*. Portland, United States.
- Burian, S. J., Nix, S. J., Durrans, S. R., Pitt, R. E., Fan, C.-Y. y Field, R. (1999) The historical development of wet-weather flow management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125 (1), 3-11.
- Butler, D. y Davies, J. W. (2004) *Urban Drainage*, London, E & FN Spon.
- Canter, L. W. (1998) *Manual de evaluación de impacto ambiental: técnicas para la elaboración de los estudios de impacto*, Madrid, Mc-Graw-Hill.
- Carleton, M. G. (1990) Separate and combined sewers. Experience in France and Australia. En Massing, H., Packman, J. y Zuidema, F. (Eds.) *Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas*. Wallingford, UK, International Association of Hydrological Sciences.
- COMFANDI (2006) Plan Parcial Las Vegas. Cali, Colombia, Caja de Compensación Familiar del Valle del Cauca – COMFANDI.
- De Toffol, S., Engelhard, C. y Rauch, W. (2007) Combined sewer system versus separate system – a comparison of ecological and economical performance indicators. *Water Science & Technology*, 55 (4), 255-264.
- Ellis, J. B., Revitt, D. M. y Scholes, L. (2008) The DayWater Multi-Criteria Comparator. En Thévenot, D. R. (Ed.) *DayWater: an Adaptive Decision Support System for Urban Stormwater Management*. London, IWA Publishing.
- EMCALI (1999) Normas para el Diseño de Sistemas de Alcantarillado. Cali, Colombia, Gerencia de Acueducto y Alcantarillado, Empresas Municipales de Cali.
- EMCALI (2000) Alcantarillados combinado y separado. Criterios de selección y consideraciones. Cali, Colombia, Departamento de Ingeniería, Gerencia de Acueducto y Alcantarillado, Empresas Municipales de Cali.
- EMCALI (2007) Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos 2007-2016. Cali, Colombia, Gerencia de Acueducto y Alcantarillado, Empresas Municipales de Cali.
- EMCALI e HIDRO-OCCIDENTE S.A. (2006) Estudio de Alternativas de Dotación de los Servicios Públicos de Acueducto, Alcantarillado y Complementario de Alcantarillado en la Zona de Expansión de la Ciudad de Cali Denominada "Corredor Cali-Jamundí". Cali, Colombia, Gerencia de Acueducto y Alcantarillado, Empresas Municipales de Cali.
- Galvis, A., Cardona, D. A. y Bernal, D. P. (2005) Modelo Conceptual de Selección de Tecnología para el Control de Contaminación por Aguas Residuales Domesticas en Localidades Colombianas Menores de 30.000 Habitantes, SELTAR. AGUA 2005. *Conferencia Internacional: De la Acción Local a las Metas Globales*. Cali, Colombia.
- Galvis, G., García, M., Visscher, J. T., Quiroga, E., Duque, R. y Restrepo, I. (1999) En la búsqueda de soluciones sostenibles. En IRC (Ed.) *Transferencia de Tecnología en el sector de agua y saneamiento en Colombia. Una experiencia de aprendizaje*. Cali, Colombia, IRC. Cinara. Universidad del Valle.

- García, M. y Galvis, G. (2000) Sostenibilidad en proyectos de abastecimiento de agua. *Seminario Taller Selección de Tecnología para el Mejoramiento de la Calidad del Agua*. Cali, Colombia.
- Giraldo, E. (2000) ¿Combinar o Separar? Una discusión con un siglo de antigüedad y de gran actualidad para los bogotanos. *Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes*, 11, 21-30.
- Glavič, P. y Lukman, R. (2007) Review of sustainability and their definitions. *Journal of Cleaner Production*, 15 (18), 1875-1885.
- IDEAM y CARINSA S.A. (2003) Manual General del ASAS. Cartagena, Colombia, IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Lara, J., Quijano, J., Riveros, D., Torres, A. y Forero, M. (2004) Utilización de sistemas expertos para la optimización de la toma de decisiones multicriterio. *XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. San Juan, Puerto Rico.
- López, R. (2006) Método racional en zona urbana. Bases conceptuales y aplicación en medio urbano. En Gómez, M. (Ed.) *Curso de Hidrología Urbana*. 6ª Edición ed. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Madge, B. (2004) Effective Use of BMPs in Stormwater Management. En U.S. EPA (Ed.) *The Use of Best Management Practices (BMPs) in Urban Watersheds*. Washington D.C., United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.
- Marsalek, J., Jiménez-Cisneros, B. E., Malmquist, P.-A., Karamouz, M., Goldenfum, J. y Chocat, B. (2006) *Urban Water Cycle Processes and Interactions*, Paris, International Hydrological Programme.
- Martin, C., Ruperd, Y. y Legret, M. (2007) Urban stormwater drainage management: The development of a multicriteria decision aid approach for best management practices. *European Journal of Operational Research*, 181 (1), 338-349.
- Meirlaen, J. (2002) *Immission based real-time control of the integrated urban wastewater system*. PhD Thesis, Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Gent Universiteit, Gent, 260.
- Metcalf & Eddy (1997) *Ingeniería de Aguas Residuales. Redes de alcantarillado y bombeo*, New York, Estados Unidos, McGraw – Hill.
- Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia (1995) Alcantarillados de flujo decantado. Guías Técnicas. Bogotá D.C.
- Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia (2000) Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2008. Título D. Bogotá D.C.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente de Brasil (1987) Redes de Alcantarillado Simplificado. Manual Técnico. Brasilia.
- Moriarty, P., Butterworth, J. y Batchelor, C. (2006) La gestión integrada de los recursos hídricos y el subsector de agua y saneamiento doméstico. IRC International Water and Sanitation Centre.
- Muthukrishnan, S., Field, R. y Sullivan, D. (2004) Types of Best Management Practices. En U.S. EPA (Ed.) *The Use of Best Management Practices (BMPs) in Urban Watersheds*. Washington D.C., United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.
- Perales, S. y Andrés-Doménech, I. (2007) Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia. *V Congreso Nacional de la Ingeniería Civil*. Sevilla, España.
- Porto, M. F. A. (2001) Water quality aspects of urban runoff. En Tucci, C. E. M. (Ed.) *Urban drainage in specific climates: urban drainage in humid tropics*. Paris, Francia, UNESCO Press.
- Reid, G. (Ed.) (1982) *Appropriate Methods of Treating - Water and Wastewater in Developing Countries*, Michigan, Estados Unidos, Ann Arbor Science Publishers.
- Restrepo, I. (2000) Saneamiento para pequeñas localidades. *Conferencia Internacional Agua y Saneamiento en Poblaciones Pequeñas y Medianas en el Marco de la Visión Mundial*. Cali, Colombia.
- Saldarriaga, J. (2008) Sistemas de drenaje urbano. En Saldarriaga, J. (Ed.) *Seminario Taller Diseño de Alcantarillados de Alta Tecnología II*. Cali, Colombia, Cátedra PAVCO - Universidad de los Andes.
- Sánchez, L. D. y Sánchez, A. (2004) Uso eficiente del agua. IRC International Water and Sanitation Centre.
- Selvakumar, A. (2004) BMP Costs. En U.S. EPA (Ed.) *The Use of Best Management Practices (BMPs) in Urban Watersheds*. Washington D.C., United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.
- Siebel, M. A. y Gijzen, H. J. (2002) Application of cleaner production concepts in urban water management. *Environmental Technology and Management Seminar*. Bandung, Indonesia.
- Stanko, Š. (2009) Combined versus Separated Sewer System in Slovakia. *International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*. Ohrid, Macedonia.
- Torres, A. (2004) *Apuntes de clase sobre hidrología urbana*, Bogotá D.C., Editorial Pontificia Universidad Javeriana.

