



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Evaluación del desempeño de sistemas de drenaje pluvial
convencional incorporando sistemas urbanos de drenaje sostenible,
en la zona metropolitana de San Luis Potosí**

Que para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Carlos Ernesto Ponce de León García

Asesor:

Dr. Rodolfo Cisneros Almazán

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2022





Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Evaluación del desempeño de sistemas de drenaje pluvial convencional
incorporando sistemas urbanos de drenaje sostenible, en la zona metropolitana de
San Luis Potosí**

Que para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Carlos Ernesto Ponce de León García

Director:

Dr. Rodolfo Cisneros Almazán

Comité asesor:

Dr. Clemente Rodríguez Cuevas

Dr. Hermann Rocha Escalante

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2022





19 de mayo de 2022

**ING. CARLOS ERNESTO PONCE DE LEÓN GARCÍA
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Rodolfo Cisneros Almazán**, *Asesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Evaluación del desempeño de sistemas de drenaje pluvial convencional incorporando Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, en la zona metropolitana de San Luis Potosí”

Introducción.

1. Descripción de la zona de estudio, su crecimiento histórico, contexto físico y socioeconómico
2. Modelación del escurrimiento superficial y comportamiento del sistema de drenaje pluvial de la zona de estudio
3. Propuesta de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y evaluación de su efecto en el drenaje pluvial en la zona de estudio
4. Análisis del costo y beneficios socioeconómicos y ambientales del sistema propuesto

Conclusiones

Referencias

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.**

SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria - CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al 39
fax (444) 826 2336

Copia. Archivo.
*etn.

“Rumbo al centenario de la autonomía universitaria”

Agradecimientos

*A la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí** y al **Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**, por darme la oportunidad de buscar mi superación académica en una institución académica con la que pude sentirme identificado.*

*Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por darme la oportunidad de formar parte de su programa de becas y por el apoyo económico dado durante estos dos años en que cursé mi posgrado.*

*Al **Dr. Rodolfo Cisneros Almazán** por su dirección en la creación de su tesis, por haberme presentado a un tema que hoy considero fundamental para el desarrollo de cualquier ciudad, por su escucha y palabras para desarrollar mi carrera académica.*

*A mi familia, y en particular a mi madre **Verónica García**, por su amor y haberme inculcado siempre el valor del estudio y de preparar mi mente, y a mi padre **Ernesto Ponce de León** por su amor y apoyo incondicional durante todos estos años, sin el apoyo de toda mi familia durante toda mi formación no habría sido posible llegar hasta donde he estado.*

*A mi novia, **Carolina González**, por su amor, comprensión, incansable apoyo y paciencia durante todos estos años, sin su aliento, no hubiera podido atreverme a intentar grandes cosas, desde mi desarrollo profesional hasta esta misma maestría.*

Resumen

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son una propuesta surgida a partir de la visión de Soluciones Basadas en la Naturaleza, que buscan atender problemáticas urbanas aprovechando mecanismos surgidos en la naturaleza que pueden ser de gran apoyo en la gestión integral del agua pluvial devolviéndole a las ciudades condiciones hidrológicas favorables para el ambiente y la sociedad.

Para el caso de estudio de la Delegación de Villa de Pozos en San Luis Potosí se realizó en primer lugar una descripción de la evolución de los usos de suelo y población de 1994 a 2019, posteriormente se modeló la respuesta hidrológica de la zona de estudio y el comportamiento del sistema de drenaje pluvial en SWMM® para posteriormente generar una propuesta de SUDS mediante un análisis multicriterio y se analizó su efecto a través de la simulación de escurrimientos y caudales en la red de drenaje pluvial, una vez sustentada la propuesta técnicamente se procedió a presupuestar el proyecto de inversión y evaluar sus beneficios mediante la herramienta B£ST y finalmente se analizó la relación costo-beneficio mediante indicadores de rentabilidad.

Se encontró que la tendencia de crecimiento urbano va hacia las partes más bajas de la cuenca, y que bajo el sistema de drenaje pluvial actual se presentan escurrimientos de hasta 17,700 L/s que llevan al máximo a los colectores pluviales, como contramedida se desarrolló una propuesta de SUDS que logró reducir la escorrentía urbana hasta en un 40% en 15 de las 27 cuencas intervenidas y el caudal en la red hasta en un 20%. En la presupuestación de este proyecto y la valuación de beneficios identificados se encontró una relación de 1:18 de costo contra beneficio, respaldado por un Valor Presente Neto positivo y una Tasa de Rentabilidad Inmediata del 80%.

Palabras clave: *gestión integral del agua pluvial; soluciones basadas en la naturaleza; sistemas urbanos de drenaje sostenible; desarrollo sustentable; infraestructura verde; SWMM®; B£ST.*

CONTENIDO

Introducción	1
1 Descripción de la zona de estudio, su crecimiento histórico, contexto físico y socioeconómico	4
1.1 Ubicación de la zona de estudio	4
1.2 Orografía	5
1.3 Geología.....	5
1.4 Uso de suelo.....	6
1.5 Clima	7
1.6 Hidrología.....	8
1.6.1 Hidrología superficial	8
1.6.2 Hidrología Subterránea.....	9
1.7 Red de medición climatológica	12
1.8 Crecimiento de la Delegación Villa de Pozos.....	14
1.9 Características socioeconómicas.....	18
2 Modelación del escurrimiento superficial y comportamiento del sistema de drenaje pluvial de la zona de estudio.....	20
2.1 Determinación de una Tormenta de Diseño.....	21
2.1.1 Estaciones usadas en el estudio.....	21
2.1.2 Obtención de curvas de Intensidad – Duración – Periodo de Retorno	22
2.1.3 Cálculo del hietograma de precipitación	26
2.2 Clasificación de usos y tipos de suelo en la zona de estudio.....	27
2.3 Caracterización del sistema de drenaje pluvial en la Delegación Villa de Pozos.....	34
2.4 Modelación hidráulica e hidrológica	35
2.4.1 Parámetros utilizados en el modelo.....	35
2.4.2 Modelo conceptual	39
2.4.3 Resultados	45

3	Propuesta de Sistemas de Urbanos de Drenaje Sostenible y evaluación de su efecto en el drenaje pluvial en la zona de estudio	51
3.1	Selección y caracterización de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible	51
3.1.1	Objetivos para un Desarrollo Sostenible de la ONU.....	51
3.1.2	Soluciones Basadas en la Naturaleza	52
3.1.3	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.....	54
3.1.4	Selección de asentamientos de SUDS	63
3.1.5	Diseño de SUDS	75
3.2	Modelación hidráulica e hidrológica considerando SUDS	83
3.2.1	Parámetros de los SUDS (LID Controls).....	83
3.2.2	Integración en el modelo conceptual	92
3.2.3	Resultados	95
4	Análisis del costo y beneficios socioeconómicos y ambientales del sistema propuesto	105
4.1	Estimación de costos de implementación de SUDS.....	105
4.1.1	Catálogo de conceptos y precios unitarios.....	105
4.1.2	Presupuesto final de obra.....	109
4.2	Estimación de beneficios sociales y ambientales de la implementación de SUDS	110
4.2.1	Determinación del valor ambiental del área	110
4.2.2	Evaluación y monetización de beneficios con B£ST	114
4.3	Análisis Costo - Beneficio	136
	Conclusiones	141
	Recomendaciones.....	142
	Referencias	144

Tabla 1-1 - Distribución de climas del municipio de San Luis Potosí (IMPLAN, 2021).....	8
Tabla 1-2 - Cuencas hidrológicas principales en el municipio de San Luis Potosí (IMPLAN, 2021)	8
Tabla 1-3 - Acuíferos del municipio de San Luis Potosí (IMPLAN, 2021).....	10
Tabla 1-4 - Proporción de fuentes para el municipio de San Luis Potosí (CONAGUA, 2022b)	11
Tabla 1-5 - Proporción de los distintos usos que se le da al agua en el municipio de San Luis Potosí (CONAGUA, 2022b)	11
Tabla 1-6 - Estaciones seleccionadas para el estudio (CONAGUA, s.f.).....	14
Tabla 2-1 - Modelos computacionales para la simulación hidrológica	20
Tabla 2-2 - Estaciones seleccionadas para el estudio (CONAGUA, s.f.).....	21
Tabla 2-3 - Relación de medias y desviación típica de una serie de valores Y_i según el tamaño de la muestra, elaborada con información de Sánchez (2008).....	24
Tabla 2-4 - Parámetros mínimos para la estimación del escurrimiento en una subcuenca ...	30
Tabla 2-5 - Propiedades de subcuencas ingresadas en el modelo	32
Tabla 2-6 - Colectores declarados por INTERAPAS	34
Tabla 2-7 - Propiedades usadas para cada subcuenca	36
Tabla 2-8 - Propiedades de colectores en la Delegación Villa de Pozos	37
Tabla 3-1 - Metodología multiescalar para la planeación de SUDS (Jiménez et al., 2019)....	64
Tabla 3-2 - Parámetros utilizados para clasificar áreas potenciales para SUDS, adaptado de (Jiménez et al., 2019)	71
Tabla 3-3 - Márgenes para las propiedades de un canal vegetal de acuerdo con Woods et al. (2015).....	75
Tabla 3-4 - Relación de tanques de almacenamiento requeridos.....	80
Tabla 3-5 - Propiedades para un techo verde	82
Tabla 3-6 - Parámetros usados para cada tipo de SUDS.....	83
Tabla 3-7 - Parámetros de superficie para LID Control	84
Tabla 3-8 - Parámetros de la capa de pavimento para el LID Control	84
Tabla 3-9 - Parámetros de la capa de suelo para el LID Control.....	85
Tabla 3-10 - Parámetros para la capa de almacenamiento para el LID Control	86
Tabla 3-11 - Parámetros para la capa de drenaje para el LID Control	87
Tabla 3-12 - Parámetros de capa de celda de drenaje del LID Control.....	88
Tabla 3-13 - Parámetros para el editor de uso de LID ((Rossman, 2015)	93

Tabla 3-14 - Desempeño de SUDS propuestos en la zona norte.....	102
Tabla 3-15 - Desempeño de SUDS propuestos en la zona sur.....	103
Tabla 4-1 - Total de presupuesto para Cuencas de retención.....	106
Tabla 4-2 - Total de presupuesto para SCALLS.....	107
Tabla 4-3 - Total de presupuesto para pavimentos permeables.....	107
Tabla 4-4 - Total de presupuesto para canales vegetales.....	108
Tabla 4-5 - Total de presupuesto para trincheras de infiltración.....	108
Tabla 4-6 - Total del presupuesto para techos verdes.....	109
Tabla 4-7 - Totales generales del presupuesto.....	109
Tabla 4-8 - Proporciones empleadas en i-Tree® para la estimación de carbono.....	112
Tabla 4-9 - Proporciones empleadas en i-Tree® para la estimación de contaminantes.....	112
Tabla 4-10 - Beneficios evaluados en B£ST.....	114
Tabla 4-11 - Filtrado de beneficios evaluados en B£ST para el esquema de SUDS.....	117
Tabla 4-12 - Beneficios evaluados por B£ST y la información mínima requerida para ello.....	119
Tabla 4-13 - Valores de retención base de contaminantes por tamaño del árbol (McPherson et al., 2002).....	121
Tabla 4-14 - Valor económico asignado para cada parámetro de calidad del aire.....	122
Tabla 4-15 - Valuación de beneficios relacionados con la amenidad del espacio urbano.....	124
Tabla 4-16 - Valor para cada tipo de hábitat de acuerdo con la Voluntad de Pago.....	126
Tabla 4-17 - Inversión en viajes educativos a espacios naturales.....	130
Tabla 4-18 - Monetización de beneficios en la salud física y emocional relacionados con espacios verdes.....	132
Tabla 4-19 - Valores para mejoras en el aspecto recreativo.....	133
Tabla 4-20 - Relación de beneficios monetizados por el esquema de SUDS propuesto (adaptado de la interfaz de B£ST).....	135
Tabla 4-21 - Tabulación del VPN.....	137

Figura 1-1 - Límites de la Delegación Villa de Pozos, elaboración propia con información de IMPLAN (2021).....	4
Figura 1-2 - Provincias geológicas de San Luis Potosí (INEGI, 2002).....	6
Figura 1-3 – Usos de suelo en la región, elaboración propia con información de INEGI (2015)	7
Figura 1-4 - Red hidrológica de la zona de estudio, elaboración propia con información de INEGI.....	9
Figura 1-5 - Acuíferos de la región de la ZMSLP (CONAGUA, 2020)	10
Figura 1-6 - Elevaciones del nivel estático del acuífero de San Luis Potosí	12
Figura 1-7 - Estaciones climatológicas cercanas a la zona de estudio, elaboración propia con información de CONAGUA	13
Figura 1-8 - Crecimiento de la mancha urbana, elaboración propia con información de INEGI y Google® Earth®	15
Figura 1-9 - Variación de la extensión de usos de suelo en la Delegación, elaboración propia con información de INEGI.....	16
Figura 1-10 - Variaciones en la extensión de usos de suelo, elaboración propia con información de INEGI.....	17
Figura 1-11 - Crecimiento poblacional de la delegación Villa de Pozos, la línea en naranja representa una interpolación realizada a partir de los índices de crecimiento del municipio de San Luis Potosí, elaboración propia con información de INEGI	18
Figura 2-1 - Periodos de retorno para diseño de redes de drenaje pluvial (CONAGUA, 2015)	23
Figura 2-2 - Periodos de retorno para diseño de redes de drenaje pluvial (CONAGUA, 2015)	23
Figura 2-3 - Mapa de distribución de Factor de conectividad (R) (Baeza, 2007)	25
Figura 2-4 - Gráficas I-D-Tr para periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años	26
Figura 2-5 - Hietograma de precipitación para 10 años y una duración de 2 horas.....	27
Figura 2-6 - Proceso para obtención de las áreas de influencia.....	28
Figura 2-7 - Áreas de influencia del drenaje pluvial.....	29
Figura 2-8 - Propiedades de una subcuenca en SWMM®	30
Figura 2-9 - Mapa de edafología para el área de estudio con información de INEGI (2007) .	31
Figura 2-10 - Mapa de usos de suelo en la zona de estudio, con información de INEGI (2015)	32

Figura 2-11 - Trazo de colectores pluviales en la zona de estudio, elaboración propia con información de INTERAPAS	35
Figura 2-12 - Gráfica del hietograma de precipitación como se ha ingresado en SWMM®	36
Figura 2-13 - Áreas de influencia/Subcuencas para la zona norte sección 1	40
Figura 2-14- Áreas de influencia/Subcuencas para la zona norte sección 2	41
Figura 2-15- Áreas de influencia/Subcuencas para la zona norte sección 3	42
Figura 2-16 - Áreas de influencia/Subcuencas para la zona norte sección 4	43
Figura 2-17- Áreas de influencia/Subcuencas para la zona sur sección 1 y 2 (subcuencas 7, 8 y 9)	44
Figura 2-18 - Áreas de influencia/Subcuencas para la zona sur sección 3 (Laguna de Santa Rita).....	45
Figura 2-19 - Esgurrimiento pico en zona norte.....	46
Figura 2-20 - Esgurrimiento pico en zona sur.....	46
Figura 2-21 - Caudales simulados en zona norte sección 1	47
Figura 2-22- Caudales simulados en zona norte sección 2.....	48
Figura 2-23- Caudales simulados en zona norte sección 3.....	48
Figura 2-24- Caudales simulados en zona norte sección 4.....	49
Figura 2-25- Caudales simulados en zona sur sección 1	49
Figura 2-26- Caudales simulados en zona sur sección 2.....	50
Figura 2-27 - Caudales simulados en zona sur sección 3	50
Figura 3-1 - Esquema de funcionamiento de un drenaje pluvial convencional (Licensed to Plumb, 2009)	55
Figura 3-2 - Esquema de drenajes sostenibles (Andenæs et al., 2021)	55
Figura 3-3 - Comparación de un hidrograma en un estadio previo a un desarrollo urbano, sin SUDS y con SUDS (Rodríguez, 2017).....	57
Figura 3-4 - Vista de nuevo parque inundable de Alicante (Ágora, 2022).....	58
Figura 3-5 - Techo verde intensivo accesible (ContentLab, 2019).....	59
Figura 3-6 - Captación de agua de lluvia para una instalación educativa, imagen de Stormsaver	60
Figura 3-7 - Modelo de pavimento permeable (Hübner-Lee, 2022).....	60
Figura 3-8 - Jardín de lluvia en área de contención junto a una banqueta, ilustración de Ecological Landscape Alliance.....	61
Figura 3-9 - Canal vegetal en Malasia (Ghani et al., 2008)	62

Figura 3-10 - Humedal artificial, (Iagua, 2016)	62
Figura 3-11 - Trinchera de infiltración en un estacionamiento, (theagritect, 2012)	63
Figura 3-12 - Zonas en riesgo de inundación (IMPLAN, 2021) y afectadas por inundaciones	66
Figura 3-13 - Áreas potenciales observadas para SUDS	67
Figura 3-14 - Mapa de cobertura de drenaje pluvial convencional	68
Figura 3-15 - Mapa de distribución de la población por AGEB (INEGI, 2020a)	69
Figura 3-16 - Mapa de rangos de pobreza de acuerdo con CONEVAL, 2015	70
Figura 3-17 - Mapa de densidad de áreas verdes de más de 1,000 m ²	71
Figura 3-18 - Mapa de pendientes de la zona	72
Figura 3-19 - Mapa del nivel estático del acuífero	73
Figura 3-20 - Áreas potenciales para SUDS clasificadas por cuantiles	74
Figura 3-21 - Sección tipo de un canal vegetal	76
Figura 3-22 - Sección transversal de talud con escalones de acceso	77
Figura 3-23 - Sección de estructura de salida tipo	77
Figura 3-24 - Detalle de una obra de excedencias tipo	77
Figura 3-25 - Vista en planta de una cuenca de retención tipo	78
Figura 3-26 - Sección transversal A-A' para una cuenca de retención tipo	79
Figura 3-27 - Gráfica de eficiencia en el ahorro de agua vs periodo de reserva (Fewkes & Wam, 2000)	80
Figura 3-28 - Parámetros ingresados para las cuencas de retención	89
Figura 3-29 - Parámetros ingresados para canales vegetales	89
Figura 3-30 - Parámetros ingresados para captación de agua de lluvia	90
Figura 3-31 - Parámetros ingresados para pavimentos permeables	91
Figura 3-32 - Parámetros ingresados para trincheras de infiltración	91
Figura 3-33 - Parámetros ingresados para techos verdes	92
Figura 3-34 - Propiedades de una cuenca donde se incluyen los LID Controls	93
Figura 3-35 - Editor de uso de LID	94
Figura 3-36 - Hidrograma del sistema norte, se muestra la escorrentía original en azul y la escorrentía con SUDS en verde	95
Figura 3-37 - Hidrograma del sistema sur, se muestra la escorrentía original en azul y la escorrentía con SUDS en verde	96
Figura 3-38- Comparación del escurrimiento superficial en la zona sur	96

Figura 3-39 - Comparación del escurrimiento superficial en la zona norte	97
Figura 3-40 - Comparación de caudales zona sur sección 1	98
Figura 3-41 - Comparación de caudales zona sur sección 2	98
Figura 3-42 - Comparación de caudales zona sur sección 3	99
Figura 3-43 - Comparación de caudales en zona norte sección 1	99
Figura 3-44 - Comparación de caudales en zona norte sección 2	100
Figura 3-45 - Comparación de caudales en zona norte sección 3	100
Figura 3-46 - Comparación de caudales en zona norte sección 4	101
Figura 3-47 - Balance hídrico realizado por SWMM®	102
Figura 4-1 - Interfaz de usuario de Prisma Master® 2.0	105
Figura 4-2 - Costos paramétricos para cada SUDS	110
Figura 4-3 - Áreas de valoración para i-Tree®	111
Figura 4-4 - Puntos de muestra para las Zonas Urbanas Principal, de Villa de Pozos y de Laguna de Santa Rita	112
Figura 4-5 - Valor total de cada zona urbana	113
Figura 4-6 - Parámetros ingresados para cuantificar beneficios en calidad del aire (color rosa)	123
Figura 4-7 - Parámetros ingresados para cuantificar beneficios en calidad del aire (color rosa)	123
Figura 4-8 - Parámetros ingresados para cuantificar beneficios en amenidad (color rosa) .	125
Figura 4-9 - Parámetros usados para estimar los beneficios en la biodiversidad y ecología (en rosa)	126
Figura 4-10 - Parámetros usados para cuantificar los beneficios en retención de carbono .	128
Figura 4-11 - Parámetros utilizados para la estimación de beneficios en términos educativos (en rosa)	130
Figura 4-12 - Parámetros usados para cuantificar el beneficio en función de reducción de inundación (con información del FONDEN, 2019).....	131
Figura 4-13 - Parámetros usados para la estimación de beneficios en la salud física (en rosa)	132
Figura 4-14 - Parámetros usados para cuantificar los beneficios en términos de recreación (en rosa)	134
Figura 4-15 - Parámetros usados para estimar el beneficio en reducción de consumo de agua (en rosa)	135

Figura 4-16 - Desarrollo de la TRI..... 139

INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento de las ciudades a lo largo de la era moderna se ha vuelto evidente que el desarrollo urbano acarrea una variedad de problemas ambientales que tienen un efecto directo sobre la sociedad lo cual demanda una innovación en la resolución de estos problemas para alcanzar asentamientos habitables, resilientes y sanos (Crocì & Lucchitta, 2022).