- Triantaphyllou, E. (2000) *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- U.S. EPA (1999) Combined Sewer Overflow Management Fact Sheet. Pollution Prevention. EPA 832-F-99-038. Washington, D.C., United States Environmental Protection Agency, Office of Water.
- U.S. EPA (2000) Folleto informativo de sistemas descentralizados. Alcantarillado por gravedad de diámetro reducido. EPA 832-F-00-038. Washington, D.C., United States Environmental Protection Agency, Office of Water.
- United Nations (2008) An overview of urbanization, internal migration, population distribution and development in the world. UN/POP/EGM-URB/2008/01. New York, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- Universidad del Valle (2008) Urban Water Management for the City of Cali, Diagnosis Report. *Report produced by Sustainable Water Improves Tomorrow's Cities' Health - SWITCH Project*. Cali, Colombia, UNESCO-IHE.
- van Duijl, L. A. (1992) *Urban Drainage and Waste Water Collection I*, The Netherlands, IHE Delft.
- Veldkamp, R., Hermann, T., Colandini, V., Terwel, L. y Geldof, G. (1997) A decision network for urban water management. *Water Science & Technology*, 36 (8-9), 111-115.
- Vélez, C. (2007) *Optimization of Urban Wastewater Systems using Model Based Design and Control "MoDeCo"*. PhD Proposal, UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, 95.
- Visscher, J. T. (2005) Transferencia de tecnología en perspectiva. *AGUA 2005. Seminario Internacional: Visión Integral en el Mejoramiento de la Calidad del Agua*. Cali, Colombia.
- Visscher, J. T., Quiroga, E., García, M. y Galvis, G. (1999) De transferir hacia compartir. En IRC (Ed.) *Transferencia de Tecnología en el sector de agua y saneamiento en Colombia. Una experiencia de aprendizaje*. Cali, Colombia, IRC. Cinara. Universidad del Valle.
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R. y Shaffer, P. (2007) *The SUDS manual*, London, UK, CIRIA.
- WSP (2004) Tecnologías alternativas de saneamiento. En Water and Sanitation Program (Ed.) *Simposio internacional de tecnologías alternativas para la provisión de servicios de agua y saneamiento en pequeñas localidades*. Lima, Perú.
- WSP (2007) *La ciudad y el saneamiento. Sistemas condominiales: Un enfoque diferente para los desagües sanitarios urbanos*, Lima, Perú.

URL

- URL-1. <http://isi.tu-dresden.de/twiki/bin/view/CD4WC/TypesOfSewerSystemD21> Types of Sewer System. Literature Review on General Aspects. Dissemination Platform for the EU Project CD4WC. Consulta Septiembre de 2009.

ANEXO 1

Formato utilizado en la ponderación de factores y criterios para seleccionar tecnologías de drenaje en localidades urbanas ubicadas en la cuenca del Río Cauca

1. Ponderación de factores y criterios para la selección de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

Factor	Criterio	Peso (%)	
		Criterio	Factor
Técnico	Control hidráulico		
	Mejoramiento de la calidad del escurrimiento		
	Opción de reuso del agua de escurrimiento		
O&M	Requerimientos de mantenimiento		
Urbanístico	Estética y amenidad		
Costos	Costos inversión		
	Costos O&M		

La sumatoria de pesos de los factores debe ser igual al 100%.

La sumatoria de pesos de los criterios pertenecientes a un mismo factor debe ser igual al peso del factor.

2. Ponderación de factores y criterios para la selección de la tecnología de drenaje de aguas de escorrentía: alcantarillado combinado o alcantarillado pluvial

Factor	Criterio	Peso (%)	
		Criterio	Factor
Técnico	Topografía		
	Tipo de drenaje proyectado para las aguas residuales		
Impacto en la calidad del cuerpo receptor	Control a descargas contaminantes del primer lavado		
	Capacidad de dilución y asimilación del cuerpo receptor		
O&M	Complejidad de O&M		
Institucional	Capacidad de control de conexiones erradas		

La sumatoria de pesos de los factores debe ser igual al 100%.

La sumatoria de pesos de los criterios pertenecientes a un mismo factor debe ser igual al peso del factor.

3. Calificación de las tecnologías en función de las variables

3.1 Tipo de drenaje proyectado para las aguas residuales

Califique de 0 a 5 la competitividad del alcantarillado combinado y del alcantarillado pluvial dependiendo del porcentaje de agua residual a drenar por bombeo:

% del AR a drenar por bombeo	Competitividad de la tecnología	
	Alcantarillado Combinado	Alcantarillado Pluvial
51 – 100%		
21 – 50%		
0 – 20%		
0%*		

Escala de competitividad: 0: Tecnología no recomendada 1: Muy baja 2: Baja 3: Media 4: Alta 5: Muy alta

* Caso en el que toda el agua es drenada por gravedad.

3.2 Complejidad de O&M

Califique de 0 a 5 la complejidad para la prestación de los servicios de O&M listados a continuación, de acuerdo al tipo de alcantarillado. Complejidad entendida como demanda de equipos, materiales, métodos y personal, o la frecuencia para la realización de estas labores.

Servicios de O&M requeridos	Complejidad	
	Alcantarillado Combinado	Alcantarillado Pluvial
Inspección y limpieza de colectores		
Inspección, limpieza y reparación de estructuras de separación		
Inspección y mantenimiento de estructuras de entrega al cuerpo receptor		
Inspección de conexiones domiciliarias al sistema		
Disposición de los lodos extraídos		

Escala de complejidad: 0: No aplica 1: Muy baja 2: Baja 3: Media 4: Alta 5: Muy alta

3.3 Capacidad de control de conexiones erradas

Califique el grado de importancia de las siguientes actividades para el control de conexiones erradas:

Institución Responsable	Actividad	Grado de importancia
Empresa prestadora del servicio de alcantarillado	Campañas educativas en la comunidad sobre funcionamiento y uso del sistema de alcantarillado	
	Seguimiento de los resultados alcanzados con las campañas educativas	
	Conexión realizada por personal calificado	
	Inspección y mantenimiento regular de componentes del sistema	
Entidad encargada del control urbanístico	Control de asentamientos de desarrollo incompleto en zonas aledañas	
	Control de nuevas viviendas y/o modificaciones	

Grado de importancia: 1: Muy poco importante 2: Poco importante 3: Importancia media 4: Muy importante 5: Extremadamente importante

ANEXO 2

Guía del Usuario del Modelo Conceptual de Selección de Tecnología para la Recolección y Transporte de Aguas Lluvias y Aguas Residuales en Áreas Urbanas

Bloque 1. Prevención de la Contaminación

En el capítulo 7.2.1 se describen las cinco prácticas de prevención de la contaminación que deben ser implementadas en el área de futuro desarrollo, con el objetivo reducir la carga contaminante vertida por el sistema de drenaje al cuerpo receptor.