En el caso de San Luis Potosí la ciudad cuenta con diferentes grados de riesgo de inundación dependiendo de la zona, esto es debido a la orografía de la zona (se encuentra bordeada por formaciones como la sierra de Álvarez y la sierra de San Miguelito) que dirige los escurrimientos hacia la Zona Metropolitana de San Luis Potosí y a los niveles de vulnerabilidad socioeconómica en las zonas inundables (Candia, 2015).

Otra zona igualmente afectada es la Delegación Villa de Pozos, donde se encuentra la zona más baja de la Cuenca y varios afluentes confluyen en el Tanque Tenorio, el cual es usado igualmente como vaso receptor de escurrimientos pluviales y de tratamiento de aguas negras (IMPLAN, 2021).

El crecimiento de esta zona debido a su cercanía a la zona industrial y la mancha urbana de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí ha disminuido los espacios permeables del suelo natural o agrícola y aumentado la escorrentía, además la propia demanda de agua por el aumento de la población tiene un impacto en la extracción de agua subterránea, principal fuente de agua potable (C. Contreras & Galindo, 2008).

En atención a este tipo de problemas es que se ha desarrollado el concepto de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) las cuales aprovechan los servicios ecosistémicos que puede proporcionar la naturaleza a la ciudad (como el caso de servicios regulatorios que ayudan a controlar la escorrentía urbana o la contaminación del aire) (Crocì & Lucchitta, 2022). En específico, las SbN son proyectos que están inspirados y respaldados por la naturaleza, que son rentables, proveen beneficios sociales, ambientales y económicos además de que ayudan a mejorar la resiliencia urbana (Comisión Europea, 2015).

Siguiendo esta directiva este trabajo buscará generar una propuesta de SbN que provea mejores condiciones de resiliencia en la Delegación Villa de Pozos. En específico la propuesta consistirá en Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), por tanto, se realizó una

evaluación del drenaje pluvial convencional existente en la Delegación incorporando estos Sistemas, analizando un antes y un después de la incorporación del esquema de SUDS.

Cómo parte de esto último se evaluó el crecimiento histórico de la zona, comparando el crecimiento urbano y poblacional del área, adquiriendo imágenes aéreas de diferentes momentos y con información de INEGI.

De igual manera, para realizar la evaluación de los sistemas se requirió hacer una modelación hidrológica e hidráulica con el modelo SWMM®, lo que permitió conocer la escorrentía en la zona y el caudal captado por los sistemas de drenaje pluvial, así como la capacidad con la que estos trabajan.

Para conocer el impacto de un esquema de SUDS propuesto fue necesario generar una propuesta que cumpliera con distintos criterios referentes a las características geográficas, hidrológicas y sociales encontrados en la bibliografía relacionada con el tema, una vez generada esta propuesta se simuló nuevamente el sistema de drenaje pluvial con el modelo SWMM®.

Finalmente, para determinar los costos y beneficios del esquema propuesto se realizó una cuantificación de volúmenes y costos paramétricos para darle un costo a todo el proyecto, y una evaluación de beneficios esperados a través de la herramienta B£ST® de CIRIA, aunado a esto se hizo en análisis costo-beneficio como se plantea en la normatividad mexicana vigente.

Objetivos

Debido a las áreas de riesgo por inundación en el municipio de San Luis Potosí, a las vulnerabilidades físicas y socioeconómicas de la población de la Delegación Villa de Pozos y lo expresado anteriormente es que se propone el siguiente objetivo general del trabajo de investigación:

Evaluar el desempeño de Sistemas de Drenaje Pluvial Convencional incorporando Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, en la delegación de Pozos, San Luis Potosí.

Y para alcanzar este objetivo se requieren los siguientes objetivos específicos que guiaron el proyecto de investigación:

- Evaluar el crecimiento urbano de la Delegación de Pozos mediante ortofotos del periodo 1994 a 2019
- Modelar la escorrentía urbana captada por el sistema de drenaje pluvial convencional bajo las condiciones de infraestructura e hidrológicas actuales
- Analizar la escorrentía urbana captada por una propuesta de SUDS anexa al drenaje pluvial mediante un modelo hidrológico e hidráulico
- Determinar los costos y beneficios de los SUDS mediante un análisis económico con componentes sociales y ambientales

1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, SU CRECIMIENTO HISTÓRICO, CONTEXTO FÍSICO Y SOCIOECONÓMICO

1.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Delegación Villa de Pozos se encuentra al sureste de la zona Metropolitana de San Luis Potosí (Figura 1-1). Es la delegación más poblada después de la misma ciudad de San Luis Potosí y aquí se encuentra además el proyecto de Ciudad Satélite, siendo una reserva de territorio destinada al crecimiento habitacional e industrial (IMPLAN, 2021).

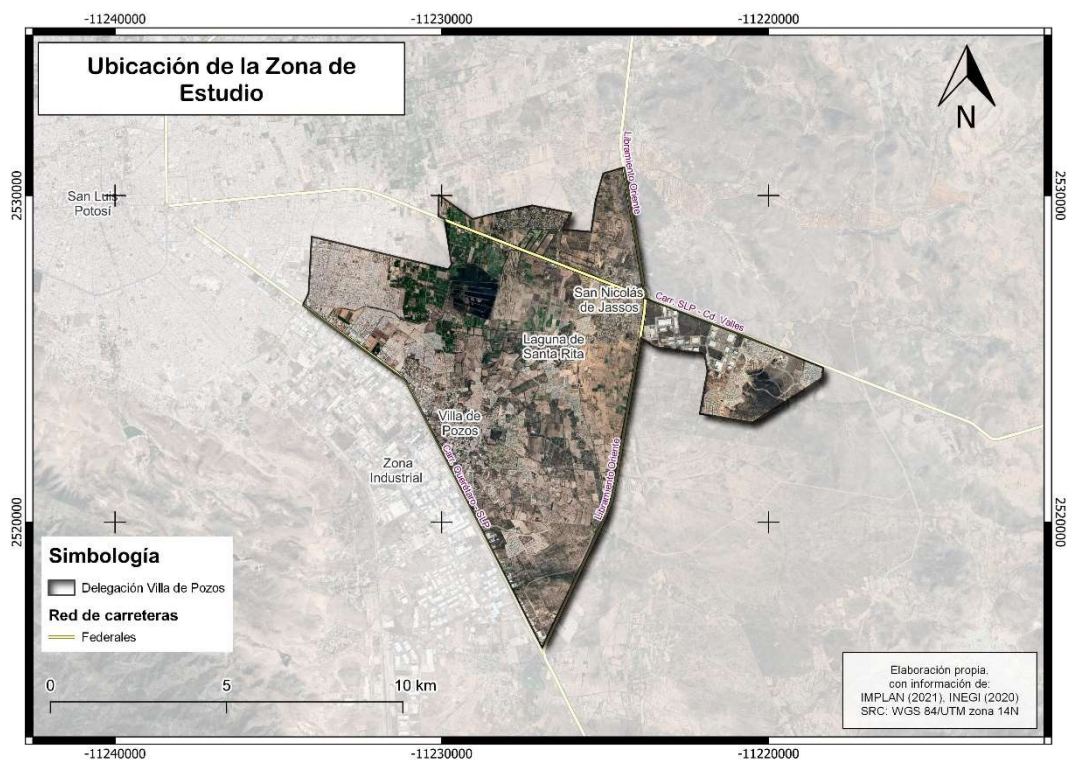


Figura 1-1 - Límites de la Delegación Villa de Pozos, elaboración propia con información de IMPLAN (2021)

Esta delegación está conformada además por las comunidades de: Barrio Cassanova, Bosque de las Flores, Bosques la Florida, Ciudad Satélite, El Guerrero, El Lindero, El Pozo de Santa Rita, La Presilla, Laguna de Santa Rita, Panalillo, Rancho Cassanova, Rancho las Maravillas, Rancho San Antonio, San Nicolás de los Jassos y Tanque el Jagüey (IMPLAN, 2021).

1.2 OROGRAFÍA

El territorio está formado por las provincias fisiográficas Mesa del Centro y Sierra Madre Oriental, además de otras cuatro subprovincias, siendo principalmente Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato, Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas, Sierras y Llanuras Occidentales y Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes (INEGI, 2002).

Al norte de la ZMPSLP se encuentran las formaciones de cerro Gordo, el Pananillio, el Divisadero, el Cabo y el Coyote, al suroeste se encuentra la sierra de San Miguelito con formaciones como Peñas Blancas, Picacho del Fraile, Mesa Redonda y Las Gallinas (Gob. SLP, 2012).

1.3 GEOLOGÍA

El estado de San Luis Potosí está asentado sobre una superficie que pasó por diferentes eventos geológicos relacionados con actividad volcánica durante varias épocas que se han transformado por fracturas, movimiento de masas y el efecto de agua sobre la superficie (INEGI, 2002). De acuerdo con INEGI, el estado se divide en 3 provincias geológicas (Figura 1-2).

Entre estas provincias geológicas se pueden identificar condiciones propias de zonas volcánicas que han propiciado la formación de cuencas endorreicas propias de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí, así como las formaciones relacionadas con la Sierra Madre oriental donde la disolución de la roca ha dado paso a la formación de cavernas, dolinas y a los grandes cañones transversales a la Sierra que transportan agua hacia el Golfo (INEGI, 2002).

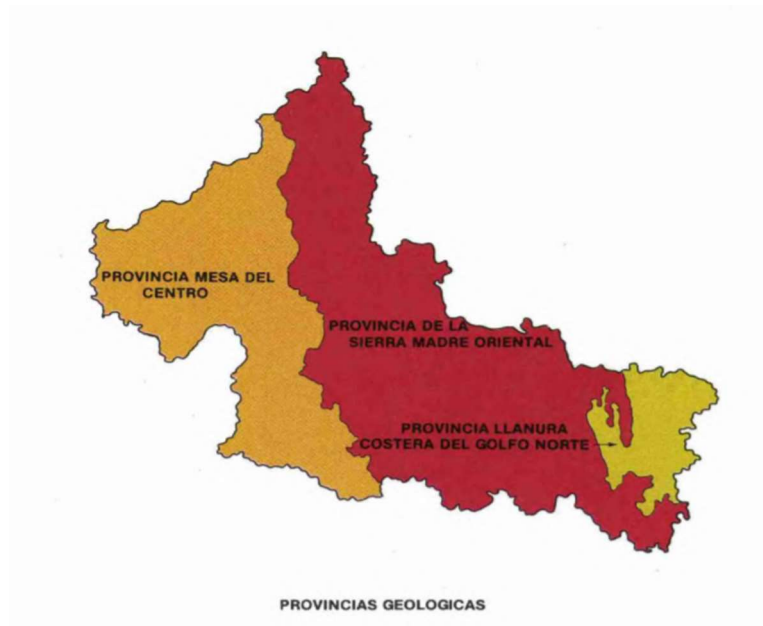


Figura 1-2 - Provincias geológicas de San Luis Potosí (INEGI, 2002)

1.4 USO DE SUELO

Usando como base la información de INEGI (2015) se han definido siete tipos de uso de suelo y vegetación (Figura 1-3) siendo el principal el matorral (36%), seguido del pastizal natural (11%), los suelos agrícolas (28.1%), el suelo sin vegetación (10%), la superficie urbana (10%), la zona forestal (4%), la vegetación secundaria de bosque encino (0.6%) y cuerpos de agua (0.3%) (IMPLAN, 2021).

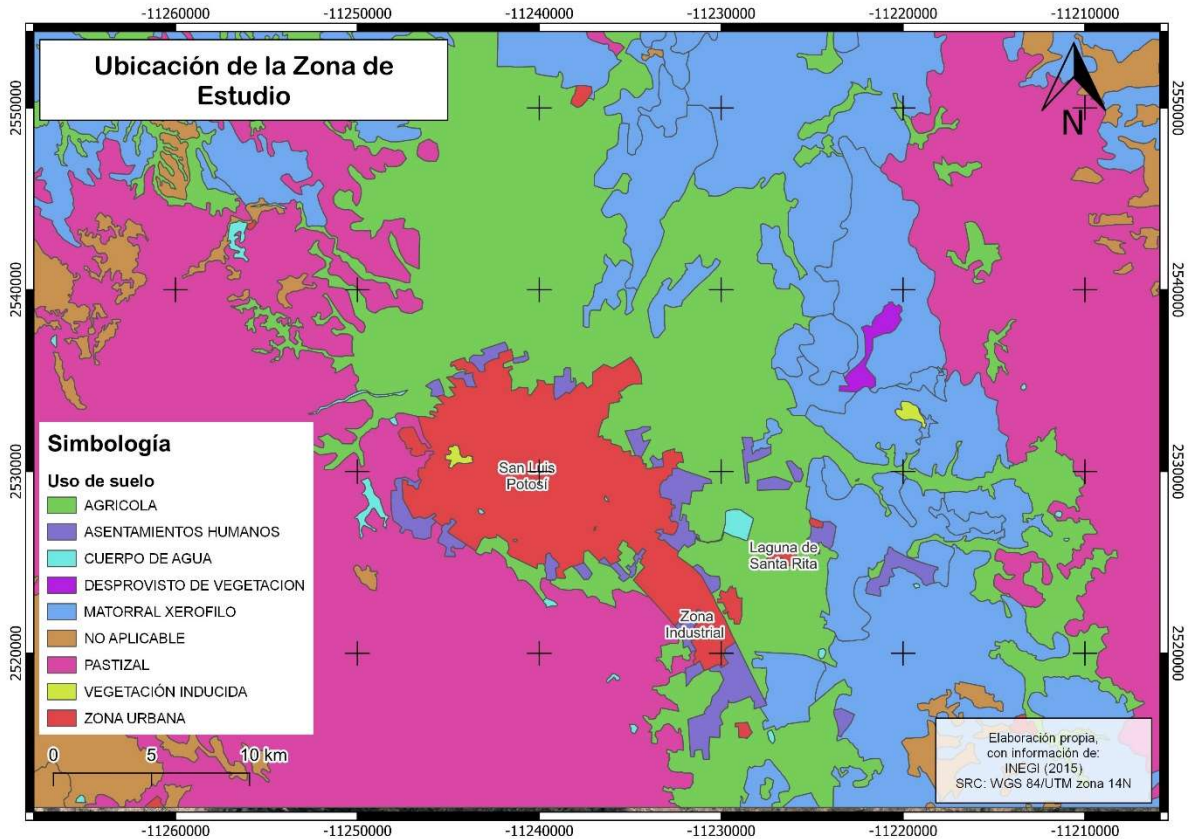


Figura 1-3 – Usos de suelo en la región, elaboración propia con información de INEGI (2015)

1.5 CLIMA

Debido a la Sierra Madre Oriental los climas presentes en el municipio carecen de humedad, sumado con la altitud, latitud y otros factores que afectan al clima el municipio de San Luis Potosí presenta climas que son variaciones del árido y semiárido, siendo el principal el Árido Templado (BSokw) que cubre el 53% de la superficie (IMPLAN, 2021).

A continuación, se presenta una tabla con los climas presentes dentro del municipio de San Luis Potosí.

Tabla 1-1 - Distribución de climas del municipio de San Luis Potosí (IMPLAN, 2021)

Tipo de Clima	Descripción de la Temperatura	Descripción de la Precipitación	Superficie (ha)	% del territorio municipal
Semiárido templado	Temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperaturas mínimas entre -3 y 18 °C y temperaturas máximas por debajo de 22 °C	Lluvias de Verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual	39,487.96	26.64
Árido semicálido	Temperatura media anual entre 18 y 22 °C, temperaturas mínimas por debajo de 18 °C, temperaturas máximas por arriba de 22 °C		30,114.28	20.32
Árido Templado	Temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperaturas mínimas entre -3 y 18 °C		78,627.81	53.04
		Total	148,230.06	100.00

1.6 HIDROLOGÍA

1.6.1 Hidrología superficial

El municipio se localiza dentro de dos regiones hidrológicas, la número 37 o El Salado, y la número 26 o Pánuco. En estas dos regiones El Salado cuenta con la cuenca de San Luis Potosí y la cuenca de la Presa San José-Los Pilares y la región Pánuco tiene a la cuenca del Río Tamuín dentro del municipio de San Luis Potosí (Tabla 1-2).

Tabla 1-2 - Cuencas hidrológicas principales en el municipio de San Luis Potosí (IMPLAN, 2021)

Región Hidrológica	Cuenca Hidrológica	Superficie (ha)	% de territorio municipal
El Salado	Presa San José – Los Pilares	2,052.62	1.38
	San Luis Potosí	129,745.77	87.53
Pánuco	Río Tamuín	16,431.67	11.09
	Total	148,230.05	100.00

De acuerdo con sus características, las cuencas que son de la región El Salado son de carácter endorreico, además durante el periodo lluvioso se forman corrientes intermitentes que alimentan a algunas presas, como es el caso del río Santiago que alimenta la presa de San José (IMPLAN, 2021).

Dentro de la zona metropolitana se encuentran algunos escurrimientos intermitentes y pequeños arroyos como el río Españita, el río Paisanos y el río Santiago (Figura 1-4), estos descienden principalmente de la Sierra de San Miguelito y abastecen las presas de San José y El Peaje.

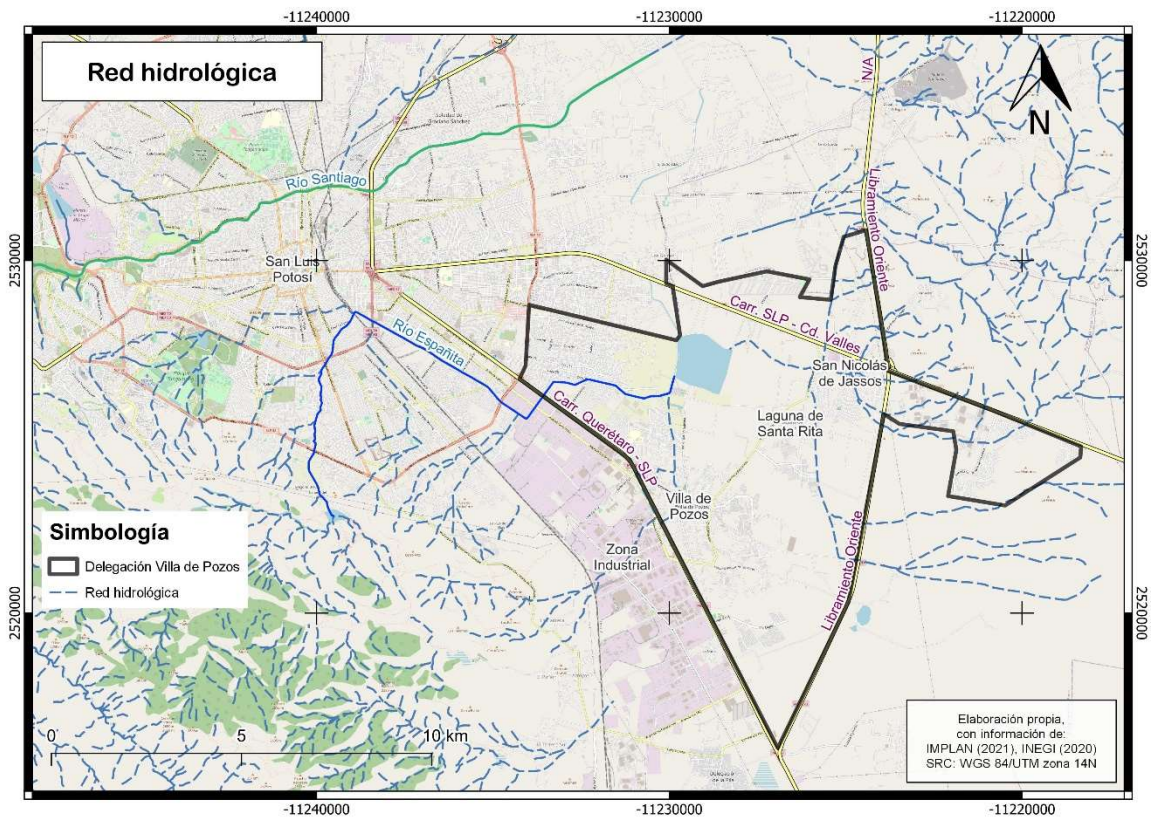


Figura 1-4 - Red hidrológica de la zona de estudio, elaboración propia con información de INEGI

1.6.2 Hidrología Subterránea

De acuerdo con información de CONAGUA, el municipio de San Luis Potosí se encuentra en las demarcaciones de 6 acuíferos (Tabla 1-3) siendo los principales el de San Luis Potosí y el de Villa de Arista (Figura 1-5) (IMPLAN, 2021).

Tabla 1-3 - Acuíferos del municipio de San Luis Potosí (IMPLAN, 2021)

Nombre de Región	Clave	Clave del acuífero	Nombre	Superficie (ha)	% del territorio municipal
Cuencas Centrales del Norte	7	2411	San Luis Potosí	106,821.96	72.06
		2408	Villa de Arista	35,323.18	23.83
		2406	Villa de Arriaga	3,430.85	2.31
		2412	Jaral de Berrios – Villa de Reyes	2,045.00	1.38
		2405	Ahualulco	593.05	0.40
		2409	Villa de Hidalgo	16.02	0.01
		Total			148,230.05

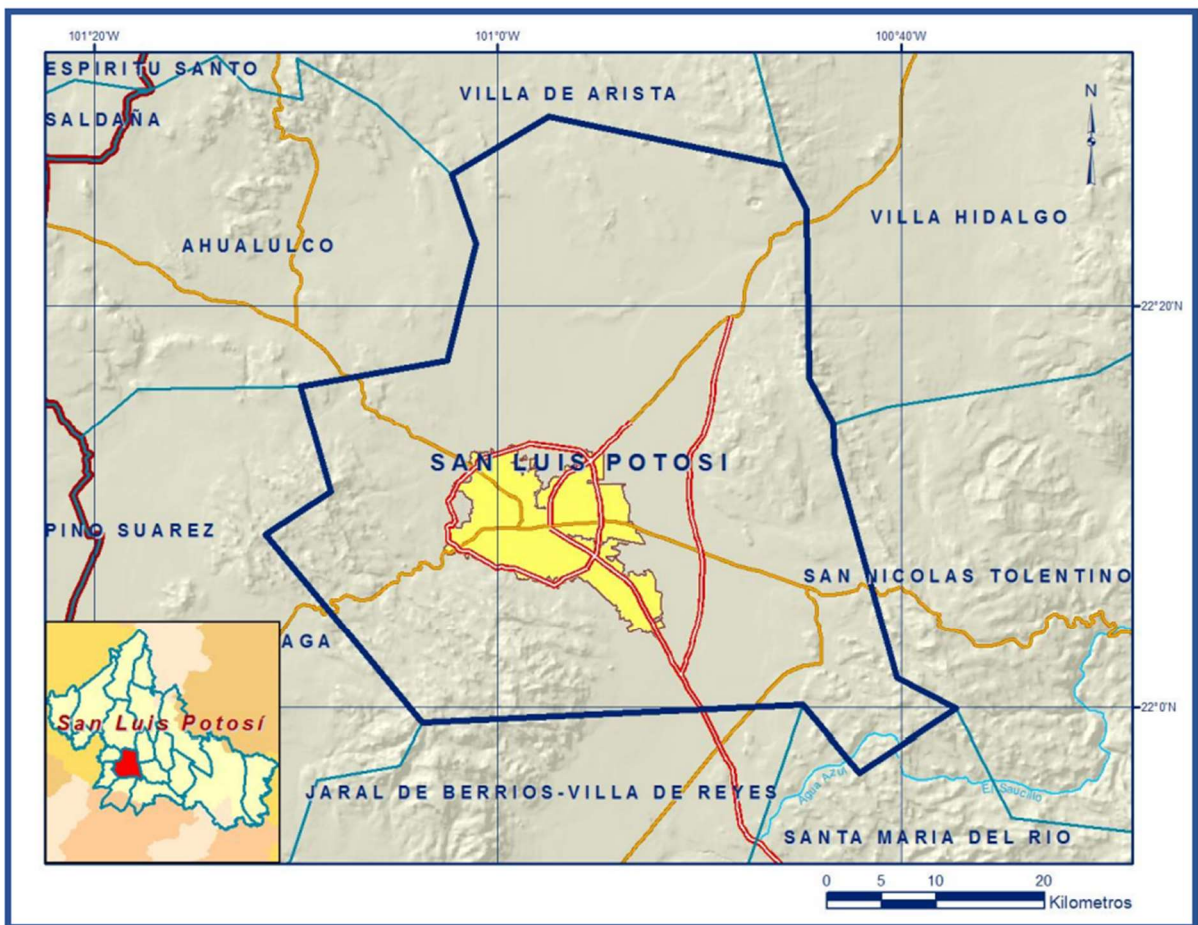


Figura 1-5 - Acuíferos de la región de la ZMSLP (CONAGUA, 2020)

Para su desarrollo y actividades industriales y domésticas la ciudad abastece el 96% de su demanda con pozos profundos mientras que el 4% restante se obtiene de fuentes superficiales (Tabla 1-4) (CONAGUA, 2022b).

Tabla 1-4 - Proporción de fuentes para el municipio de San Luis Potosí (CONAGUA, 2022b)

Vol. Concesionado por fuente (m³/año)		
Superficial	Subterráneo	Total
4,930,242.00	133,612,002.14	138,542,244.14
3.56 %	96.44 %	100.00 %

Si se clasifica el volumen concesionado de acuerdo con el uso que se le da al agua se puede observar que la mayor parte del agua se destina a un uso público urbano, seguido del uso agrícola y el aprovechamiento industrial (ver Tabla 1-5).

Tabla 1-5 - Proporción de los distintos usos que se le da al agua en el municipio de San Luis Potosí (CONAGUA, 2022b)

Uso	Vol. Concesionado (m³/año)	%
Público Urbano	81,171,779.85	58.59%
Agrícola	38,415,227.22	27.73%
Industrial	12732427.69	9.19%
Distintos Usos	3,160,703.08	2.28%
Servicios	2,845,058.80	2.05%
Acuacultura	121,000.00	0.09%
Pecuario	83,532.00	0.06%
Doméstico	12,515.50	0.01%
	138,542,244.14	100.00%

La explotación de pozos subterráneos provoca un cono de abatimiento que va reduciendo gradualmente el nivel estático del acuífero, en el caso de San Luis Potosí (acuífero 2411) la sobreexplotación y reducción de infiltración al acuífero ha derivado en un déficit en el que se tiene una extracción de 138.5 hm³ (CONAGUA, 2022b) y una recarga de 78.1 hm³ anuales

(CONAGUA, 2020) (una diferencia de 60.4 hm³ anuales), debido a que se están explotando acuíferos con agua antigua se está agotando un recurso considerado no renovable.

Usando la información de la red piezométrica de CONAGUA es posible crear un mapa de curvas de nivel de la elevación del acuífero respecto al nivel del mar (Figura 1-6), al hacer esto se puede observar cómo se comporta similar a la topografía de la zona, donde las zonas más profundas del acuífero se encuentran en Villa de Pozos y cerca de la zona centro de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí.

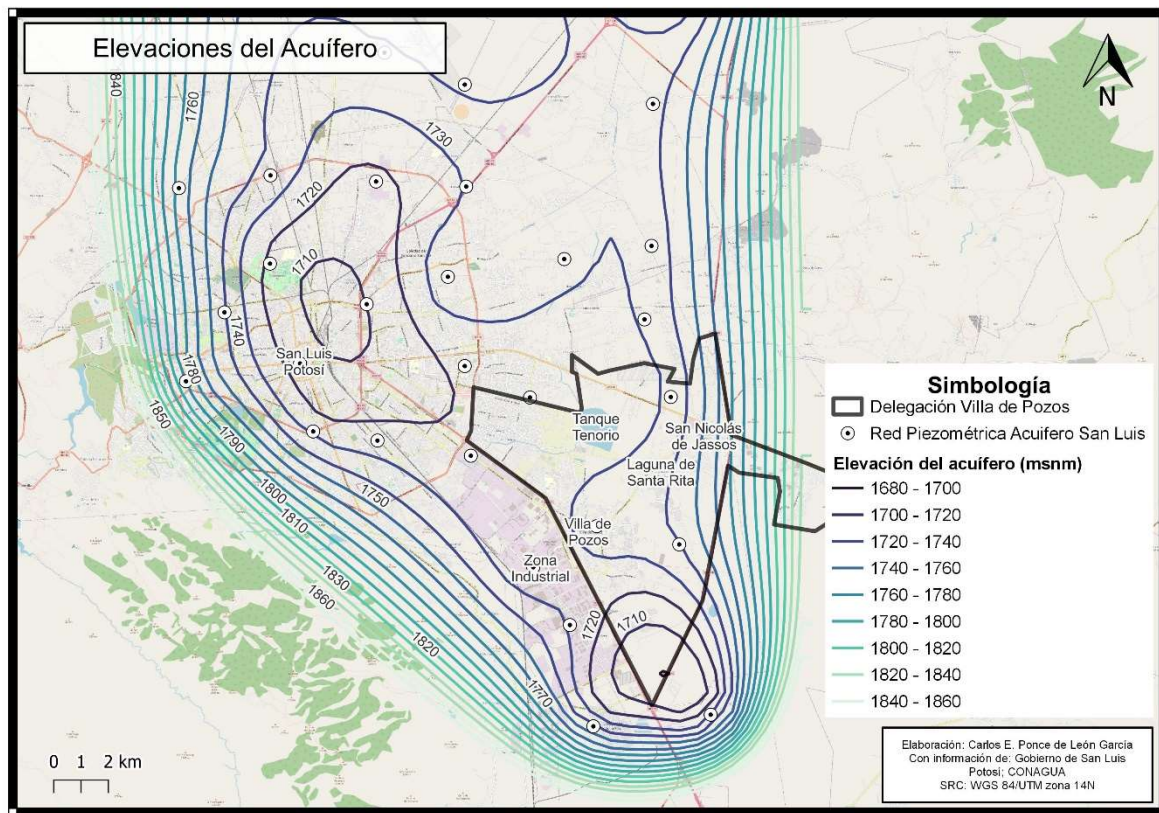


Figura 1-6 - Elevaciones del nivel estático del acuífero de San Luis Potosí

1.7 RED DE MEDICIÓN CLIMATOLÓGICA

Para poder obtener una tormenta de diseño fue necesario establecer que estaciones serían las más adecuadas para este propósito.

Para ello se utilizó la herramienta QGIS® en su versión 3.22.9. junto con la información del Servicio Meteorológico Nacional en su versión *.kml para Google® Earth®, dentro de QGIS se identificaron las estaciones más cercanas a la zona de estudio (Figura 1-7).

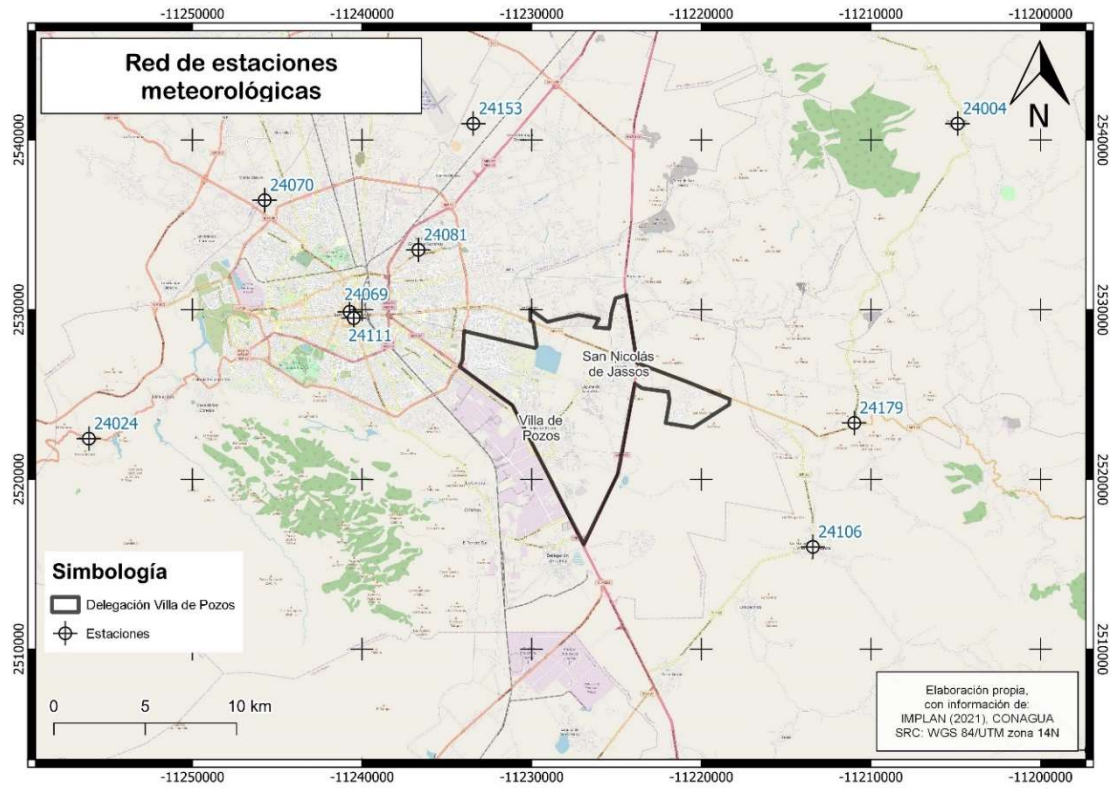


Figura 1-7 - Estaciones climatológicas cercanas a la zona de estudio, elaboración propia con información de CONAGUA

Con este procedimiento se eligieron las estaciones:

Tabla 1-6 - Estaciones seleccionadas para el estudio (CONAGUA, s.f.)

Id	Estación
24004	Armadillo de Los Infante
24024	El Peaje
24069	San Luis Potosí (DGE)
24081	Soledad de Graciano Sánchez
24106	Zaragoza
24111	San Luis Potosí (SMN)
24153	Colonia Benito Juárez
24179	Xoconoxtle

1.8 CRECIMIENTO DE LA DELEGACIÓN VILLA DE POZOS

El área metropolitana de San Luis Potosí ha tenido un desarrollo disperso en las últimas décadas que además ha acarreado graves problemas en la gestión de la movilidad urbana y distribución de bienes y servicios. La especulación inmobiliaria además ha impulsado dinámicas de gentrificación que desplazan a la población a las zonas periurbanas agravando el problema (IMPLAN, 2021).

Para describir como ha crecido la zona de estudio se adquirieron imágenes aéreas tipo ortofoto para tres diferentes momentos históricos, dos fueron obtenidas a través de (INEGI, 1994, 2004) para los años 1994 y 2004 y la última fue obtenida del navegador Google® Earth® para el año 2019 (Figura 1-8).

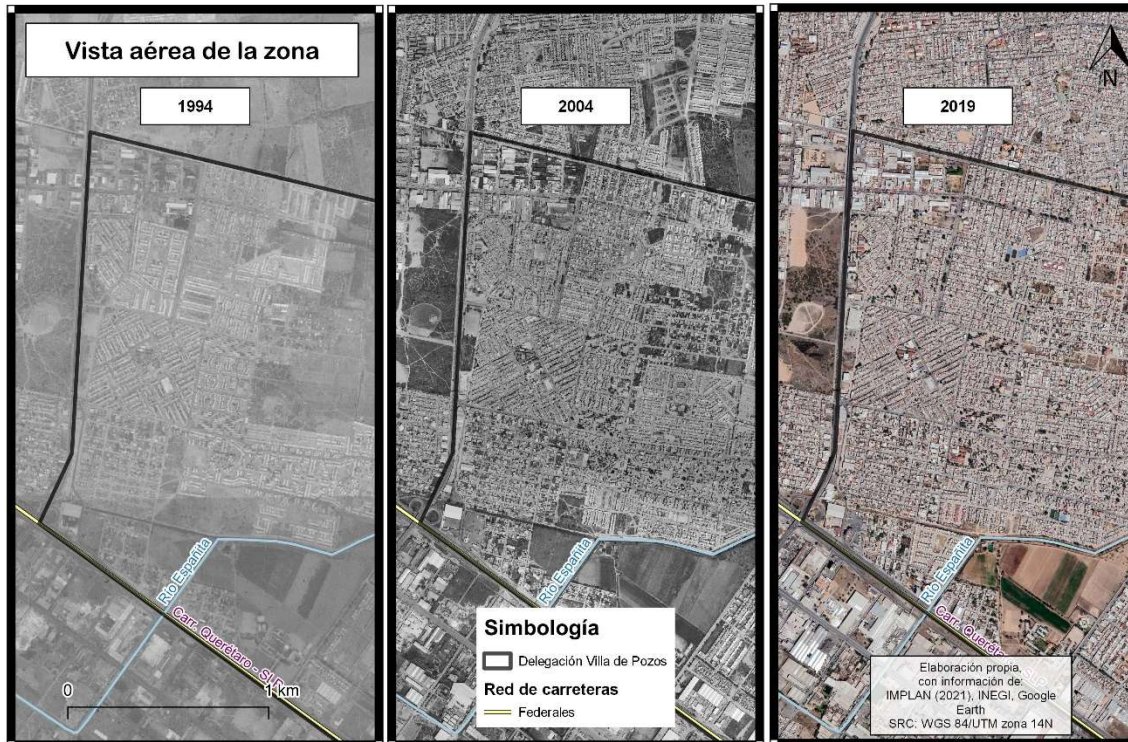


Figura 1-8 - Crecimiento de la mancha urbana, elaboración propia con información de INEGI y Google® Earth®

Utilizando QGIS® se trazaron los polígonos para cada uso de suelo, considerando las categorías empleadas por INEGI: Zona Urbana, Uso Agrícola, Cuerpo de Agua y Matorral Xerófilo.