Bloque 2. Infiltración y Almacenamiento de la Escorrentía

Actividades Tipo F: Entrada de Datos

F2.1 Tipo de espacio público disponible para la construcción de SUDS

- ☐ Parque
- ☐ Zona verde
- ☐ Espacio abierto
- ☐ Ciclo ruta
- ☐ Área peatonal
- ☐ Parqueadero de vehículos livianos

F2.2 Tasa de infiltración del suelo natural en el espacio disponible

Tasa de infiltración _____ mm/h

F2.3 Profundidad del nivel freático estacional más alto en el espacio disponible

Profundidad del nivel freático _____ m

F2.4 Área tributaria a drenar al SUDS ¹

Área tributaria al SUDS _____ ha

F2.5 Área de drenaje total

Área de drenaje total _____ ha

F2.6 Área drenada por SUDS (igual a F2.5 si los SUDS son potencialmente aplicables)

Área drenada por SUDS _____ ha

Actividades Tipo B: Procedimientos

B2.1 Cálculo del área remanente del drenaje por SUDS

$$A_{R\ SUDS} = A_T - A_{SUDS} \quad (B2.1)$$

$A_{R\ SUDS}$ área remanente del drenaje por SUDS (ha)
 A_T área de drenaje total (ha), registrada en F2.6
 A_{SUDS} área drenada por SUDS (ha), registrada en F2.7

¹ Área que puede drenar al SUDS la escorrentía generada durante un evento de lluvia. Esta área puede corresponder a una parte o al área total del desarrollo urbano.

Actividades Tipo S: Preselección y Selección

S2.1 Preselección en función del tipo de espacio disponible

Tipo de espacio disponible	Tecnologías
Parques	Depósito de infiltración, Depósito de detención, Estanque de retención, Humedal construido
Zonas verdes	
Espacios abiertos	
Ciclo rutas	Pavimento poroso
Áreas peatonales	
Parqueadero de vehículos livianos	

S2.2 Preselección en función de las características del terreno y área tributaria

Tecnología	Tasa de infiltración requerida (mm/h)	Nivel freático* (m)	Área tributaria (ha)
Depósito de infiltración	12 - 76	≥ 1.2	≤ 5.0
Pavimento poroso	≥ 12	≥ 0.6	***
Depósito de detención	**	≥ 1.0	≥ 4.0
Estanque de retención	**	≥ 1.0	≥ 6.0
Humedal construido	**	≥ 1.0	≥ 8.0

* Nivel freático estacional más alto ** No es un factor influyente en la tecnología

*** Relación área tributaria : área de pavimento poroso = 3:1

S2.3 Selección de la tecnología preseleccionada en S2.2

Si luego de realizar las preselecciones S2.1 y S2.2, solo una tecnología SUDS es potencialmente aplicable, esta será la tecnología seleccionada en S2.3.

Actividades Tipo M: Decisión Multicriterio

M2.1 Selección Multicriterio de SUDS

Seleccione la alternativa que mejor se adapta al contexto particular, utilizando los puntajes P_{WSM} del Cuadro M2.1. La tecnología SUDS con el mayor puntaje P_{WSM} , corresponde a la mejor opción entre las tecnologías SUDS potencialmente aplicables.

Cuadro M2.1 Matriz para la selección multicriterio de SUDS

Criterio	Peso (%) w_j	Rendimiento de la alternativa a_{ij}			
		DI	DD	ER	HC
Control hidráulico	18.9	4	5	5	4
Mejoramiento de la calidad del escurrimiento superficial	11.3	5	2	2	4
Opción de reuso del agua de escurrimiento	7.3	0	0	5	3
Requerimientos de mantenimiento	21.5	4	3	2	1
Estética y amenidad	14.5	3	4	5	5
Costos inversión	13.7	5	3	3	2
Costos O&M	12.8	2	5	2	1
P_{WSM}		3.56	3.45	3.36	2.77

DI - Depósito de infiltración DD - Depósito de detención ER - Estanque de retención HC - Humedal construido

Bloque 3. Drenaje Superficial

Actividades Tipo F: Entrada de Datos

F3.1 Existe una red de cauces naturales en el área de desarrollo

Si _____

No _____

F3.2 Área tributaria a drenar superficialmente

Área tributaria _____ ha

F3.3 Intensidad de la lluvia de diseño

Intensidad de la lluvia _____ mm/h

F3.4 Coeficiente de escorrentía promedio del área tributaria

Coeficiente de escorrentía _____

F3.5 Pendiente transversal de la vía

Pendiente _____ m/m

F3.6 Profundidad máxima de la lámina de agua sobre la vía

Profundidad _____ cm

F3.7 Pendiente longitudinal de la vía

Pendiente _____ m/m

F3.8 Área remanente del drenaje por SUDS (Calculado en B2.1)

Área remanente SUDS _____ ha

F3.9 Área drenada superficialmente (igual a F3.2 si el drenaje superficial es factible)

Área drenada superficialmente _____ ha

Actividades Tipo B: Procedimientos

B3.1 Cálculo del caudal de diseño

$$Q_{DS} = C \cdot I \cdot A_{DS} \cdot 2.777 \quad (B3.1)$$

Q_{DS} caudal a drenar superficialmente (l/s)

C coeficiente de escorrentía promedio del área tributaria

I intensidad de la lluvia de diseño (mm/h)

A_{DS} área tributaria a drenar superficialmente (ha)

B3.2 Cálculo de la capacidad hidráulica de la vía

La ecuación B3.2 permite calcular la capacidad hidráulica de vías con pendiente transversal constante hacia uno de los lados. Para vías simétricas, con pendiente transversal constante hacia ambos lados, multiplicar por dos el resultado de la Ecuación B3.2.

$$Q_V = 0.00175 \left(\frac{Z}{n} \right) S^{1/2} y^{8/3} \quad (\text{B3.2})$$

Q_V	capacidad hidráulica de la vía (l/s)
Z	es $1/S_x$, siendo S_x la pendiente transversal de la vía (m/m)
n	coeficiente de rugosidad de Manning ($n = 0.016$ para vías de concreto y asfalto)
S	pendiente longitudinal de la vía (m/m)
y	profundidad máxima de la lámina de agua sobre la vía (cm)

Para calcular la capacidad hidráulica de vías con dos pendientes transversales, una correspondiente a la cuneta y la otra correspondiente a la vía en sí, modificar la variable Z de la ecuación B3.2 utilizando la ecuación 7.62 de Bolinaga (1979).

B3.3 Cálculo del área remanente del drenaje superficial

$$A_{RDS} = A_{RSUDS} - A_{DS} \quad (\text{B3.3})$$

A_{RDS}	área remanente del drenaje superficial (ha)
A_{RSUDS}	área remanente del drenaje por SUDS (ha), registrada en F3.8
A_{DS}	área drenada superficialmente (ha), registrada en F3.9

Actividades Tipo S: Preselección y Selección

S3.1 Selección del Drenaje Superficial

Si $Q_V \geq Q_{DS}$, es factible drenar superficialmente el área tributaria registrada en F3.2

Si $Q_V < Q_{DS}$, no es factible drenar superficialmente el área tributaria registrada en F3.2

Donde:

Q_V	capacidad hidráulica de la vía (l/s)
Q_{DS}	caudal a drenar superficialmente (l/s)

Bloque 4. Drenaje Combinado vs. Drenaje Separado

Actividades Tipo F: Entrada de Datos

F4.1 Pendiente predominante para la instalación de colectores principales²

- ☐ $\geq 1.1\%$
- ☐ $1.1\% - 0.6\%$
- ☐ $0.6\% - 0.25\%$
- ☐ $< 0.25\%$

F4.2 Diámetro del colector o colectores principales

- ☐ 10"
- ☐ 12" - 18"
- ☐ 20" - 39"
- ☐ $> 39"$

F4.3 Proporción del agua residual a drenar por bombeo

- ☐ 51 - 100%
- ☐ 21 - 50%
- ☐ 0 - 20%

F4.4 Área drenada por SUDS (dato solicitado en F2.7)

Área drenada por SUDS _____ ha

F4.5 Área de drenaje total (dato solicitado en F2.6)

Área de drenaje total _____ ha

F4.6 SUDS seleccionado en el Bloque 2 (seleccionado, según el caso, en el ítem S2.3 o M2.1)

- ☐ Depósito de infiltración
- ☐ Depósito de detención
- ☐ Estanque de retención
- ☐ Humedal construido
- ☐ Pavimento poroso

F4.7 Tipo de información disponible para evaluar el impacto de las descargas del periodo de lluvias en la calidad del agua del cuerpo receptor

- ☐ Información tipo 1: modelo hidráulico y de calidad de agua calibrado para el cuerpo receptor en estudio, polutogramas e hidrogramas de descarga tipo para RSC (*rebores del sistema combinado*) y DSP (*descargas del sistema pluvial*)
- ☐ Información tipo 2: caudal del cuerpo receptor en periodo seco y caudal de esorrentía pico (si la información disponible es tipo 2, continúe en F4.11)

F4.8 Modelo hidráulico y calidad de agua calibrado para el cuerpo receptor en estudio

(Requerido solo si la información disponible en F4.7 es tipo 1)

² La pendiente predominante es la pendiente promedio del terreno donde al menos el 50% de los colectores principales quedarán instalados. Los colectores principales son los que conducen el flujo en el sentido natural del escurrimiento.

F4.9 Hidrogramas de descarga tipo para RSC y DSP

(Requerido solo si la información disponible en F4.7 es tipo 1)

F4.10 Polutogramas de descarga tipo para RSC y DSP

(Requerido solo si la información disponible en F4.7 es tipo 1)

F4.11 Caudal del cuerpo receptor en periodo seco antes de la descarga³

Caudal del cuerpo receptor _____ l/s

F4.12 Caudal de escorrentía pico generado por el área de drenaje remanente (área calculada en B3.3)

Caudal de escorrentía _____ l/s

F4.13 Actividades a ejecutar para el control de conexiones erradas por parte de la empresa prestadora del servicio de alcantarillado

1. Probabilidad de realizar campañas educativas sobre el funcionamiento y uso del sistema de alcantarillado

- | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Muy alta | <input type="checkbox"/> Alta | <input type="checkbox"/> Media |
| <input type="checkbox"/> Baja | <input type="checkbox"/> Muy baja | <input type="checkbox"/> No probable |

2. Probabilidad de hacer seguimiento a los resultados alcanzados con las campañas educativas

- | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Muy alta | <input type="checkbox"/> Alta | <input type="checkbox"/> Media |
| <input type="checkbox"/> Baja | <input type="checkbox"/> Muy baja | <input type="checkbox"/> No probable |

3. Probabilidad de que la conexión al sistema de alcantarillado sea realizada por personal calificado

- | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Muy alta | <input type="checkbox"/> Alta | <input type="checkbox"/> Media |
| <input type="checkbox"/> Baja | <input type="checkbox"/> Muy baja | <input type="checkbox"/> No probable |

4. Probabilidad de realizar inspección y mantenimiento regular de componentes del sistema

- | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Muy alta | <input type="checkbox"/> Alta | <input type="checkbox"/> Media |
| <input type="checkbox"/> Baja | <input type="checkbox"/> Muy baja | <input type="checkbox"/> No probable |

F4.14 Actividades a ejecutar para el control de conexiones erradas por parte de la entidad encargada del control urbanístico

1. Probabilidad de ejecutar actividades para el control de asentamientos de desarrollo incompleto en zonas aledañas

- | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Muy alta | <input type="checkbox"/> Alta | <input type="checkbox"/> Media |
| <input type="checkbox"/> Baja | <input type="checkbox"/> Muy baja | <input type="checkbox"/> No probable |

2. Probabilidad de ejecutar actividades para el control de nuevas viviendas y/o modificaciones

- | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Muy alta | <input type="checkbox"/> Alta | <input type="checkbox"/> Media |
| <input type="checkbox"/> Baja | <input type="checkbox"/> Muy baja | <input type="checkbox"/> No probable |

³ Si existe información estadística, este dato corresponde al 80% del caudal de permanencia de la fuente. En caso de no contar con esta información, realizar aforo de la fuente receptora en periodo seco.

Actividades Tipo A: Criterios

A4.1 Reid, 1982

La capacidad de dilución está relacionada con la utilización del caudal transportado por el cuerpo receptor para atenuar el impacto de los contaminantes de un determinado vertido. Un indicador de dicha capacidad es el factor de dilución entendido como la relación entre el caudal disponible en la fuente y el caudal vertido. Los caudales tanto del efluente como del cuerpo receptor pueden ser los caudales de los períodos secos.

Reid (1982) considera una relación de 40:1 para la dilución de aguas residuales en cuerpos hídricos en movimiento. Este valor corresponde a la relación entre el caudal mínimo del cuerpo receptor durante siete días en época de estiaje versus el caudal de agua residual en el mismo periodo y durante siete días. Para la dilución de las descargas del periodo de lluvias en el cuerpo receptor, se considera en la guía de selección un factor de dilución de 40 como resultado de relacionar el caudal de la fuente en periodo seco y el caudal de escorrentía pico.