La *Zona Urbana* fue definida como el área impermeabilizada compuesta por edificios, calles, canchas, plazas y zonas en construcción, el área de *Uso Agrícola* está formada por los caminos de interconexión, campos arados y modificados del *Matorral Xerófilo* natural, el cual

es observable en los campos más densamente vegetados. Como cuerpo de agua se consideró al tanque Tenorio y los cauces que descargan en él.

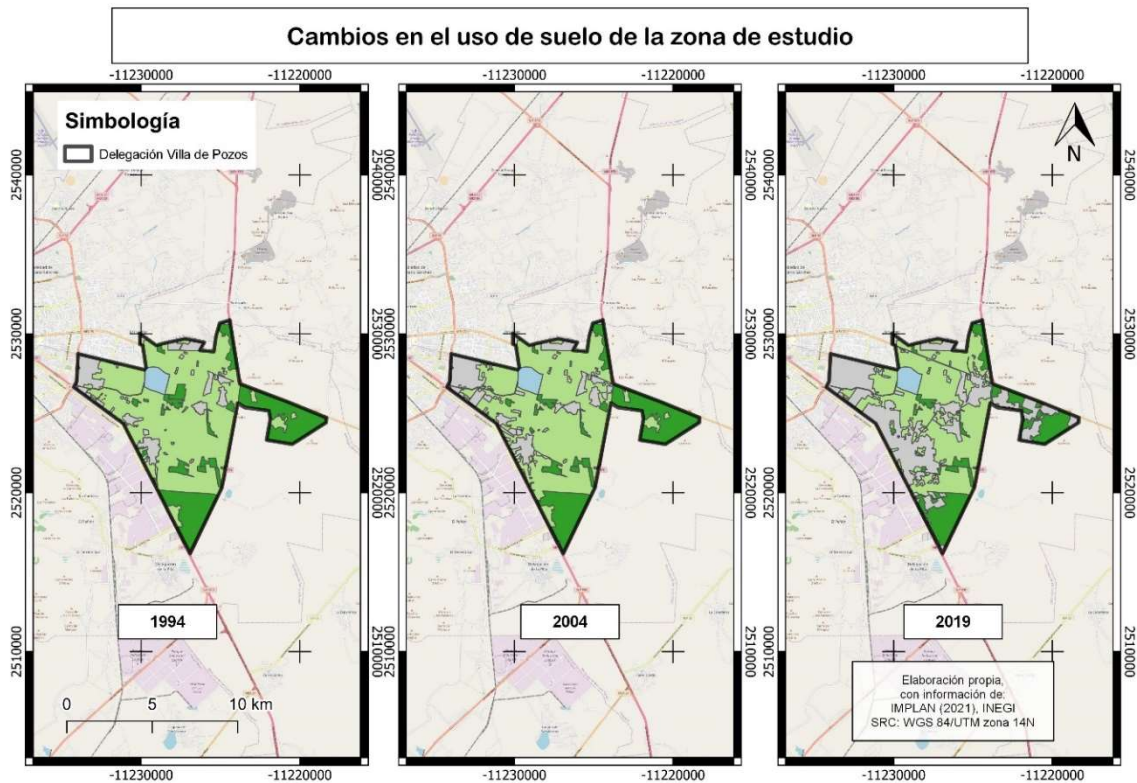


Figura 1-9 - Variación de la extensión de usos de suelo en la Delegación, elaboración propia con información de INEGI

Al determinar la extensión total de cada clasificación en cada año usado para la comparación se obtuvo información suficiente para generar un gráfico que representa la variación en el tamaño de cada una de las clases en tres décadas diferentes (Figura 1-9). Como se puede observar ha habido una reducción considerable en la extensión de área agrícola y matorral xerófilo, la cual se ha convertido en una extensión de la mancha urbana (Figura 1-10), esto responde a la necesidad de vivienda de trabajadores de la Zona Industrial ubicada frente a la Delegación producto de la privilegiada posición geográfica que ha vuelto a la ciudad un centro de inversión y desarrollo industrial (Stevens, 2012), al crecimiento “natural” de la zona más densa de la ZM-SLP y al brote de fraccionamientos privados para la población de mayores ingresos que buscan apartarse de la mancha urbana principal y sus problemáticas.

Sin embargo, este crecimiento ha significado también el aumento de escurrimiento superficial al haber más áreas impermeabilizadas, que junto con el déficit de drenaje pluvial ha propiciado

la presencia de inundaciones y encharcamientos en diferentes puntos (Juárez, 2022), además el crecimiento poblacional aumenta la demanda de agua potable y en el caso de la Ciudad una mayor explotación de pozos profundos lo que eventualmente provoca el abatimiento de pozos.

El crecimiento desorganizado de la mancha urbana también ha causado una problemática respecto al acceso a áreas verdes de dominio público, en la zona más densamente poblada las áreas verdes son reducidas y algunas están en un estado de abandono considerable, lo que las hace poco atractivas para la población y la fauna local, pero atractivas para formar tiraderos clandestinos o estacionamientos improvisados agravando el problema de disponibilidad de espacios, contaminación y seguridad pública.

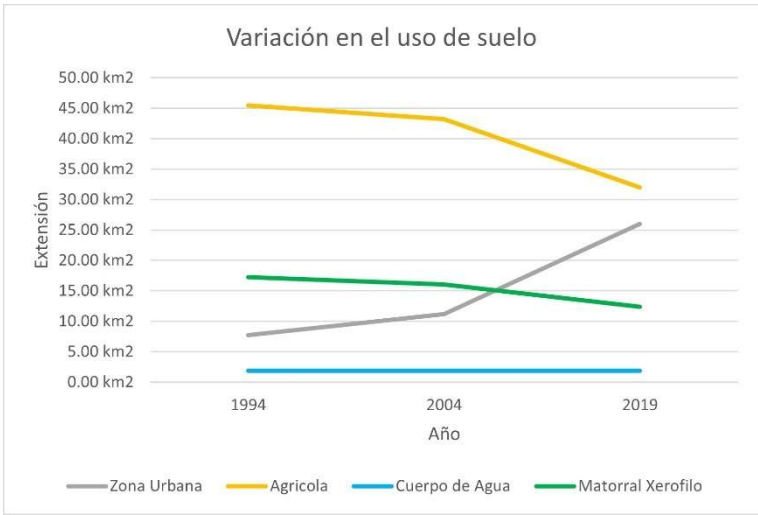


Figura 1-10 - Variaciones en la extensión de usos de suelo, elaboración propia con información de INEGI

Del mismo modo, la población en la Delegación Villa de Pozos ha incrementado en un 115% en comparación con 2010 (Figura 1-11). Estas 185 mil personas extras demandaron más espacios de vivienda, recreación y servicios, los cuales han derivado en un problema para el suministro de agua y drenaje y para la movilidad urbana, que les ha dado prioridad a grandes extensiones de concreto y asfalto para la circulación de vehículos particulares aumentando las áreas impermeables y el escurrimiento urbano cuando se presentan precipitaciones.



Figura 1-11 - Crecimiento poblacional de la delegación Villa de Pozos, la línea en naranja representa una interpolación realizada a partir de los índices de crecimiento del municipio de San Luis Potosí, elaboración propia con información de INEGI

Otros estudios indican que la zona metropolitana tiene una tendencia hacia las faldas de la Sierra de San Miguelito (zona considerada como de recarga) debido al impulso de los desarrollos inmobiliarios con una preferencia por la construcción horizontal (Romano, 2021), lo que eventualmente disminuiría la recarga del acuífero e incrementaría la escorrentía que viaja a asentamientos en menores elevaciones.

1.9 CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÓMICAS

El estado de San Luis Potosí cuenta con una población total de 2,822,255, de los cuales 911,908 se localizan en la capital con una edad media de 30 años y una composición del 51.7% mujeres y 48.3% hombres (INEGI, 2020b).

En cuanto a la distribución espacial de la población en el municipio, el Censo Nacional de Población y Vivienda del 2020 refiere la densidad de población es de 615.3 habitantes por kilómetro cuadrado en 294,324 viviendas.

En lo económico, el INEGI estima que la población económicamente activa es del 64.7%, con una proporción mayor de hombres activos económicamente (55.8% contra el 44.2% que corresponde a mujeres), el 35.3% no activo económicamente está compuesto principalmente por estudiantes (39.5% del total) y por personas dedicadas al hogar (35.9% del total).

Al respecto de actividades económicas, para el 2021 los principales productos comercializados internacionalmente fueron partes y accesorios de vehículos automotores, iluminación eléctrica

o equipos de señalización y neumáticos de goma destinados principalmente a Estados Unidos (Data México, 2022), y en ocupación económica la mayor parte de la población se dedica al comercio al por menor (comerciantes en establecimientos, empleados de ventas, despachadores y dependientes en comercios y vendedores ambulantes de artículos diversos que no sean alimentos), seguido de otros servicios no gubernamentales (mecánicos en mantenimiento y reparación de vehículos de motor, peluqueros, barberos, estilistas y peinadores y trabajadores de apoyo en la elaboración, reparación y mantenimiento mecánico de equipos, maquinaria y productos de metal y de precisión) y servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas (INEGI, 2019).

De acuerdo con mediciones realizadas en 2018 por CONEVAL, cerca de 43.4% de la población total del estado de San Luis Potosí se encuentra en situación de pobreza (con al menos una carencia social y un ingreso menor a la línea de pobreza por ingresos), del que 36.1% se encuentra en pobreza moderada (con más carencias, pero no cae en pobreza extrema) y el 7.3% estaba en una situación de pobreza extrema (con tres o más carencias sociales y menores ingresos a la línea de pobreza extrema).

Además, solo el 21.5% de la población se encontraba fuera de algún nivel de pobreza o en vulnerabilidad de pobreza en todo el estado, mientras que el 27.7% se encontraba en un grado de vulnerabilidad por carencias sociales y un 7.4% en vulnerabilidad por ingresos (CONEVAL, 2020).

De acuerdo con los registros del CONEVAL del 2008 al 2018 la pobreza en el estado disminuyó del 50.9% al 43.4%, mientras que la pobreza extrema se redujo de un 15.4% al 7.3%.

2 MODELACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL Y COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para realizar la evaluación del drenaje pluvial y escurrimiento superficial en la zona de estudio se optó por emplear un modelo hidráulico e hidrológico que permita simular la respuesta de la cuenca a partir de datos de precipitación y el comportamiento hidráulico de la red de drenaje de acuerdo con esta respuesta. Para seleccionar el modelo más adecuado para el proyecto se consultó la bibliografía referente a los modelos disponibles en la red, considerando especialmente la información necesaria para su ejecución y las capacidades de simulación (Tabla 2-1).

Tabla 2-1 - Modelos computacionales para la simulación hidrológica

Modelo	Parámetros requeridos	Modelación hidrológica	Modelación hidráulica	Modelación SBN
Tetis®	Series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial y temperatura; ráster de elevaciones; ráster de características del suelo y subsuelo	Si	No	No
WEAP®	Análisis de oferta y demanda de agua; ráster MDE; cobertura vegetal; series de precipitación y temperatura	Si	No	No
HEC® HMS®	Delimitaciones de cuencas; trazo de cauces; series de precipitación y temperatura; cobertura vegetal; uso de pesticidas; arrastre de sedimentos urbanos	Si	No	no
SWMM®	Propiedades geomorfológicas de cuencas; series de precipitación; coeficientes de escurrimiento; propiedades de conductos colectores	Si	Si	Si

Debido a que la información requerida por el modelo SWMM® no es tan extensa para realizar una modelación básica, pero sobre todo porque la última versión ha incorporado un módulo para simular Soluciones Basadas en la Naturaleza (en forma de Low Impact Development) (Rossman, 2015) y de esta manera conocer su impacto en la hidrología de una cuenca y en el desempeño hidráulico de un sistema de drenaje convencional, es que se ha seleccionado este modelo para realizar las simulaciones necesarias para evaluar el drenaje pluvial convencional con la incorporación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.

2.1 DETERMINACIÓN DE UNA TORMENTA DE DISEÑO

Para correr el modelo de lluvia – escurrimiento SWMM® requiere de un hietograma de precipitación para determinado periodo de retorno y duración de tormenta, con este fin se recolectó información estaciones meteorológicas convencionales.

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para usarse en el diseño de un sistema hidrológico. Estas pueden basarse en información histórica de precipitación en un punto o pueden construirse a partir de información disponible en regiones aledañas (Chow et al., 1994).

2.1.1 Estaciones usadas en el estudio

Utilizando información obtenida de la base de datos de estaciones proporcionada por CONAGUA se seleccionaron las estaciones más relevantes para el estudio por su distancia y cantidad de información disponible. De esto se seleccionaron 8 estaciones de las que se usó la información de precipitación máxima mensual (Tabla 2-2).

Tabla 2-2 - Estaciones seleccionadas para el estudio (CONAGUA, s.f.)

Id	Estación
24004	Armadillo de Los Infante
24024	El Peaje
24069	San Luis Potosí (DGE)
24070	San Luis Potosí (OBS)
24081	Soledad de Graciano Sánchez
24106	Zaragoza
24111	San Luis Potosí (SMN)
24179	Xoconoxtle

2.1.2 Obtención de curvas de Intensidad – Duración – Periodo de Retorno

Como se comentó previamente, para el diseño de un drenaje pluvial urbano es necesario contar con una tormenta de diseño, la cuál será el evento para el cual el drenaje debe funcionar. Esta tormenta de diseño será una relación entre la intensidad de precipitación (medida en milímetros de lluvia por hora), la duración (medida en minutos) y el periodo de retorno adecuado para el tipo de drenaje que se diseñará (Chow et al., 1994).

En casos en los que existen estaciones meteorológicas automáticas las gráficas que relacionan intensidad – duración – periodo de retorno pueden obtenerse directamente de los datos registrados ya que estos son almacenados a una escala de minutos, sin embargo, en la mayor parte de México se cuentan con estaciones meteorológicas convencionales, las cuales tienen registros diarios anotados por una persona, los cuales en muchos casos presentan errores o datos faltantes, en este tipo de condiciones se debe hacer un análisis de la información y propuesta de curvas I-D-Tr.

En primer lugar, se debe establecer bajo qué condiciones de la normativa existente se debe realizar el diseño de la infraestructura de drenaje pluvial, CONAGUA cuenta una distribución de directrices para distintos tipos de infraestructura hidráulica llamado *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*, entre sus publicaciones se encuentra una dedicada al drenaje pluvial urbano (CONAGUA, 2015), donde se incluyen los periodos de retorno con lo que se deben diseñar los colectores según su contexto, es en este manual donde se presenta la siguiente Figura 2-2 y Figura 2-2 donde se presentan distintos periodos de retorno para diseñar una red de drenaje pluvial. De acuerdo con la cantidad de población y las características del área (mostrada en el capítulo anterior) se seleccionó un periodo de retorno de 10 años.

Tipo	Descripción	Tr (años)
Centro de negocios	Zonas donde el uso principal es para las actividades de venta al por menor o de negocios y donde los edificios son comúnmente construidos hasta los límites de la propiedad, los toldos sobresalen sobre la banqueta y el paisaje es mínimo o inexistente. Estas áreas de negocios a menudo se encuentran en las partes más antiguas de la ciudad o pueblo	10
Áreas comerciales	Zonas donde los usos primarios incluyen las ventas al por menor, actividades comerciales, hoteles etc. Pueden incluir centros para exposiciones , restaurantes, clubes deportivos	10
Zonas industriales	Las áreas donde las actividades principales llevadas a cabo son la producción, el procesamiento de productos, instalaciones de almacenamiento, etc	2
Zonas urbanas con alta densidad	Áreas urbanas que tienen más de 20 viviendas por cada 10 000 m ² (hectárea), como edificios de departamentos, unidades habitacionales y zonas suburbanas altamente pobladas	10
Zonas urbanas de mediana densidad	Las áreas residenciales que tienen más de 5 y hasta 20 unidades de vivienda por cada 10 000 m ² (hectárea)	2
Zonas rurales	Áreas residenciales rurales que tienen entre 2 y 5 unidades de vivienda por cada 10 000 m ² (hectárea)	2
Espacios abiertos	Las áreas abiertas utilizadas principalmente para la recreación, como parques, campos de golf, etc	1

Figura 2-1 - Periodos de retorno para diseño de redes de drenaje pluvial (CONAGUA, 2015)

Estructuras de drenaje pluvial	Tr (años)
Aeropuertos y estaciones de ferrocarril y de autobuses	10
Cunetas y contracunetas en caminos y carreteras	5
Alcantarillas para paso de cauces pequeños en caminos locales que comunican poblados pequeños	10 a 25
Alcantarillas para paso de cauces pequeños en caminos regionales que comunican poblados medianos	25 a 50
Alcantarillas para paso de cauces pequeños en caminos primarios que comunican poblados grandes	50 a 100
Poblados pequeños con menos de 100 000 habitantes	2 a 5
Poblados medianos entre 100 000 y 1 000 000 de habitantes	5 a 10
Poblados grandes con más de 1 000 000 de habitantes	10 a 25

Figura 2-2 - Periodos de retorno para diseño de redes de drenaje pluvial (CONAGUA, 2015)

Se sabe que la intensidad de precipitación (i) es una función de la altura de precipitación (P) en un determinado tiempo (d):

$$i = \frac{P}{d}$$

Para estimar la precipitación máxima que se presentaría en 24 hrs se utiliza la distribución Gumbel para valores extremos, expresada como:

$$X_{Tr} = \beta - \left(\frac{1}{\alpha}\right) * \ln\left(\ln\frac{Tr}{Tr - 1}\right)$$

Donde:

P_{1440}^{Tr} ; es la precipitación máxima esperada en 24 hrs para un periodo de retorno de Tr años.

$$\beta = \bar{X} - \frac{\mu_y}{\alpha} \qquad \alpha = \frac{\sigma_y}{S}$$

β es el parámetro de ubicación, dependiente de la media de la muestra de datos máximos (\bar{X}), la desviación típica (μ_y) de una serie de N valores Y_i y el parámetro de escala α , el cual a su vez depende de la media (σ_y) de la misma serie de N valores Y_i (Tabla 2-3) y la desviación estándar (S) de la muestra de valores máximos de precipitación (Sánchez, 2008).

$$y_i = -\ln\left(\ln\left(\frac{N+1}{i}\right)\right)$$

Tabla 2-3 - Relación de medias y desviación típica de una serie de valores Y_i según el tamaño de la muestra, elaborada con información de Sánchez (2008)

No. De Datos	μ_y	σ_y
10	0.4952	0.9496
20	0.5236	1.0628
30	0.5362	1.1124
40	0.5436	1.1413
50	0.5485	1.1607
60	0.5521	1.1747
70	0.5548	1.1854

Para la creación de la distribución de Intensidad – Duración – Periodo de retorno (I-D-Tr) se requiere conocer la precipitación presentada en intervalos menores a 24 horas, sin embargo, la información disponible en las estaciones meteorológicas convencionales con que cuenta principalmente CONAGUA cuenta con información en lapsos de 24 horas por lo que se debe realizar una inferencia para obtener la precipitación a intervalos menores.

Para ello se utilizó la fórmula propuesta por Bell (1969):

$$P_t^{Tr} = P_{60}^{Tr} [0.35 \ln(Tr) + 0.76] [0.54t^{0.25} - 0.5]$$

Para la cual se necesita conocer el periodo de retorno Tr , la precipitación máxima presentada en el minuto 60 y el instante t en el que se quiere conocer la precipitación.