Actividades Tipo B: Procedimientos

B4.1 Cálculo del porcentaje de área drenada por SUDS

$$P_{SUDS} = \frac{A_{SUDS}}{A_T} \times 100 \quad (B4.1)$$

P_{SUDS} porcentaje de área drenada por SUDS (%)
 A_{SUDS} área drenada por SUDS (ha)
 A_T área de drenaje total (ha)

B4.2 Modelación del impacto de RSC y DSP en la calidad del agua del cuerpo receptor

Modelar la calidad del agua del cuerpo receptor para estudiar dos casos: primero, el impacto de los RSC del alcantarillado combinado, y segundo, el impacto de los DSP del alcantarillado pluvial. Las modelaciones se deben realizar para situaciones hidrológicas críticas de bajos caudales en el cuerpo receptor y descargas máximas de RSC y DSP.

Los parámetros a modelar serán aquellos que afecten la calidad del agua requerida para garantizar los usos de la fuente receptora aguas abajo de las descargas. Dicha calidad se encuentra estipulada para cada uso en el Decreto 1594 de 1984 o en aquel que lo sustituya.

B4.3 Cálculo del factor de dilución

$$S = \frac{Q_a}{Q_e} \quad (B4.2)$$

S factor de dilución
 Q_a caudal del cuerpo receptor en periodo seco (l/s)
 Q_e caudal de escorrentía pico (l/s)

B4.4 Estimación de la capacidad de control de conexiones erradas

Para estimar la capacidad de control de conexiones erradas, siga el procedimiento descrito a continuación:

1. Utilice el Cuadro B4.1 para convertir en valores numéricos las probabilidades ingresadas en los ítems F4.13 y F4.14.
2. En la columna A del Cuadro B4.2, asigne la probabilidad de ejecución de cada actividad de acuerdo al valor numérico obtenido en el paso 1.
3. Para cada actividad del Cuadro B4.2, calcule el puntaje de la capacidad de control multiplicando la probabilidad de ejecución (columna A) con la importancia de la actividad (Columna B).
4. Sume los puntajes de la capacidad de control de todas las actividades, para hallar el indicador de la capacidad de control.
5. Utilice el indicador obtenido en el paso 4 y el Cuadro B4.3 para estimar cualitativamente la capacidad de control de conexiones erradas.

Cuadro B4.1 Valores numéricos asociados a la probabilidad de ejecutar una actividad

Probabilidad de ejecutar la actividad	
Valor Descriptivo	Valor Numérico
Muy alta	5
Alta	4
Media	3
Baja	2
Muy baja	1
No probable	0

Cuadro B4.2 Matriz para la calificación de la capacidad de control de conexiones erradas

Actividad para el control de conexiones erradas	(A) Probabilidad de ejecución	(B) Importancia de la actividad*	(A × B) Puntaje capacidad de control
Campañas educativas sobre el funcionamiento y uso del sistema de alcantarillado		4.2	
Seguimiento de los resultados alcanzados con las campañas educativas		4.0	
Conexión realizada por personal calificado		4.2	
Inspección y mantenimiento regular de componentes del sistema		3.9	
Control de asentamientos de desarrollo incompleto en zonas aledañas		4.1	
Control de nuevas viviendas y/o modificaciones		4.3	
Indicador capacidad de control			

*Importancia: 1: Muy poco importante 2: Poco importante 3: Importancia media 4: Muy importante
5: Extremadamente importante

Cuadro B4.3 Capacidad de control de conexiones erradas en función del valor del indicador

Indicador	Capacidad de control de conexiones erradas
≥ 87	Alta
51 - 86	Media
≤ 50	Baja

Actividades Tipo P: Puntajes de rendimiento

P4.1 Puntajes en función de la topografía

Utilice los datos de entrada F4.1 y F4.2 para obtener del Cuadro P4.1 el puntaje de rendimiento de cada alternativa respecto a la pendiente predominante y al diámetro del colector principal. Luego, en el Cuadro M4.1, asigne dichos puntajes en las celdas correspondientes al criterio: *topografía*.

Cuadro P4.1 Rendimiento de las alternativas respecto a la pendiente predominante y al diámetro del colector principal

Pendiente predominante (%)	Diámetro del colector o colectores principales							
	10"		12" - 18"		20" - 39"		> 39"	
	C	P	C	P	C	P	C	P
≥ 1.1	5	5	5	5	5	5	5	5
1.1 - 0.6	3	5	5	5	5	5	5	5
0.6 - 0.25	1	3	3	5	5	5	5	5
< 0.25	NR	1	1	3	3	5	5	5

C: Alcantarillado Combinado P: Alcantarillado Pluvial

Rendimiento: 5: Alto 3: Medio 1: Bajo NR: Tecnología no recomendada

P4.2 Puntajes en función del drenaje por gravedad del agua residual

En las celdas del Cuadro M4.1 correspondientes al criterio *tipo de drenaje de aguas residuales*, asigne los puntajes de rendimiento presentados en el Cuadro P4.2.

Cuadro P4.2 Rendimiento de las alternativas respecto al drenaje por gravedad del agua residual

Alternativa	Rendimiento
Alcantarillado Combinado	4
Alcantarillado Pluvial	3

Rendimiento: 5: Muy alto 4: Alto 3: Medio 2: Bajo 1: Muy bajo

P4.3 Puntajes en función de la proporción del agua residual a drenar por bombeo

Utilice el dato de entrada F4.3 para obtener del Cuadro P4.3 el puntaje de rendimiento de cada alternativa respecto al porcentaje de agua residual a drenar por bombeo. Luego, en el Cuadro M4.1, asigne dichos puntajes en las celdas correspondientes al criterio: *tipo de drenaje de aguas residuales*.

Cuadro P4.3 Rendimiento de las alternativas respecto al porcentaje de agua residual a drenar por bombeo

% del agua residual a drenar por bombeo	Rendimiento de la alternativa	
	Alcantarillado Combinado	Alcantarillado Pluvial
51 – 100%	1	4
21 – 50%	2	4
0 – 20%	3	3

Rendimiento: 5: Muy alto 4: Alto 3: Medio 2: Bajo 1: Muy bajo

P4.4 Puntajes en función de la descarga del primer lavado

En las celdas del Cuadro M4.1 correspondientes al criterio *control a descargas contaminantes del primer lavado*, asigne los puntajes de rendimiento presentados en el Cuadro P4.4.

Cuadro P4.4 Rendimiento de las alternativas respecto a la descarga del primer lavado

Alternativa	Rendimiento
Alcantarillado Combinado	4
Alcantarillado Pluvial	2

Rendimiento: 5: Muy alto 4: Alto 3: Medio 2: Bajo 1: Muy bajo

P4.5 Puntajes en función del SUDS utilizado para control del primer lavado

Utilice el resultado del procedimiento B4.1 y el dato de entrada F4.6 para obtener del Cuadro P4.5 el puntaje de rendimiento de cada alternativa respecto al SUDS seleccionado en el Bloque 2. Luego, en el Cuadro M4.1, asigne dichos puntajes en las celdas correspondientes al criterio: *control a descargas contaminantes del primer lavado*.