A través de la distribución de Gumbel se puede calcular una precipitación de 24 horas para un periodo de retorno de 2 años, y para considerar el efecto de la geografía en la precipitación se utiliza el factor de convectividad (R) propuesto por (Baeza, 2007).

$$P_{60}^{Tr} = R * P_{1440}^{Tr}$$

Una vez conociendo la precipitación P_{60} se procede a usar la fórmula de Bell para cada minuto de la precipitación.

Con la información de precipitación máxima anual se obtuvo un máximo de cada año de entre el conjunto de estaciones, obteniendo los parámetros correspondientes, entre ellos el factor de convectividad propuesto por Baeza (2007) que se presenta en la Figura 2-3, se obtuvieron intensidades para un periodo de retorno de 10 años de acuerdo con lo que marca CONAGUA en el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) para drenaje pluvial para zonas urbanas de alta densidad (CONAGUA, 2015).

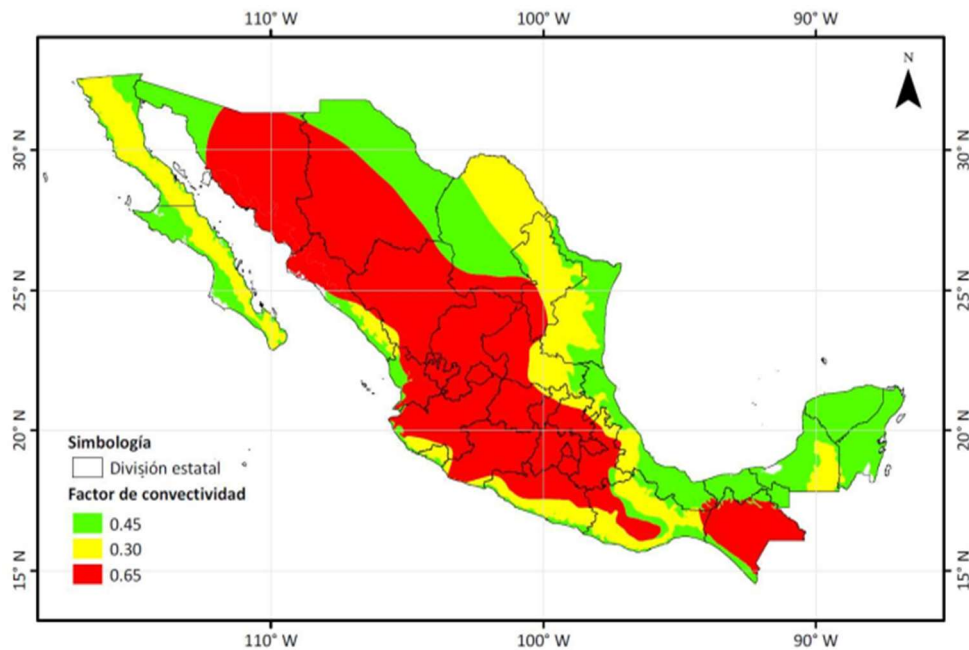


Figura 2-3 - Mapa de distribución de Factor de convectividad (R) (Baeza, 2007)

Con estas intensidades fue posible generar la gráfica de Intensidad – Duración – Periodo de Retorno mostrada en la Figura 2-4.

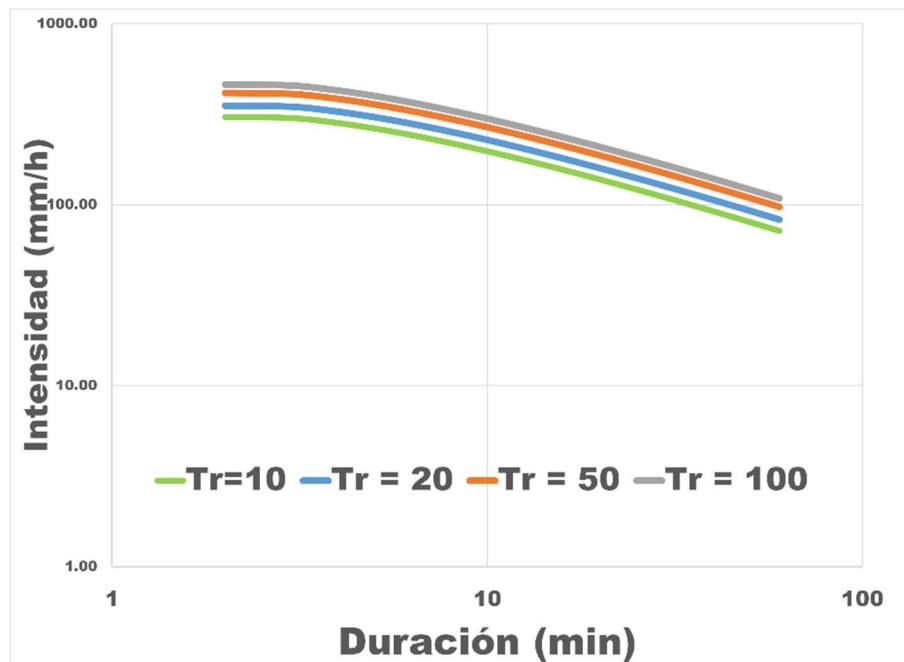


Figura 2-4 - Gráficas I-D-Tr para periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años

2.1.3 Cálculo del hietograma de precipitación

Para obtener la tormenta de diseño y su correspondiente hietograma de precipitación se utilizó el método del bloque alterno (Chow et al., 1994), el cual consiste en la representación de la tormenta con alturas de precipitación para n intervalos con una duración de Δt para una tormenta de duración d . Conociendo el periodo de retorno Tr se toman las intensidades de precipitación para cada Δt , y la altura de precipitación se obtiene del producto de multiplicar la intensidad y la duración. La altura máxima obtenida de estos productos será la máxima producida en la precipitación, y se irán alternando en orden descendente a la derecha e izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño.

Siguiendo este procedimiento se obtiene la siguiente gráfica del hietograma de precipitación para una tormenta de dos horas para un periodo de retorno de 10 años.

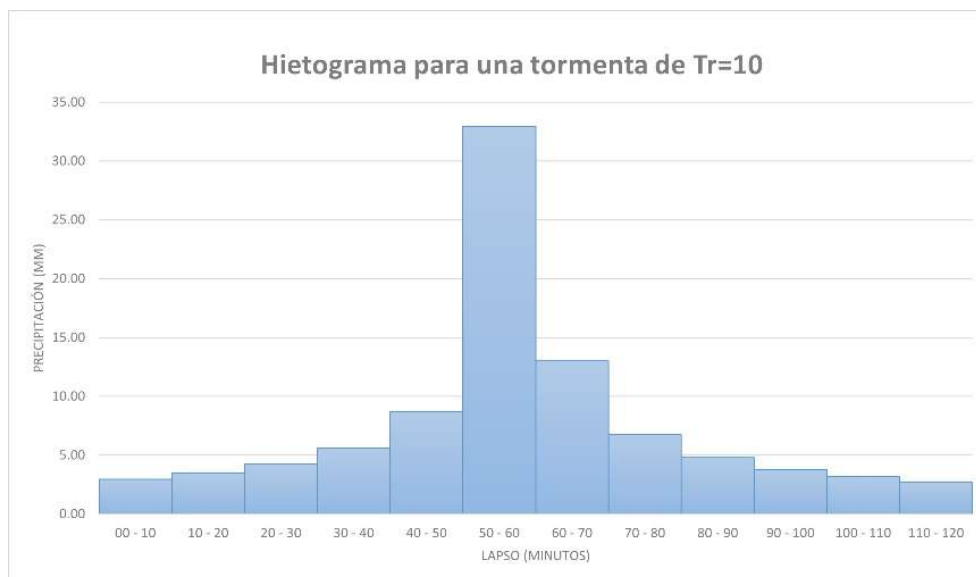


Figura 2-5 - Hietograma de precipitación para 10 años y una duración de 2 horas

2.2 CLASIFICACIÓN DE USOS Y TIPOS DE SUELO EN LA ZONA DE ESTUDIO

El software SWMM® calcula la escorrentía e infiltración a través de modelos conceptuales de subcuencas con diferentes propiedades que serán asignadas según el modelo o el detalle con que se quiera producir.

Para la estimación de la escorrentía el programa requiere una serie de propiedades para cada subcuenca (Figura 2-8), a través de las cuales realizará el modelo. Como se estará evaluando un sistema de drenaje pluvial convencional será necesario determinar las áreas de influencia para cada boca tormenta que forma parte del sistema, por lo que además de la información de la red proporcionada por INTERAPAS también fue necesario hacer una inspección visual para buscar los bocatormentas. Una vez que se identificaron los bocatormentas se generó una nube de puntos sobre el conjunto de líneas de calles a los que se les asignaría un valor de elevación a partir del modelo de elevaciones de INEGI a escala 1:10,000. Con estas elevaciones y el trazo de las calles se dibujaron líneas de dirección de flujo con las que se puede seguir la trayectoria de una gota de agua sobre el terreno. Conociendo las líneas de flujo fue posible determinar el trazo y extensión de las áreas de influencia o subcuencas para cada bocatormentas. Con este procedimiento (Figura 2-6) se estimaron 41 áreas de influencia o subcuencas como se muestra en la Figura 2-7.



Figura 2-6 - Proceso para obtención de las áreas de influencia

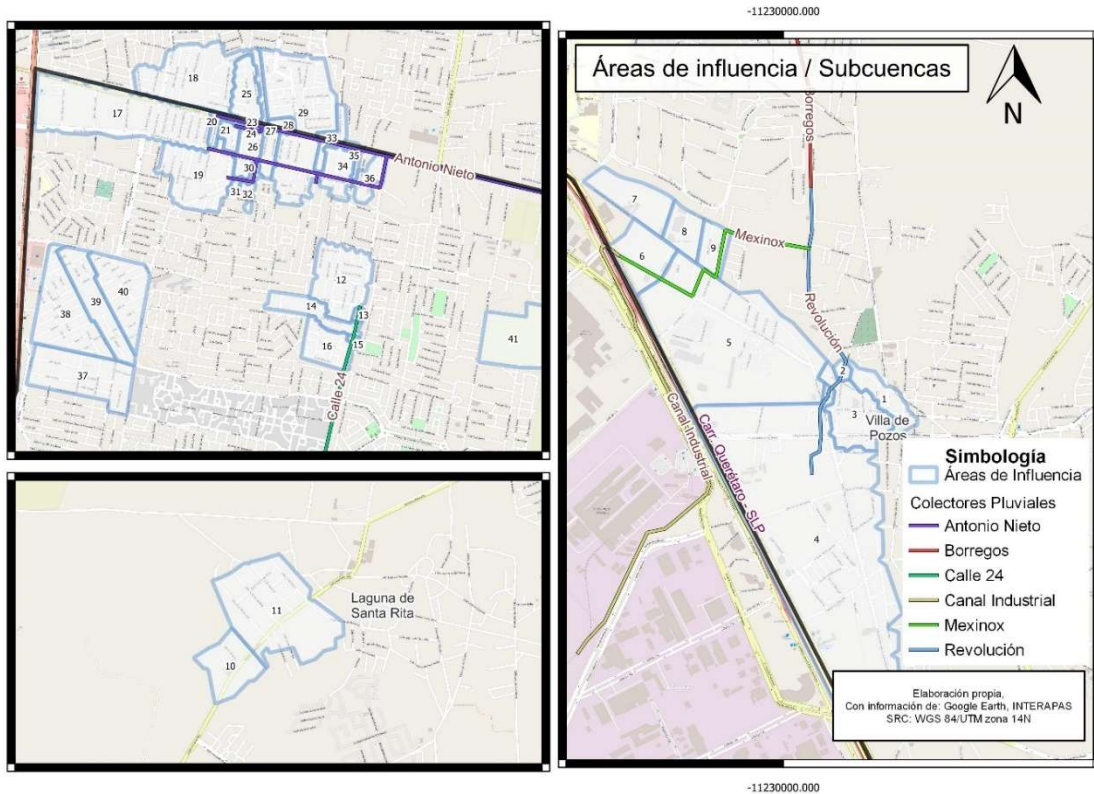


Figura 2-7 - Áreas de influencia del drenaje pluvial

Como se expresó al inicio de este capítulo SWMM® tiene una serie de requisitos mínimos para realizar una modelación, en el caso de los elementos del tipo subcuenca se debe calcular el área, el ancho (relación entre el área y longitud de la cuenca), porcentaje de área impermeable (% Imperv), el valor de Manning para flujo superficial en áreas impermeables (N-Imperv), el valor de Manning para flujo superficial en áreas permeables (N-Perv), y debido a que para el modelo de infiltración se usará el método de Número de Curva del Soil Conservation Service (CONAGUA, 2015) se calculará también este valor. En la Tabla 2-4 se expresan los parámetros requeridos y sus unidades, del mismo modo en la Figura 2-8 se enmarcan estas propiedades.

Tabla 2-4 - Parámetros mínimos para la estimación del escurrimiento en una subcuenca

Parámetro	Unidades
Área	Hectáreas
Ancho (Width)	Metros
Pendiente (% Slope)	Porcentual
Porcentaje de área impermeable (% Imperv)	Porcentual
Valor de Manning para la fracción impermeable (N-Imperv)	Adimensional
Valor de Manning para la fracción permeable (N-Perv)	Adimensional
Valor del número de curva del SCS	Adimensional

Property	Value
Name	Subc-17
X-Coordinate	302797.019
Y-Coordinate	2449534.683
Description	
Tag	
Rain Gage	Pluv-1
Outlet	N-10
Area	20.2242
Width	187.95
% Slope	0.6533
% Imperv	78.99
N-Imperv	0.0103
N-Perv	0.0196
Dstore-Imperv	0.05
Dstore-Perv	0.05
%Zero-Imperv	25
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration Data	CURVE_NUMBER
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	4
Land Uses	0
Initial Buildup	NONE
Curb Length	0
N-Perv Pattern	
Dstore Pattern	

User-assigned name of subcatchment

Figura 2-8 - Propiedades de una subcuenca en SWMM®

Para la cuantificación de áreas correspondientes a las diferentes propiedades estimadas se usó la plataforma QGIS y la información vectorial disponible a través del INEGI sobre los tipos de suelo a escala 1:250,000 (Figura 2-9) (INEGI, 2007) y los usos de suelo a escala 1:250,000 (Figura 2-10) (INEGI, 2015).

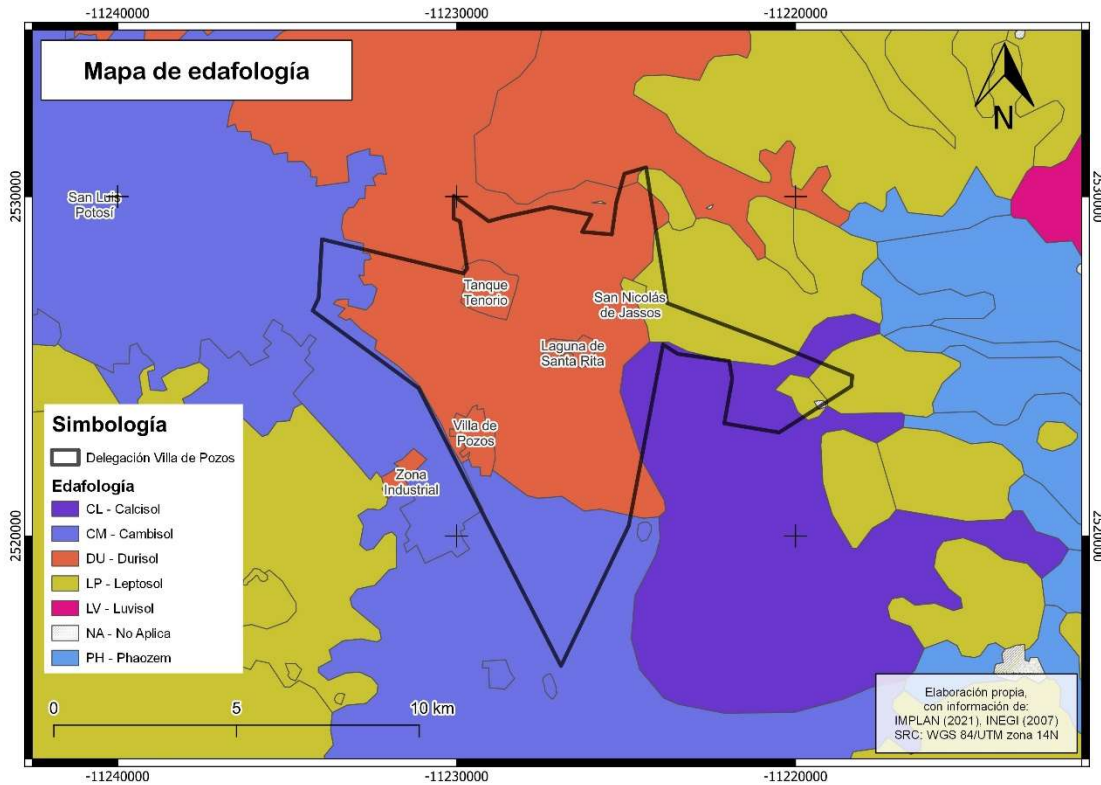


Figura 2-9 - Mapa de edafología para el área de estudio con información de INEGI (2007)

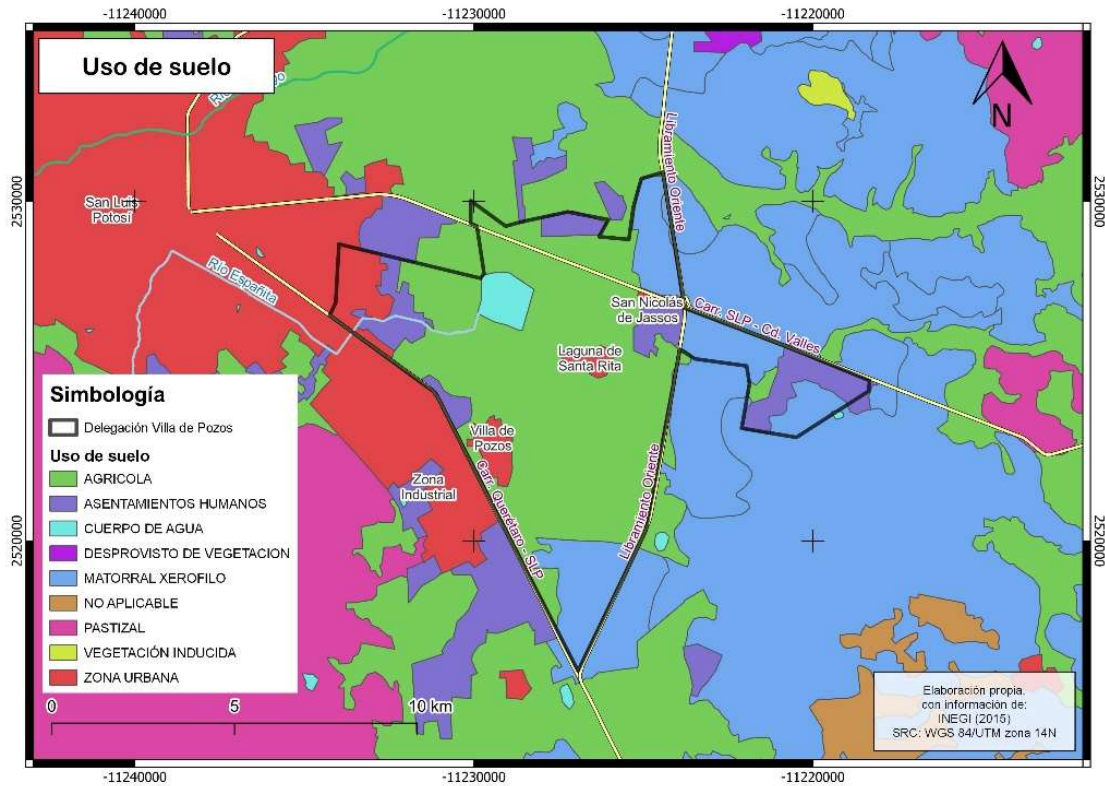


Figura 2-10 - Mapa de usos de suelo en la zona de estudio, con información de INEGI (2015)

Para la estimación del valor n de Manning se partió de la información generada por INEGI a partir del Marco Geoestadístico en formato vectorial (INEGI, 2020a), esta información cuenta con una digitalización a nivel de manzana, lo que permite asignarle un tipo de superficie (vivienda unifamiliar, parque, vialidad, industria, etc.) a cada una, y con ello un valor de coeficiente n . Al mismo tiempo estas áreas sirvieron para determinar el porcentaje de área impermeable. La información completa para cada área de influencia o subcuenca se ha plasmado en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5 - Propiedades de subcuencas ingresadas en el modelo

SubC	A (ha)	Lcp	Width	% Slope	%-Imperv	N-Imperv	N-Perv	N _{scs}
1	4.3230	526.27	82.14	0.0342	57.96	0.0108	0.0194	100.00
2	0.6762	98.98	68.32	0.3233	57.96	0.0108	0.0000	97.69
3	8.5415	409.70	208.48	1.1447	57.66	0.0113	0.0130	99.80
4	89.6211	1737.29	515.87	0.3068	53.64	0.0084	0.0735	90.82
5	44.5027	749.26	593.96	0.6446	55.70	0.0078	0.0941	93.86
6	7.0044	196.84	355.84	0.1829	86.49	0.0141	0.0000	100.00

SubC	A (ha)	Lcp	Width	% Slope	%-Imperv	N-Imperv	N-Perv	N _{scs}
7	6.8695	467.27	147.01	0.0963	81.13	0.0147	0.0000	99.92
8	3.7411	231.16	161.84	1.3973	82.28	0.0144	0.0000	100.00
9	3.1473	234.15	134.41	0.8072	82.64	0.0143	0.0000	100.00
10	6.6954	313.70	213.43	0.0255	53.30	0.0076	0.0995	86.25
11	20.9468	632.57	331.14	0.0174	51.84	0.0087	0.0647	98.54
12	7.7751	523.96	148.39	0.2462	60.58	0.0110	0.0144	96.95
13	0.3456	73.20	47.21	1.0382	65.27	0.0117	0.0000	81.74
14	3.7230	532.92	69.86	0.0582	51.13	0.0067	0.1001	99.00
15	0.1924	36.84	52.22	4.7497	55.78	0.0077	0.0798	100.00
16	4.4028	418.25	105.27	0.1602	58.86	0.0098	0.0376	100.00
17	20.2242	1076.06	187.95	0.6533	79.64	0.0105	0.0169	100.00
18	12.9549	668.22	193.87	0.3936	61.07	0.0109	0.0171	100.00
19	9.7770	484.59	201.76	0.5716	62.61	0.0117	0.0000	100.00
20	0.8791	152.39	57.69	0.2034	63.24	0.0117	0.0000	100.00
21	1.2203	156.33	78.06	0.6269	57.14	0.0118	0.0000	100.00
22	0.0749	65.04	11.52	0.9071	70.13	0.0105	0.0204	100.00
23	0.0961	42.75	22.48	0.1637	68.26	0.0116	0.0000	100.00
24	0.0947	42.46	22.29	0.6358	67.87	0.0116	0.0000	100.00
25	4.1509	400.05	103.76	0.3824	62.43	0.0110	0.0138	100.00
26	2.5339	234.27	108.16	0.2860	64.02	0.0117	0.0000	100.00
27	3.0920	625.38	49.44	0.0927	67.93	0.0116	0.0000	100.00
28	0.8978	141.17	63.60	1.0342	32.56	0.0036	0.1684	100.00
29	18.6392	812.97	229.27	0.1169	65.39	0.0116	0.0019	100.00
30	0.4549	127.47	35.69	0.4315	64.20	0.0117	0.0000	100.00
31	0.4296	136.12	31.56	0.5510	65.24	0.0117	0.0000	100.00
32	0.6912	145.82	47.40	0.5890	66.72	0.0116	0.0000	100.00
33	2.0635	435.26	47.41	0.2435	63.71	0.0117	0.0000	100.00
34	3.3875	301.53	112.34	0.1857	60.91	0.0098	0.0372	100.00
35	0.8130	236.83	34.33	0.4518	62.75	0.0114	0.0052	100.00
36	2.2787	242.00	94.16	0.6694	63.63	0.0117	0.0000	94.11
37	13.7998	672.80	205.11	0.0043	61.00	0.0118	0.0000	100.00
38	10.8539	620.24	175.00	0.0124	73.00	0.0115	0.0000	100.00
39	10.0975	609.02	165.80	0.0099	61.00	0.0117	0.0000	100.00

SubC	A (ha)	Lcp	Width	% Slope	%-Imperv	N-Imperv	N-Perv	N _{scs}
40	5.3886	423.09	127.36	0.0103	64.00	0.0117	0.0000	100.00
41	19.8440	736.70	269.36	0.0026	35.00	0.0000	0.1700	81.00

2.3 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL EN LA DELEGACIÓN VILLA DE POZOS

Para determinar el trazo y características del drenaje pluvial existente en la zona de estudio se realizó una solicitud de información a través de la Plataforma Nacional de Transparencia disponible en <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/> donde se solicitó al Organismo Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado (INTERAPAS) dicha información y fue entregada en formato PDF a través del mismo portal.

La información de los colectores pluviales dada por INTERAPAS se expresa de forma resumida en la Tabla 2-6, el contenido completo de la respuesta dada por el organismo se puede observar en el apartado de anexos.

Tabla 2-6 - Colectores declarados por INTERAPAS

Colector	Diámetro/Ancho	Material
Mexinox	1.52 m	PEAD
Revolución	1.22 m	Concreto
D'Rada	0.38 m – 1.52 m	PEAD

Es importante incluir, que debido a que no existe un drenaje pluvial en todas las áreas de interés se considerará como medio de conducción la propia calle (Figura 2-11), considerando que sus dimensiones son tomadas sobre el explorador Google[®] Earth[®] y los materiales con que se forma el pavimento en ellas (concreto, terracería, asfalto, etc.), así mismo para contrastar el comportamiento y beneficio de los SUDS en áreas densamente pobladas como en Prados de San Vicente 2^a Sección con áreas más rurales como Laguna de Santa Rita.

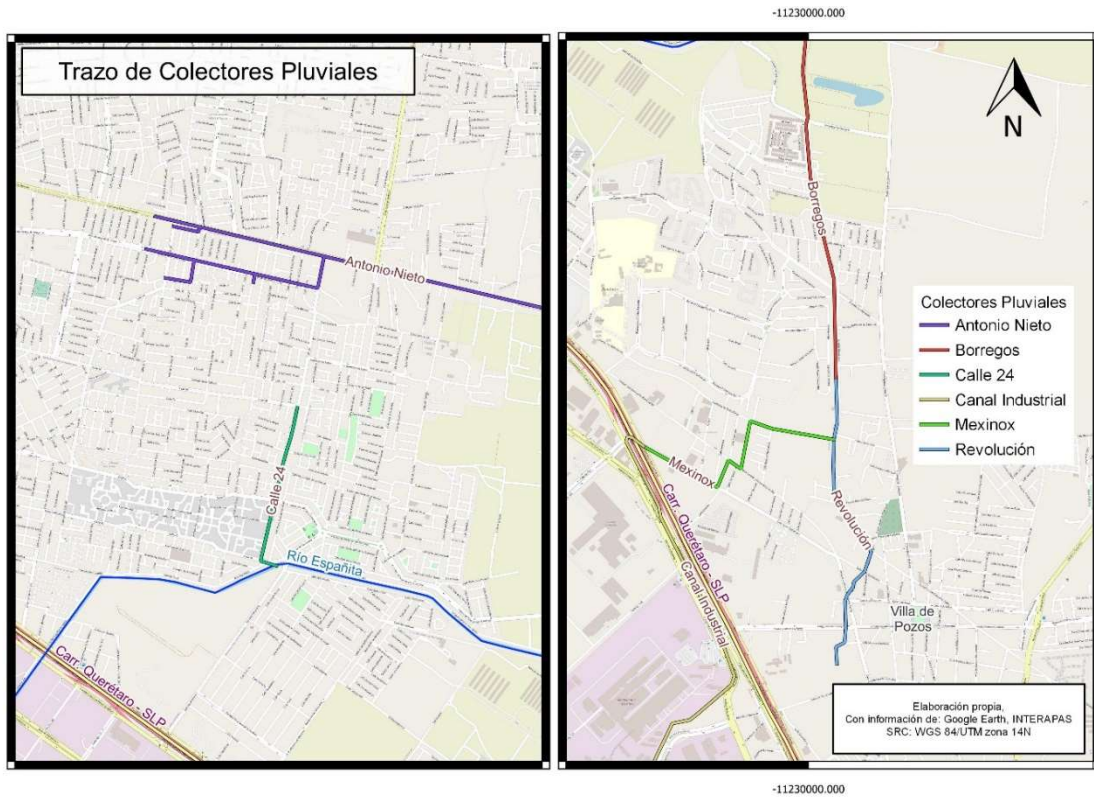


Figura 2-11 - Trazo de colectores pluviales en la zona de estudio, elaboración propia con información de INTERAPAS

2.4 MODELACIÓN HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA

2.4.1 Parámetros utilizados en el modelo

Para la simulación de la respuesta de la cuenca SWMM® requiere un hietograma de la tormenta de diseño ingresado como una serie de tiempo (Figura 2-12) en intervalos que se deseé, en este caso a cada diez minutos.

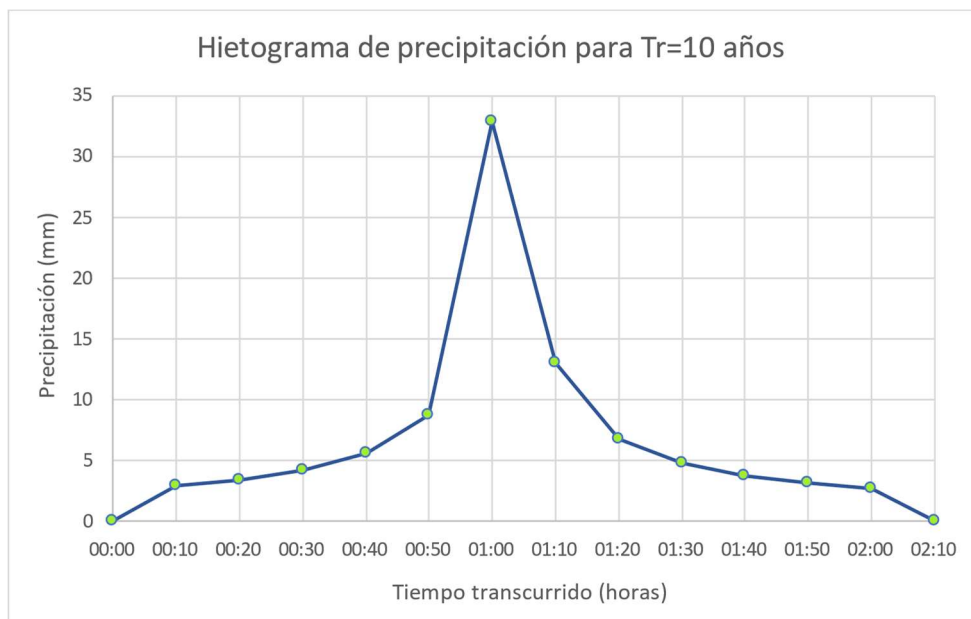


Figura 2-12 - Gráfica del hietograma de precipitación como se ha ingresado en SWMM®

Junto con la información de precipitación se ingresan las propiedades geomorfológicas de cada subcuenca y además se agregan los coeficientes de Manning y el Número de Curva de cada una (Tabla 2-7).

Tabla 2-7 - Propiedades usadas para cada subcuenca

SubC	A (ha)	Lcp	Width	% Slope	%-Imperv	N-Imperv	N-Perv	N _{scs}
1	4.3230	526.27	82.14	0.0342	57.96	0.0108	0.0194	100.00
2	0.6762	98.98	68.32	0.3233	57.96	0.0108	0.0000	97.69
3	8.5415	409.70	208.48	1.1447	57.66	0.0113	0.0130	99.80
4	89.6211	1737.29	515.87	0.3068	53.64	0.0084	0.0735	90.82
5	44.5027	749.26	593.96	0.6446	55.70	0.0078	0.0941	93.86
6	7.0044	196.84	355.84	0.1829	86.49	0.0141	0.0000	100.00
7	6.8695	467.27	147.01	0.0963	81.13	0.0147	0.0000	99.92
8	3.7411	231.16	161.84	1.3973	82.28	0.0144	0.0000	100.00
9	3.1473	234.15	134.41	0.8072	82.64	0.0143	0.0000	100.00
10	6.6954	313.70	213.43	0.0255	53.30	0.0076	0.0995	86.25
11	20.9468	632.57	331.14	0.0174	51.84	0.0087	0.0647	98.54
12	7.7751	523.96	148.39	0.2462	60.58	0.0110	0.0144	96.95
13	0.3456	73.20	47.21	1.0382	65.27	0.0117	0.0000	81.74
14	3.7230	532.92	69.86	0.0582	51.13	0.0067	0.1001	99.00
15	0.1924	36.84	52.22	4.7497	55.78	0.0077	0.0798	100.00
16	4.4028	418.25	105.27	0.1602	58.86	0.0098	0.0376	100.00
17	20.2242	1076.06	187.95	0.6533	79.64	0.0105	0.0169	100.00
18	12.9549	668.22	193.87	0.3936	61.07	0.0109	0.0171	100.00

SubC	A (ha)	Lcp	Width	% Slope	%-Imperv	N-Imperv	N-Perv	N _{scs}
19	9.7770	484.59	201.76	0.5716	62.61	0.0117	0.0000	100.00
20	0.8791	152.39	57.69	0.2034	63.24	0.0117	0.0000	100.00
21	1.2203	156.33	78.06	0.6269	57.14	0.0118	0.0000	100.00
22	0.0749	65.04	11.52	0.9071	70.13	0.0105	0.0204	100.00
23	0.0961	42.75	22.48	0.1637	68.26	0.0116	0.0000	100.00
24	0.0947	42.46	22.29	0.6358	67.87	0.0116	0.0000	100.00
25	4.1509	400.05	103.76	0.3824	62.43	0.0110	0.0138	100.00
26	2.5339	234.27	108.16	0.2860	64.02	0.0117	0.0000	100.00
27	3.0920	625.38	49.44	0.0927	67.93	0.0116	0.0000	100.00
28	0.8978	141.17	63.60	1.0342	32.56	0.0036	0.1684	100.00
29	18.6392	812.97	229.27	0.1169	65.39	0.0116	0.0019	100.00
30	0.4549	127.47	35.69	0.4315	64.20	0.0117	0.0000	100.00
31	0.4296	136.12	31.56	0.5510	65.24	0.0117	0.0000	100.00
32	0.6912	145.82	47.40	0.5890	66.72	0.0116	0.0000	100.00
33	2.0635	435.26	47.41	0.2435	63.71	0.0117	0.0000	100.00
34	3.3875	301.53	112.34	0.1857	60.91	0.0098	0.0372	100.00
35	0.8130	236.83	34.33	0.4518	62.75	0.0114	0.0052	100.00
36	2.2787	242.00	94.16	0.6694	63.63	0.0117	0.0000	94.11
37	13.7998	672.80	205.11	0.0043	61.00	0.0118	0.0000	100.00
38	10.8539	620.24	175.00	0.0124	73.00	0.0115	0.0000	100.00
39	10.0975	609.02	165.80	0.0099	61.00	0.0117	0.0000	100.00
40	5.3886	423.09	127.36	0.0103	64.00	0.0117	0.0000	100.00
41	19.8440	736.70	269.36	0.0026	35.00	0.0000	0.1700	81.00

Del mismo modo para representar los tramos de cada colector estos se trazan sobre el programa y se le asignan propiedades de longitud, diámetro o profundidad y coeficiente de Manning (Tabla 2-8), en caso de ser canales naturales o construidos se puede ingresar una sección para cada tramo.

Tabla 2-8 - Propiedades de colectores en la Delegación Villa de Pozos

Colector	Tramo	Zona	Tipo	Longitud	Material	Manning	Profundidad/ Diámetro	Ancho
Antonio Nieto	T-1	Norte	Tubería	122.91	PEAD	0.009	1.52	-
	T-2		Tubería	120.56	PEAD	0.009	1.52	-
	T-3		Tubería	142.45	PEAD	0.009	1.52	-
	T-4		Tubería	494.37	PEAD	0.009	1.52	-
	T-5		Tubería	33.40	PEAD	0.009	1.52	-
Praderas	T-6	Tubería	45.15	PEAD	0.009	1.52	-	
	T-7	Tubería	46.12	PEAD	0.009	1.52	-	
	T-8	Tubería	24.55	PEAD	0.009	1.52	-	

Colector	Tramo	Zona	Tipo	Longitud	Material	Manning	Profundidad/ Diámetro	Ancho
Ricardo Basilio	T-9		Tubería	118.86	PEAD	0.009	1.52	-
	T-10		Tubería	124.83	PEAD	0.009	1.52	-
	T-11		Tubería	97.35	PEAD	0.009	1.52	-
	T-12		Tubería	214.27	PEAD	0.009	1.52	-
	T-13		Tubería	178.53	PEAD	0.009	1.52	-
	T-14		Tubería	137.88	PEAD	0.009	1.52	-
	T-15		Tubería	159.55	PEAD	0.009	1.52	-
Sta. Martha	T-16		Tubería	33.88	PEAD	0.009	1.52	-
	T-17		Tubería	51.86	PEAD	0.009	1.52	-
	T-18		Tubería	42.45	PEAD	0.009	1.52	-
	T-19		Tubería	108.98	PEAD	0.009	1.52	-
	T-20		Tubería	79.53	PEAD	0.009	1.52	-
C. 24	T-21		Tubería	60.72	PEAD	0.009	1.52	-
	T-22		Tubería	41.03	PEAD	0.009	1.52	-
	T-23		Tubería	141.83	PEAD	0.009	1.52	-
	T-24		Tubería	456.28	PEAD	0.009	1.52	-
	T-25		Tubería	83.39	PEAD	0.009	1.52	-
Antonio Nieto	T-26		Tubería	898.30	PEAD	0.009	1.52	-
	T-27		Tubería	1299.96	PEAD	0.009	1.52	-
C. 71	T-28		Calle	142.75	Asfalto	0.013	0.15	11.38
	T-29		Calle	56.16	Asfalto	0.013	0.15	9.38
	T-30		Calle	207.71	Asfalto	0.013	0.15	9.63
Canal Agrícola	T-31		Canal	272.13	Suelo	0.025	0.50	1.00
	T-32		Canal	235.89	Suelo	0.025	0.50	1.00
Revolución	T-1		Canal	88.94	Concreto	0.011	1.22	1.22
	T-2		Canal	54.84	Concreto	0.011	1.22	1.22
	T-3		Canal	203.78	Concreto	0.011	1.22	1.22
	T-4		Canal	76.69	Concreto	0.011	1.22	1.22
	T-5		Canal	27.38	Concreto	0.011	1.22	1.22
	T-6		Canal	68.42	Concreto	0.011	1.22	1.22
	T-7		Canal	102.97	Concreto	0.011	1.22	1.22
	T-8		Canal	342.01	Concreto	0.011	1.22	1.22
	T-9	Sur	Canal	275.08	Concreto	0.011	1.22	1.22
	T-10		Canal	86.59	Concreto	0.011	1.22	1.22
	T-11		Canal	216.83	Concreto	0.011	1.22	1.22
	T-12		Tubería	437.13	PEAD	0.009	1.52	-
Mexinox	T-13		Tubería	151.00	PEAD	0.009	1.52	-
	T-14		Tubería	83.03	PEAD	0.009	1.52	-
	T-15		Tubería	231.21	PEAD	0.009	1.52	-
	T-16		Tubería	400.51	PEAD	0.009	1.52	-
	T-25		Calle	201.76	Asfalto	0.025	0.15	4.5

Colector	Tramo	Zona	Tipo	Longitud	Material	Manning	Profundidad/ Diámetro	Ancho
Calle Golondrinas	T-26		Calle	190.98	Asfalto	0.025	0.15	4.5
	T-27		Calle	175.69	Asfalto	0.025	0.15	4.5
	T-28		Calle	123.46	Asfalto	0.025	0.15	4.5
	T-29		Calle	399.27	Asfalto	0.025	0.15	4.5
Calle 24 Feb.	T-20		Calle	191	Asfalto	0.013	0.15	12.6
	T-21		Calle	136.1	Asfalto	0.013	0.15	12.6
	T-22		Calle	198.58	Asfalto	0.013	0.15	12.6
	T-24		Calle	181.08	Asfalto	0.013	0.15	12.6
	T-23		Calle	201.76	Asfalto	0.013	0.15	12.6

2.4.2 Modelo conceptual

Para la determinación de las subcuencas para la modelación se tomó como base el área de influencia que tendría un bocatormentas de acuerdo con la topografía del lugar (CONAGUA, 2015), sin embargo, existen áreas en las que no se observa que exista un drenaje pluvial por lo que para realizar una evaluación de diferentes zonas (como una zona rural con una zona fuertemente urbanizada o con una zona agrícola) se tomó como referencia las calles que conducirían la esorrentía urbana.