Cuadro P4.5 Rendimiento de las alternativas respecto al SUDS seleccionado en el Bloque 2

SUDS	% de área drenada por SUDS			
	< 20%		≥ 20%	
	C	P	C	P
Depósito de infiltración	4	3	4.5	4
Depósito de detención	4	3	4.5	4
Estanque de retención	4.5	3.5	5	4.5
Humedal construido	4.5	3.5	5	4.5
Pavimento poroso	4.5	3.5	5	4.5

C: Alcantarillado Combinado P: Alcantarillado Pluvial

Rendimiento: 5: Muy alto 4: Alto 3: Medio 2: Bajo 1: Muy bajo

P4.6 Puntajes en función del impacto de RSC y DSP en la calidad del cuerpo receptor

Con base en los resultados de las modelaciones realizadas en B4.2, califique el rendimiento de cada alternativa utilizando una escala de puntuación similar a la del Cuadro P4.4. Posteriormente, en el Cuadro M4.1, asigne estos puntajes de rendimiento en las celdas correspondientes al criterio: *capacidad de dilución y asimilación del cuerpo receptor*.

Previo a la calificación del rendimiento, se debe haber identificado la alternativa cuyas descargas del periodo de lluvias, genera el menor impacto en la calidad del agua del cuerpo receptor. Esa alternativa tendrá un mejor rendimiento frente a la otra en lo que se refiere con este criterio.

P4.7 Puntajes en función de la capacidad de dilución del cuerpo receptor

En las celdas del Cuadro M4.1 correspondientes al criterio *capacidad de dilución y asimilación del cuerpo receptor*, asigne los puntajes de rendimiento presentados en el Cuadro P4.6.

Cuadro P4.6 Rendimiento de las alternativas respecto a la capacidad de dilución

Alternativa	Rendimiento
Alcantarillado Combinado	4
Alcantarillado Pluvial	4

Rendimiento: 5: Muy alto 4: Alto 3: Medio 2: Bajo 1: Muy bajo

P4.8 Puntajes en función de la calidad de las descargas del periodo de lluvias

En las celdas del Cuadro M4.1 correspondientes al criterio *capacidad de dilución y asimilación del cuerpo receptor*, asigne los puntajes de rendimiento presentados en el Cuadro P4.7.

Cuadro P4.7 Rendimiento de las alternativas respecto a la calidad de las descargas del periodo de lluvias

Alternativa	Rendimiento
Alcantarillado Combinado	2
Alcantarillado Pluvial	3

Rendimiento: 5: Muy alto 4: Alto 3: Medio 2: Bajo 1: Muy bajo

P4.9 Puntajes en función de la complejidad de O&M

En las celdas del Cuadro M4.1 correspondientes al criterio *complejidad de O&M*, asigne los puntajes de rendimiento presentados en el Cuadro P4.8.

Cuadro P4.8 Rendimiento de las alternativas respecto a la complejidad de O&M

Alternativa	Rendimiento
Alcantarillado Combinado	2
Alcantarillado Pluvial	3

Rendimiento: 5: Muy alto 4: Alto 3: Medio 2: Bajo 1: Muy bajo

P4.10 Puntajes en función de la capacidad de control de conexiones erradas

Utilice el resultado del procedimiento B4.4 para obtener del Cuadro P4.9 el puntaje de rendimiento de cada alternativa respecto a la capacidad de control de conexiones erradas. Luego, en el Cuadro M4.1 asigne dichos puntajes en las celdas correspondientes al criterio: *capacidad de control de conexiones erradas*.

Cuadro P4.9 Rendimiento de las alternativas respecto a la capacidad de control de conexiones erradas

Capacidad de control de conexiones erradas	Rendimiento de la alternativa	
	Alcantarillado Combinado	Alcantarillado Pluvial
Alta	5	5
Media	5	3
Baja	5	1

Actividades Tipo M: Decisión Multicriterio

M4.1 Selección Multicriterio del tipo de drenaje de aguas de escorrentía

Cuadro M4.1 Matriz para la selección multicriterio del tipo de drenaje de aguas de escorrentía

Criterio	Peso (%) w_j	Rendimiento de la alternativa a_{ij}	
		Alc. Combinado	Alc. Pluvial
Topografía	19.0		
Tipo de drenaje proyectado para las aguas residuales	15.5		
Control a descargas contaminantes del primer lavado	11.5		
Capacidad de dilución y asimilación del cuerpo receptor	17.0		
Complejidad de O&M	18.5		
Capacidad de control de conexiones erradas	18.5		
P_{WSM}			

Una vez asignados en el Cuadro M4.1 los puntajes de rendimiento de cada alternativa respecto a cada criterio, siga el procedimiento descrito a continuación para seleccionar el tipo de drenaje para las aguas de escorrentía:

1. Calcule para cada alternativa el puntaje P_{WSM} utilizando la siguiente ecuación:

$$P_{WSM} = \sum_{j=1}^6 a_{ij} w_j \quad (M4.1)$$

P_{WSM} puntaje de la suma ponderada de la alternativa i
 a_{ij} rendimiento de la alternativa i en términos del criterio de decisión j
 w_j ponderación del criterio j

2. Compare los resultados obtenidos en el paso 1 y seleccione como alternativa para el drenaje de las aguas de escorrentía, aquella con el mayor puntaje P_{WSM} .

Bloque 5. Drenaje de Aguas Residuales

Actividades Tipo F: Entrada de Datos

F5.1 Densidad poblacional en el área de futuro desarrollo

Densidad poblacional _____ hab/ha

F5.2 Porcentaje de habitantes que aceptan el ASAS como opción para el drenaje de aguas residuales⁴

Porcentaje _____ %

F5.3 Existen espacios públicos disponibles para la instalación de tanques interceptores

Si _____

No _____

Actividades Tipo S: Preselección y Selección

S5.1 Selección del alcantarillado combinado para el drenaje de aguas residuales

Seleccione el alcantarillado combinado para drenar las aguas residuales, si en el Bloque 4 esta tecnología fue seleccionada como la mejor opción para drenar las aguas de escorrentía.

S5.2 Selección del ASAS para el drenaje de aguas residuales

Seleccione el alcantarillado sin arrastre de sólidos (ASAS) para drenar las aguas residuales generadas en el ambiente urbano.

S5.3 Selección del alcantarillado simplificado para el drenaje de aguas residuales

Seleccione el alcantarillado simplificado para drenar las aguas residuales generadas en el ambiente urbano.

S5.4 Selección del alcantarillado sanitario convencional para el drenaje de aguas residuales

Seleccione el alcantarillado sanitario convencional para drenar las aguas residuales generadas en el ambiente urbano.

⁴ Para obtener la percepción comunitaria sobre la aceptación del ASAS en el área de futuro desarrollo, identifique una comunidad de estrato socioeconómico y tipo de desarrollo urbano similar a la del área en estudio. Luego, con base en una fórmula estadística, obtenga una muestra representativa de viviendas y realice la consulta para obtener este dato.

ANEXO 3

Calificación del rendimiento de las alternativas respecto a criterios de selección utilizados en el Bloque 4

A3.1 Calificación del rendimiento de las alternativas respecto al criterio topografía

A continuación se describe el procedimiento mediante el cual se calificó el rendimiento de los alcantarillados combinado y pluvial respecto al criterio topografía.

- (1) Cálculo de la pendiente requerida para la autolimpieza de colectores de ambas alternativas. Esta pendiente se calculó con las Ecuaciones A3.1 y A3.2.

$$S = \frac{\sigma}{\rho g R} \quad \text{Ecuación A3.1}$$

Donde S es la pendiente del colector (m/m), σ es el esfuerzo cortante del flujo (N/m^2), ρ es la densidad del agua (kg/m^3), g es la aceleración de la gravedad (m^2/s) y R es el radio hidráulico (m). Este último se calcula con la Ecuación A3.2

$$R = c D \quad \text{Ecuación A3.2}$$

Donde R es el radio hidráulico (m), c es una constante que es función de la relación entre la profundidad del flujo y el diámetro del colector, y D el diámetro del colector (m).

En los cálculos se utilizó el esfuerzo cortante medio exigido por el Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia (2008) y los diámetros comerciales de las tuberías de PVC de PAVCO. Para mantener el comportamiento autolimpiante del flujo en colectores pluviales se debe garantizar un esfuerzo cortante medio mayor o igual a 1.5 N/m^2 para el 10% de la capacidad a tubo lleno. En colectores combinados el esfuerzo cortante medio a garantizar es también de 1.5 N/m^2 , pero no se especifica para que porcentaje de la capacidad a tubo lleno. Dado que los colectores combinados transportan agua residual durante periodos secos, el cálculo se realizó para el 1% de la capacidad a tubo lleno; valor recomendado por algunos expertos consultados. Los resultados obtenidos para cada alternativa se presentan en los Cuadros A3.1 y A3.2.

Cuadro A3.1 Pendiente requerida en colectores combinados para garantizar su autolimpieza

Diámetro nominal (")	Diámetro interno (m)	R (m)	Pendiente colector (%)	σ (N/m^2)
10	0,227	0,0143	1,1	1,50
12	0,284	0,0179	0,85	1,50
14	0,327	0,0206	0,74	1,50
16	0,362	0,0228	0,67	1,50
18	0,407	0,0256	0,60	1,50
20	0,452	0,0285	0,54	1,50
24	0,595	0,0375	0,41	1,50
27	0,671	0,0423	0,36	1,50
30	0,747	0,0471	0,32	1,50
33	0,823	0,0518	0,29	1,50
36	0,899	0,0566	0,27	1,50
39	0,975	0,0614	0,25	1,50
42	1,051	0,0662	0,23	1,50
45	1,127	0,0710	0,22	1,50
48	1,203	0,0758	0,20	1,50
51	1,295	0,0816	0,19	1,50
54	1,355	0,0854	0,18	1,50
60	1,507	0,0949	0,16	1,50

Cuadro A3.2 Pendiente requerida en colectores pluviales para garantizar su autolimpieza

Diámetro nominal (")	Diámetro interno (m)	R (m)	Pendiente colector (%)	σ (N/m ²)
10	0,227	0,0328	0,47	1,50
12	0,284	0,0410	0,37	1,50
14	0,327	0,0473	0,32	1,50
16	0,362	0,0523	0,29	1,50
18	0,407	0,0588	0,26	1,50
20	0,452	0,0653	0,23	1,50
24	0,595	0,0860	0,18	1,50
27	0,671	0,0970	0,16	1,50
30	0,747	0,1079	0,14	1,50
33	0,823	0,1189	0,13	1,50
36	0,899	0,1299	0,12	1,50
39	0,975	0,1409	0,11	1,50
42	1,051	0,1519	0,10	1,50
45	1,127	0,1629	0,09	1,50
48	1,203	0,1738	0,09	1,50
51	1,295	0,1871	0,08	1,50
54	1,355	0,1958	0,08	1,50
60	1,507	0,2178	0,07	1,50

- (2) Asignación de los puntajes de rendimiento. A partir de los resultados obtenidos en los Cuadros A3.1 y A3.2, se definieron rangos de pendiente predominante del terreno y rangos de diámetro de colectores principales para facilitar la calificación del rendimiento de cada alternativa. Se entiende por pendiente predominante a la pendiente media del terreno donde al menos el 50% de los colectores principales quedaran instalados, y por colectores principales a aquellos que se instalan para conducir el flujo en el sentido natural del escurrimiento. En la calificación el mejor rendimiento fue asignado a la alternativa que requería de una pendiente de autolimpieza menor a la pendiente del terreno. En el Cuadro A3.3 se presentan los resultados de la calificación.

Cuadro A3.3 Rendimiento de las alternativas respecto a la pendiente del sitio y al diámetro de colectores

Pendiente predominante (%)	Diámetro de colectores principales							
	10"		12" - 18"		20" - 39"		> 39"	
	AC	AP	AC	AP	AC	AP	AC	AP
≥ 1.1	5	5	5	5	5	5	5	5
1.1 - 0.6	3	5	5	5	5	5	5	5
0.6 - 0.25	1	3	3	5	5	5	5	5
< 0.25	NR	1	1	3	3	5	5	5

AC: Alcantarillado Combinado; AP: Alcantarillado Pluvial.

Rendimiento: 5 - Alto; 3 - Medio; 1 - Bajo; NR - Tecnología no recomendada.

A3.2 Calificación del rendimiento de las alternativas respecto al criterio control a descargas contaminantes del primer lavado

El potencial contaminante del primer lavado depende de su magnitud, del área drenada y de la calidad del efluente del SUDS. Para cuantificar el primer lavado se necesita: (1) la curva m (v) que representa la masa contaminante normalizada vs volumen de escurrimiento normalizado; y (2) la relación de la masa del primer lavado (MFF) representativa del fenómeno. La importancia de considerar en la selección de tecnología el impacto del primer lavado en el cuerpo receptor, y la falta de información sobre la magnitud de este fenómeno en la zona de estudio, hace necesario recurrir a mediciones realizadas en otras investigaciones para orientar la toma decisión.

Bertrand-Krajewski *et al.* (1998) analizó 197 eventos de lluvia en 6 sistemas de alcantarillado combinado y 6 sistemas de alcantarillado separado con diversas características, obteniendo curvas $m(v)$ características para cada sistema (Figura A3.1). En cuanto a la relación de la masa del primer lavado (MFF) representativa del fenómeno, Kang *et al.* (2006) y Barco *et al.* (2008) utilizaron en sus investigaciones la relación MFF_{20} para cuantificar la magnitud del primer lavado.