Para una mejor representación se dividió la zona de interés en diferentes secciones, principalmente en zona norte (la zona Metropolitana de San Luis Potosí) y la zona sur (Villa de Pozos, Zona Industrial y Laguna de Santa Rita), y cada una cuenta con diferentes secciones.

La primera sección corresponde a los colectores Antonio Nieto, calle Praderas, calle Ricardo Basilio y calle Santa Marta (Figura 2-13).

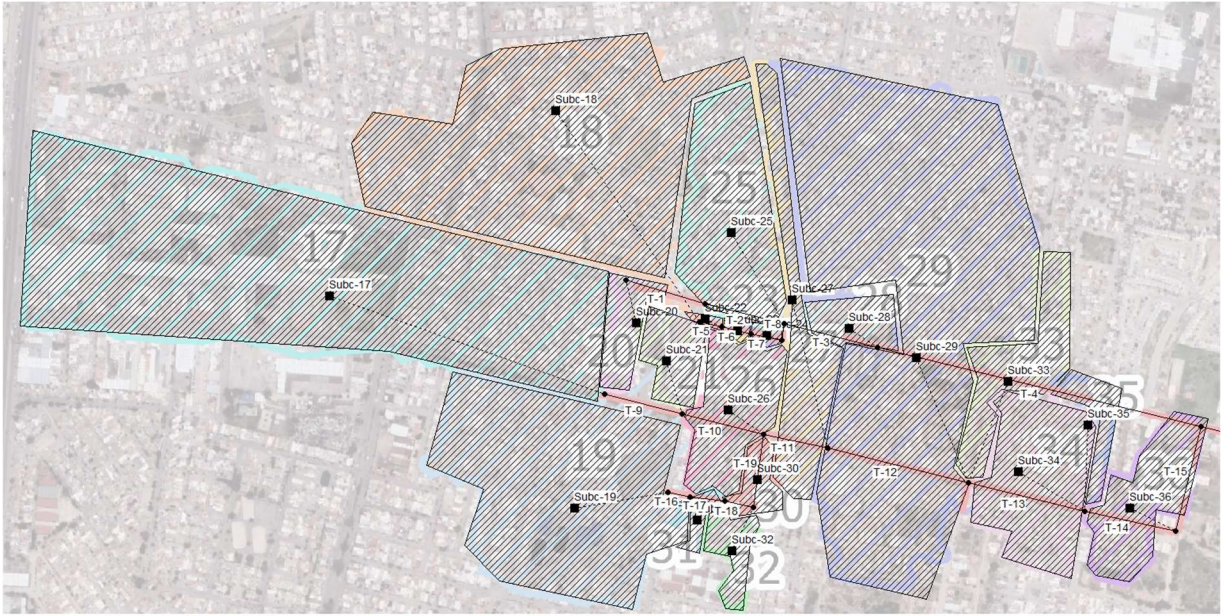


Figura 2-13 - Áreas de influencia/Subcuencas para la zona norte sección 1

La segunda sección de la zona norte corresponde a la calle #71, dentro de la ZMSLP (Figura 2-14).

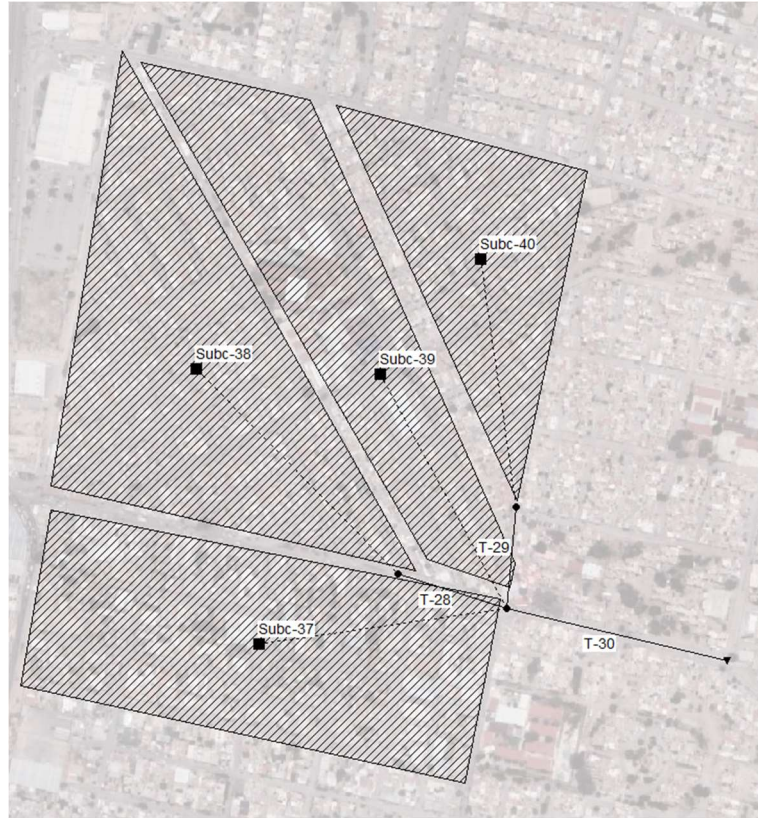


Figura 2-14- Áreas de influencia/Subcuencas para la zona norte sección 2

La tercera sección de la zona norte corresponde al colector calle #24 dentro de la ZMSLP (Figura 2-15).

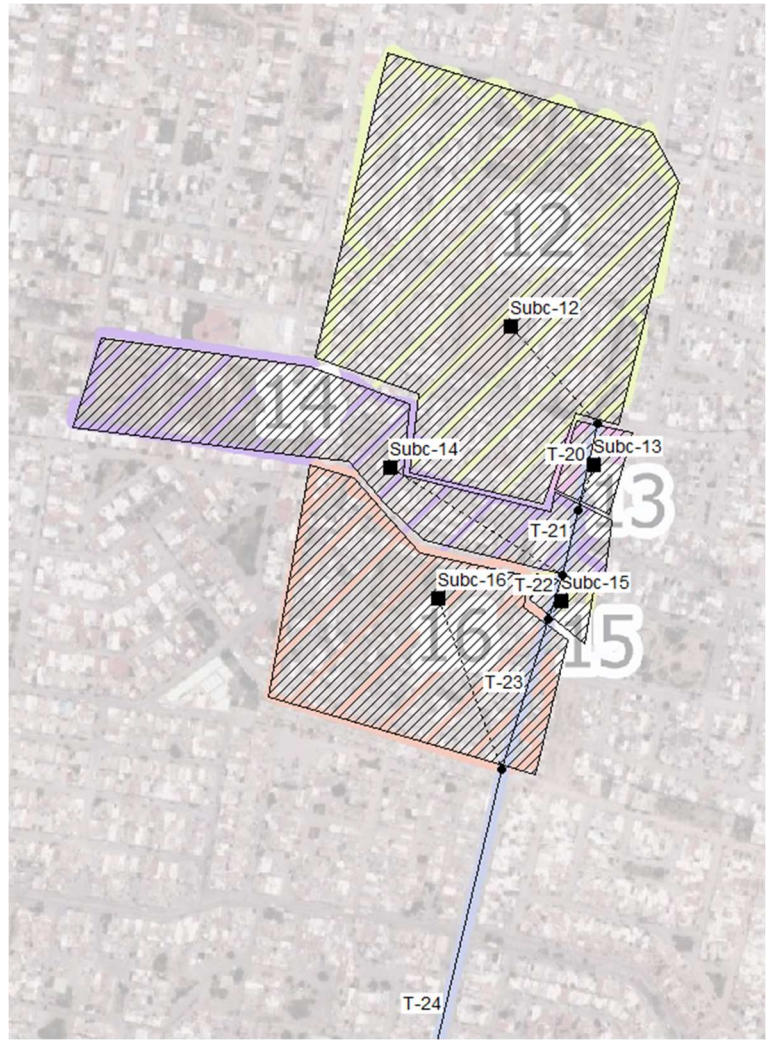


Figura 2-15- Áreas de influencia/Subcuencas para la zona norte sección 3

La última sección corresponde a la zona de influencia de un canal agrícola ubicado a las afueras de la ZMSLP (Figura 2-16).

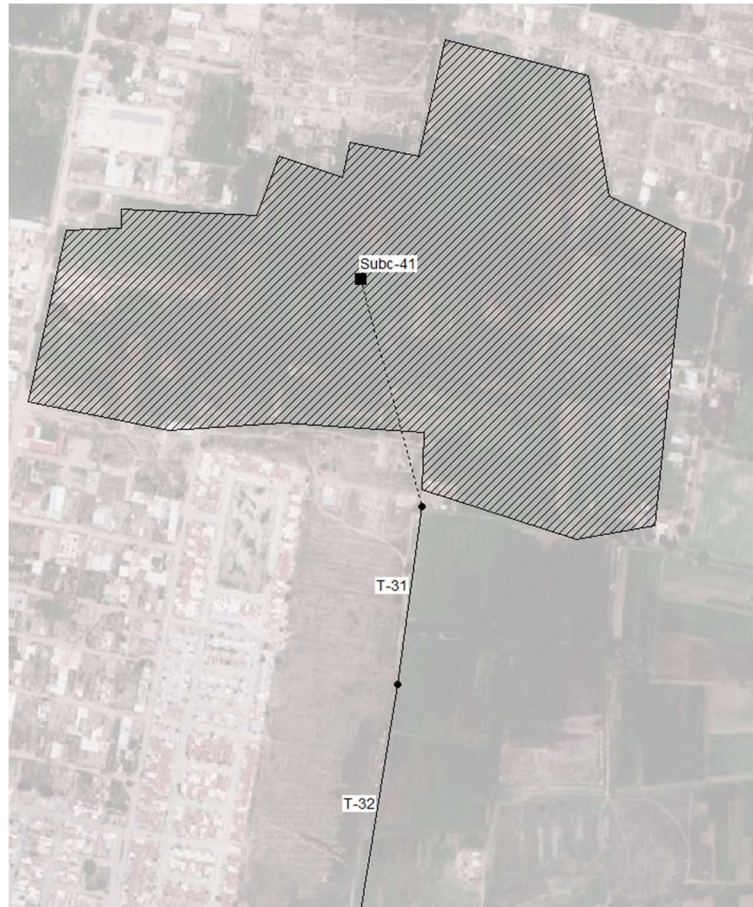


Figura 2-16 - Áreas de influencia/Subcuencas para la zona norte sección 4

En la zona sur, la primera sección corresponde a la mancha urbana de Villa de Pozos, donde se cuenta con el colector Revolución y el colector MEXINOX que descargan a su vez a un canal natural que descarga en el tanque Tenorio (Figura 2-17).

A su vez, la segunda sección corresponde a tres subcuencas que descargan sobre la calle Golondrinas, donde se encuentran varias edificaciones industriales (Figura 2-17).

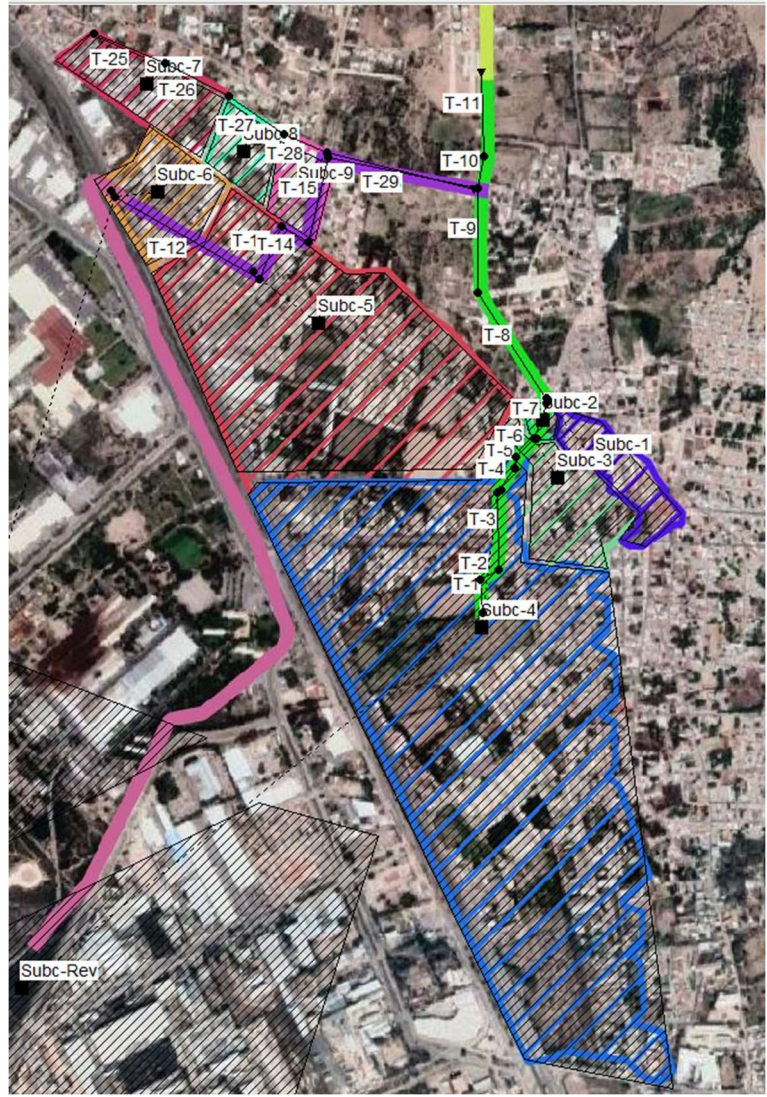


Figura 2-17- Áreas de influencia/Subcuencas para la zona sur sección 1 y 2 (subcuencas 7, 8 y 9)

La última sección de la zona sur corresponde al polígono de la comunidad de Laguna de Santa Rita y para simular la descarga de las áreas de influencia se utilizó la Calle 24 de febrero (Figura 2-18).



Figura 2-18 - Áreas de influencia/Subcuencas para la zona sur sección 3 (Laguna de Santa Rita)

2.4.3 Resultados

2.4.3.1 Escorrentía urbana

Producto del modelo se obtuvieron los escurrimientos para cada subcuenca, como es de esperarse aquellas subcuencas de mayor tamaño son las que presentaron los mayores escurrimientos, siendo estas las cuencas de referencia para la implementación de SUDS una vez que se realice un análisis para elegir los mejores sitios para su implementación.

En el caso de la zona norte del área de estudio, aquella que está dentro de la ZMSLP, las cuencas con mayores escurrimientos fueron la 12, 17 a 19, 29, y 37 a 41 (Figura 2-19), por su impacto, estas serán las seleccionadas para implementar los sistemas de drenaje sostenible.

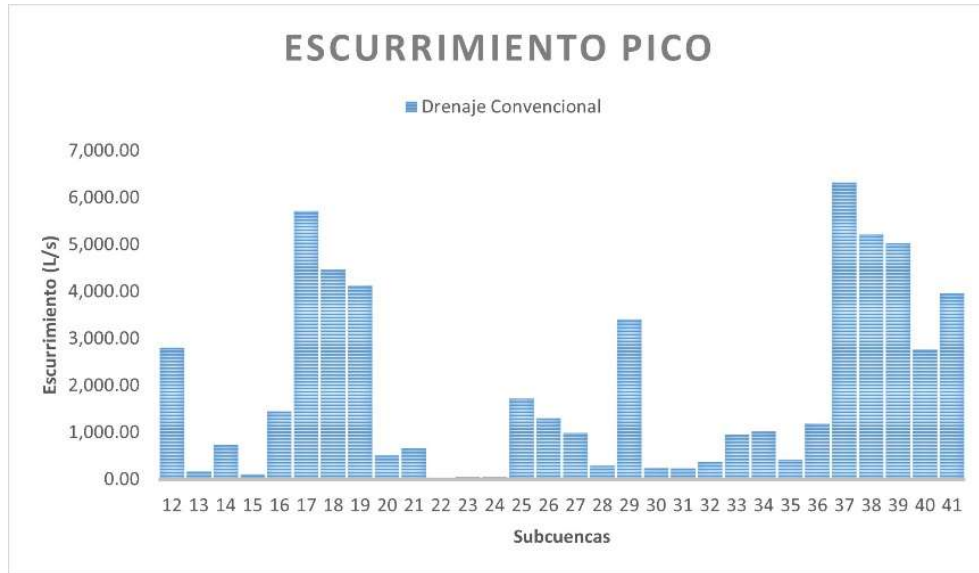


Figura 2-19 - Escurrencimiento pico en zona norte

En el caso de la zona sur, compuesta por la comunidad de Villa de Pozos y Laguna de Santa Rita, las subcuencas con el mayor impacto en la escorrentía son la 4 y 5 (Figura 2-20), sin embargo, para llevar el beneficio también a la comunidad de Laguna de Santa Rita y a la zona industrial dentro de la Delegación se seleccionaron las subcuencas 7 a 1.



Figura 2-20 - Escurrencimiento pico en zona sur

2.4.3.2 Flujo en colectores

En el caso de la modelación hidráulica en los colectores pluviales en la mayoría de los casos se obtuvieron flujos elevados, en algunos casos de hasta 7,400 L/s. Esta cantidad de agua provoca que en la mayoría de los tramos trabajen al 100% de su capacidad, esto se refleja en problemas de encharcamientos e inundaciones en sus zonas de influencia por una mala evacuación del agua de lluvia. En cada una de las secciones se analizó el flujo máximo medido en litros por segundo detectado en los tramos.

En la primera sección (Figura 2-21) se puede observar que en los tramos 1 a 4 se tienen caudales bajos esto es debido a que reciben escurrimientos de una subcuenca pequeña, mientras que el resto de los tramos recibe escurrimientos de las subcuencas más grandes y además están interconectados entre sí, descargando a través de los tramos 26 y 27.