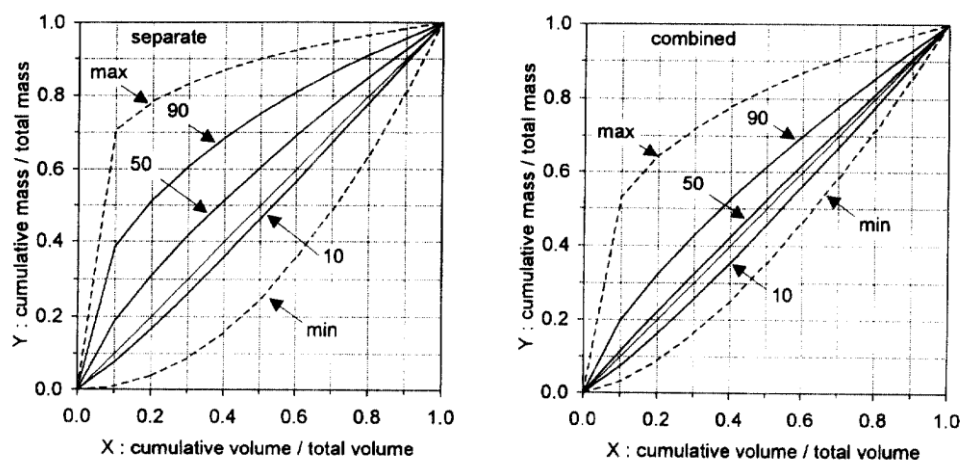


Figura A3.1 Curva $m(v)$ característica para el sistema separado (izq.) y para el sistema combinado (der.).
Bertrand-Krajewski *et al.* (1998)

Para el caso de las curvas mostradas en la Figura A3.1, el sistema separado presenta para el 50% de los eventos de lluvia un MFF_{20} de 1.55, lo cual significa que el 31% de la masa contaminante está contenida en el primer 20% del volumen de escurrimiento. Por otra parte, el sistema combinado presenta para el 50% de los eventos de lluvia un MFF_{20} de 1.10, que significa que el 22% de la masa contaminante está contenida en el primer 20% del volumen de escurrimiento. Lo anterior muestra la favorabilidad del sistema combinado frente al sistema separado desde el punto de vista de la magnitud del primer lavado. Sin embargo, dado el mejoramiento de la calidad y la reducción de los volúmenes del escurrimiento superficial que se obtiene con la implementación de tecnologías SUDS, la competitividad del sistema separado puede mejorar en la medida que tales tecnologías sean aplicadas en el sistema de drenaje del futuro desarrollo urbano. En este sentido, la asunción el modelo considera las eficiencias para mejorar la calidad del escurrimiento presentadas por Ellis *et al.* (2008) para diferentes tipos de SUDS (ver Cuadro 7.4 en el Capítulo 7).

Con el objetivo de utilizar los resultados obtenidos en los estudios citados, en este trabajo se asume que el 20% del volumen de escurrimiento es generado por el 20% del área urbana en estudio. Teniendo en cuenta lo anterior, se asignaron los puntajes de rendimiento presentados en el Cuadro A3.4.

Cuadro A3.4 Rendimiento de las alternativas respecto al control de las descargas contaminantes del primer lavado

SUDS seleccionado en el Bloque 2	Porcentaje de área drenada por SUDS			
	< 20%		≥ 20%	
	AC	AP	AC	AP
Depósito de infiltración	4	3	5	4
Depósito de detención	3	2	4	3
Estanque de retención	3	2	4	3
Humedal construido	4	3	5	4
Pavimento poroso	4	3	5	4

AC: Alcantarillado Combinado; AP: Alcantarillado Pluvial.

Rendimiento: 5 - Muy alto; 4 - Alto; 3 - Medio; 2 - Bajo; 1 - Muy bajo.

A3.3 Calificación del rendimiento de las alternativas respecto al criterio capacidad de dilución y asimilación del cuerpo receptor

Para casos en los que se disponga de información tipo dos para evaluar el impacto de las descargas de RSC y DSP en la calidad del cuerpo receptor, el rendimiento de las alternativas se calificó a partir de mediciones sobre la calidad del agua de tales vertimientos. Los puntajes fueron asignados teniendo en cuenta que el mejor rendimiento lo presenta la alternativa con la menor concentración de contaminantes en su descarga. En los casos donde el factor de dilución sea mayor o igual a 40, se considera que el impacto de las descargas es atenuado por el caudal transportado por el cuerpo receptor, por lo que el rendimiento es el mismo para ambas alternativas (ver Cuadros A3.5 y A3.6).

Aunque en lo referente a la medición de la calidad del escurrimiento urbano se disponen de múltiples fuentes bibliográficas, todas realizadas en países desarrollados, se utilizaron los datos presentados por Martins *et al.* (1991 citado por Tucci, 2001), pues se trata de mediciones realizadas en países en desarrollo donde la concentración de contaminantes se incrementa significativamente debido a problemas como conexiones erradas entre los sistemas pluvial y sanitario (Marsalek *et al.*, 2006).

Cuadro A3.5 Calidad del escurrimiento urbano y de RSC: datos del escurrimiento urbano de São Paulo, Brasil (Martins et al., 1991 citado por Tucci, 2001) y datos de RSC de Pavia, Italia (Barco et al., 2008)

Parámetro de calidad	Unidades	CSO (Barco et al., 2008)		Esgurrimiento urbano (Martins et al., 1991 citado por Tucci, 2001)	
		Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	563	648	447	462
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	276	317	166	181
Sólidos totales	mg/l	-	-	669	473
Sólidos suspendidos	mg/l	507	512	-	-
Sólidos sedimentables	mg/l	17.8	21.1	6.98	5.86
Nitrógeno amoniacal	mg/l	7.79	6.44	-	-
Nitrógeno total	mg/l	21.7	17.5	23.9	26.9
Fósforo total	mg/l	3.03	3.08	-	-
Plomo total (Pb)	mg/l	0.26	1.12	-	-
Zinc total (Zn)	mg/l	0.62	0.91	-	-
Coliformes fecales	x10 ⁴ #/ml	-	-	3.55	5.42
Coliformes totales	x10 ⁴ #/ml	-	-	2.98	6.42

Cuadro A3.6 Rendimiento de las alternativas respecto a la capacidad de dilución del cuerpo receptor

Factor de dilución*	Rendimiento de la alternativa a_{ij}	
	Alcantarillado Combinado	Alcantarillado Pluvial
≥ 40	4	4
< 40	2	3

Rendimiento: 5 - Muy alto; 4 - Alto; 3 - Medio; 2 - Bajo; 1 - Muy bajo.

* Factor de dilución: relación entre el caudal del cuerpo receptor en periodo seco y el caudal de escurrimiento pico.