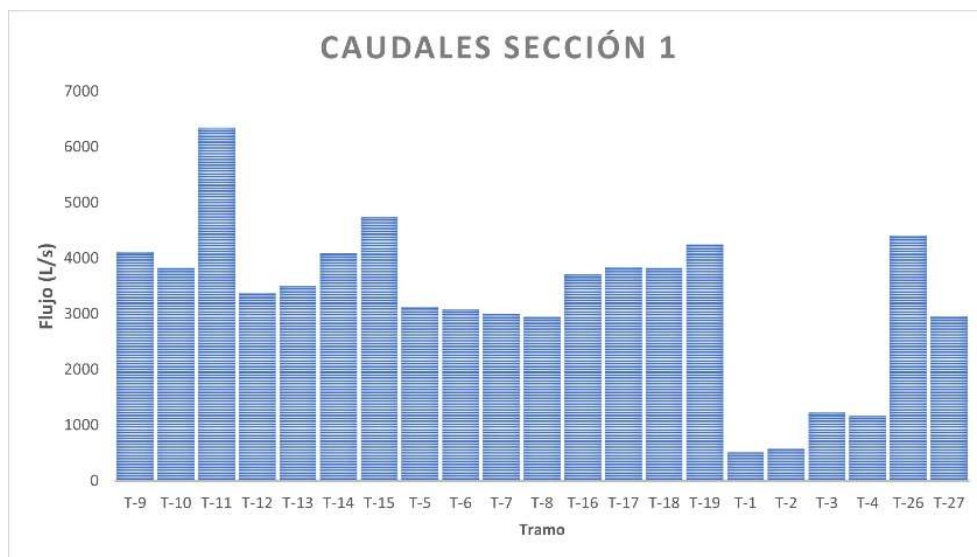


Figura 2-21 - Caudales simulados en zona norte sección 1

Los tramos 29 a 30 (Figura 2-22) corresponden a calles en la sección 2, compuesta por 4 subcuencas de un área fuertemente urbanizada, compuesta por edificios multifamiliares y casas habitación, además de algunos edificios de servicios educativos y comerciales. Por la poca disponibilidad de espacio solo fue posible considerar elementos pequeños para intentar reducir la escorrentía.

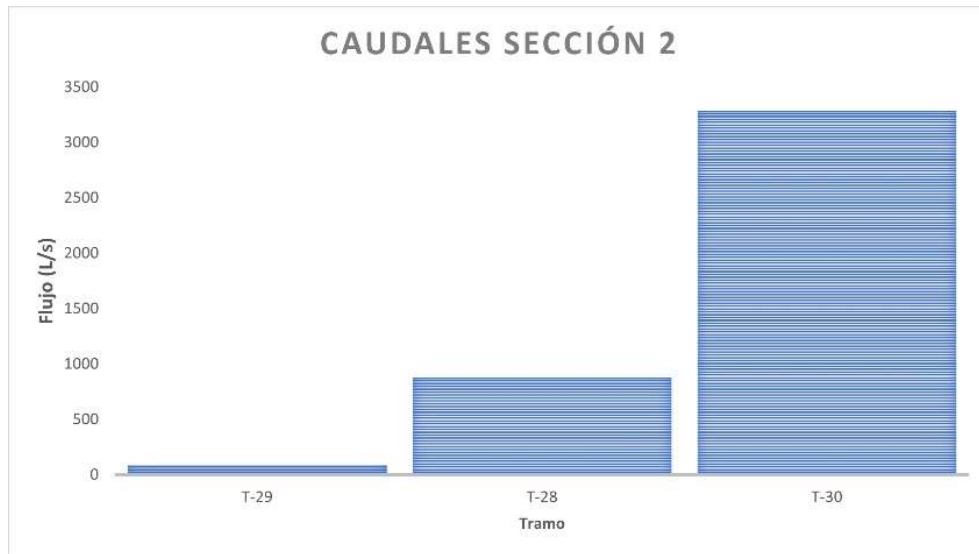


Figura 2-22- Caudales simulados en zona norte sección 2

Los tramos 20 a 25 corresponden al colector en la Calle 24, al ser una sola línea sin ramificaciones se percibe un incremento en el caudal conforme se avanza en los tramos, es por lo que en los últimos tramos se tienen los gastos más elevados (Figura 2-23).

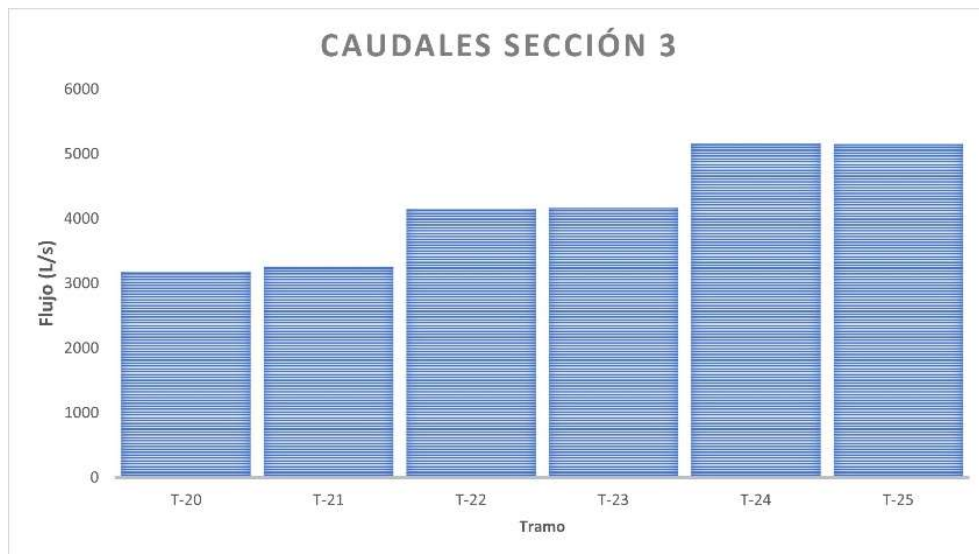


Figura 2-23- Caudales simulados en zona norte sección 3

Finalmente, la sección 4 corresponde a un área agrícola, donde gran parte del agua se retiene en el mismo lugar, y el flujo de salida es reducido comparado con el resto de las áreas analizadas (Figura 2-24), este caudal es conducido a través de un canal de riego existente en el área.

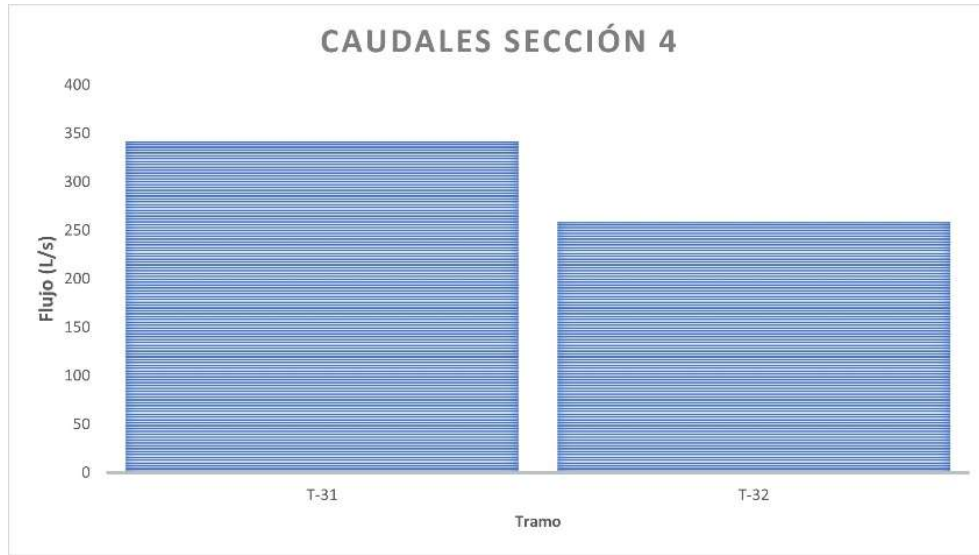


Figura 2-24- Caudales simulados en zona norte sección 4

La zona sur del área de estudio tiene características más similares a una zona rural, con una predominancia de casas habitación y grandes espacios en desuso cubiertos por arbolado, la primera sección tiene caudales elevados debido a la gran cantidad de agua aportada por las cuencas 4 y 5, donde se mantiene un caudal de aproximadamente 4,000 L/s en promedio (Figura 2-25).

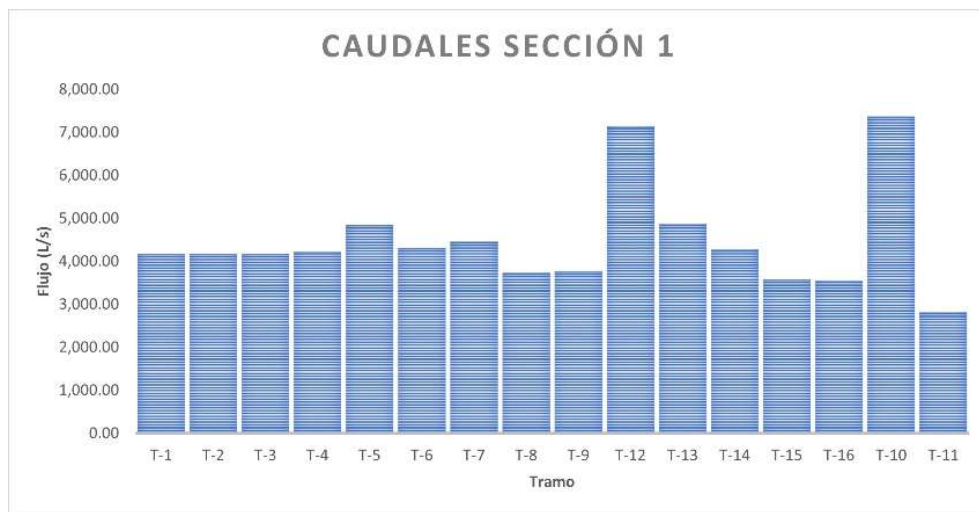


Figura 2-25- Caudales simulados en zona sur sección 1

En la sección 2 de la zona sur se presenta un pico en el tramo 28 (Figura 2-26), que corresponde al punto donde se conecta una subcuenca adicional y se interconecta con tramos anteriores.

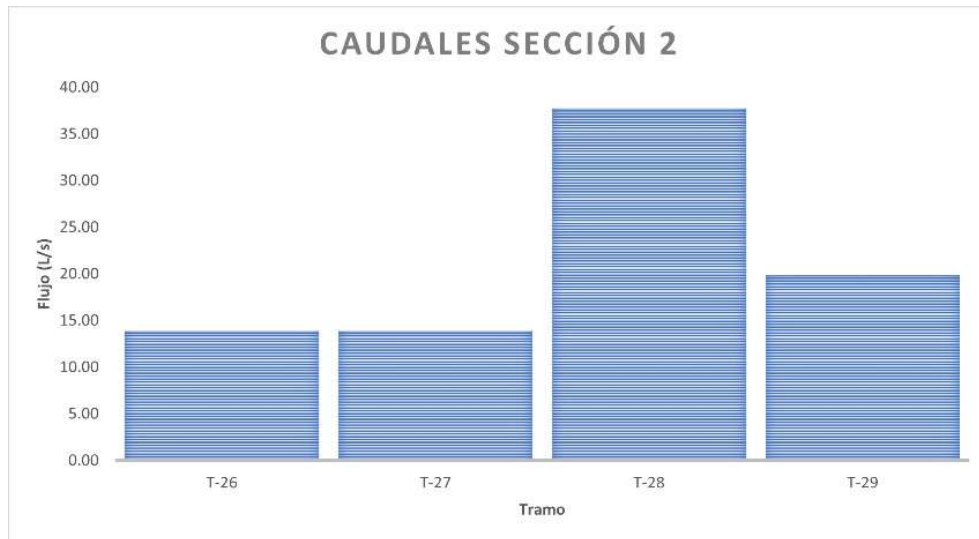


Figura 2-26- Caudales simulados en zona sur sección 2

En la última sección de la zona sur, que corresponde a la comunidad de Laguna de Santa Rita se observa un pico en el tramo 23 (Figura 2-27), esto es debido a que es la conexión de los dos tramos anteriores.

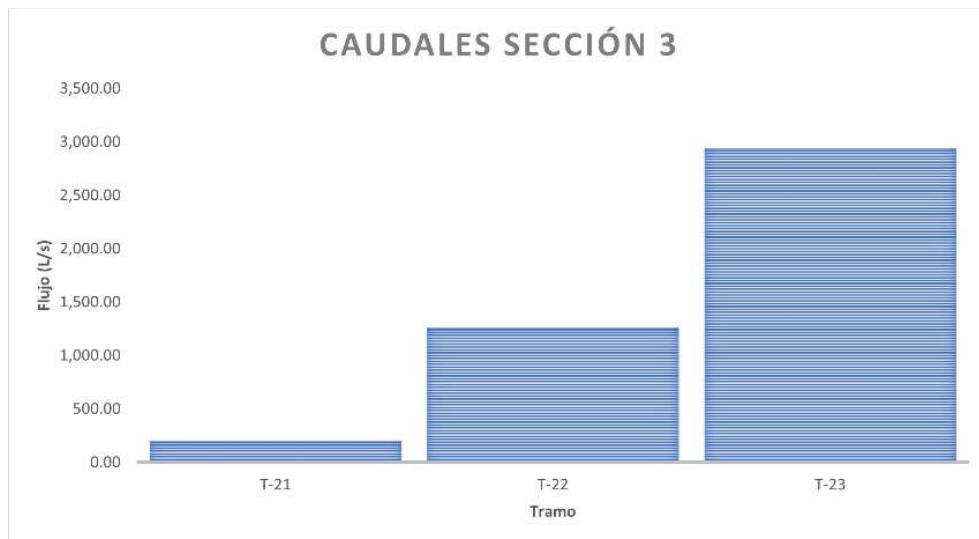


Figura 2-27 - Caudales simulados en zona sur sección 3

3 PROPUESTA DE SISTEMAS DE URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE Y EVALUACIÓN DE SU EFECTO EN EL DRENAJE PLUVIAL EN LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE

3.1.1 Objetivos para un Desarrollo Sostenible de la ONU

Con el crecimiento exponencial de la población en zonas urbanas la necesidad de espacio, productos y servicios la sociedad ha demandado nuevas estrategias para suplir sus necesidades, especialmente en el entendido de que se aproxima una crisis climática que algunos dicen que ya está aquí (Milman et al., 2021).

Debido a la crisis hídrica y ambiental un mejor manejo del recurso hídrico y la búsqueda de un desarrollo sustentable se han vuelto temas prioritarios en los círculos académicos y en el impulso de políticas públicas que propicien una mejor relación con el ambiente que permita ya no el desarrollo social basado en la explotación de recursos y consumo de bienes y servicios, sino algo que permita que la sociedad continúe funcionando de forma estable en el mediano y largo plazo en armonía con la naturaleza.

Es por ello por lo que en el 2015 se reunieron representantes de distintas naciones afiliadas a la Organización de las Naciones Unidas para firmar la agenda 2030 para un Desarrollo Sostenible, que busca principalmente combatir a la pobreza, proteger el ambiente y mejorar en general la vida de las personas y sus perspectivas en un plazo de 15 años (ONU, 2015).

En esta agenda se propusieron *17 Objetivos* y *169 Metas* para erradicar la pobreza a nivel mundial, de estos, los objetivos **6** (garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos), **9** (construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación), **11** (lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles) y **15** (proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad), tienen que ver directamente con nuestro desarrollo en centros urbanos.

Al mismo tiempo a nivel mundial se ha buscado lograr un desarrollo urbano más en armonía con la naturaleza y cambiar los paradigmas con los que usualmente se tratan los problemas

urbanos como la violencia, inundaciones, contaminación del agua, aire y suelo, es por ello por lo que surgió el concepto de *Soluciones Basadas en la Naturaleza*.

3.1.2 Soluciones Basadas en la Naturaleza

Durante los primeros meses de la pandemia por la COVID-19 por todo el mundo se declararon *encierros*, que obligaron a buena parte de la población a mantenerse en casa y reducir sus actividades en el exterior, además de esto en muchas ciudades espacios públicos fueron cerrados para evitar potenciales contagios (AD Colima, 2021) lo que produjo el descontento de la población al ver cerrados centros de convivencia que muchas veces eran parques públicos, reservas o centros ecoturísticos, lo que no solo afectó la convivencia sino también a negocios cercanos (Rosales, 2021).

Cuando las restricciones se levantaron la población volvió a estos centros de convivencia, con un especial énfasis en las áreas verdes urbanas (Honey et al., 2020), sin embargo, estas áreas verdes no siempre están cerca de la gente. Principalmente en las ciudades grandes donde se le ha dado una prioridad a la comercialización de vivienda, edificios comerciales y vías de comunicación enfocadas en automotores se ha relegado al espacio verde a algunos parches verdes en el mar gris, o a grandes extensiones que están alejadas de donde se concentra la población con menores ingresos, reflejando también la desigualdad en las ciudades (Grinspan et al., 2020).

La visibilidad de estos problemas ha dado pie a que las áreas verdes dejen de ser vistas como un extra o un requisito a cumplir en los desarrollos urbanos y ahora sean reconocidas como infraestructura clave para un desarrollo sostenible.

Por muchos siglos la humanidad ha luchado por formar la naturaleza a su voluntad y adaptarla a sus necesidades, esto trajo diversas consecuencias ya conocidas, deforestación, extinción de especies, desertificación y cambio climático, recién se ha tomado consciencia de este problema y en la academia comenzó a surgir el consenso de que para mantener la existencia de la sociedad será necesario iniciar una relación de adaptación con la naturaleza para satisfacer las necesidades de la población.

Para reconocer el beneficio de la naturaleza urbana se ha definido el concepto de *servicios ecosistémicos*, cuatro tipos de servicios que aporta la naturaleza y que se deben tener en cuenta para conocer su importancia (Crocì & Lucchitta, 2022).

En primer lugar, están los *servicios de abastecimiento*, esto corresponde al suministro de alimentos, agua, materiales de construcción y combustibles. Luego están los *servicios de regulación*, que mejoran la calidad del aire, la fertilidad de los suelos, el control de inundaciones, enfermedades y polinización de cultivos. Los *servicios culturales*, como espacios de recreación, turismo, fuentes de inspiración, educación y creatividad. Y finalmente los *servicios de apoyo*, que son necesarios para la producción de los demás servicios ecosistémicos, como hábitats con una rica diversidad de especies vegetales y animales.

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza consisten en estrategias que aprovechan procesos existentes en la naturaleza (como el secuestro de carbono, adsorción de contaminantes y regulación de escorrentía) como inspiración o apoyo para resolver problemas sociales relacionados con la salud, economía, movilidad y cuidado del ambiente. Estas pueden ser más funcional y presupuestalmente eficientes que las soluciones tradicionales (Comisión Europea, 2015).

La Comisión Europea identifica 4 objetivos principales para las SBN:

- Realzar la urbanización sustentable
- Restauración de ecosistemas degradados
- Desarrollo de adaptación y mitigación al cambio climático
- Mejorar la resiliencia y gestión de riesgos

Además, se recomiendan 7 soluciones basadas en la naturaleza basadas en los 4 objetivos propuestos:

- Regeneración urbana a través de SBN
- SBN para mejorar el bienestar en áreas urbanas
- Uso de SBN para resiliencia costera
- Gestión multifuncional de cuencas basada y restauración de ecosistemas
- SBN para aumentar la sostenibilidad del uso de materias y energía
- SBN para mejorar el valor asegurado de ecosistemas
- Aumento del secuestro de carbono a través de SBN

La transformación urbana en pro de un desarrollo sustentable es algo que a muchos ojos puede parecer imposible, ya que se considera que grandes extensiones de pavimento y edificios están más que establecidos y se perciben como inamovibles, una idea errónea que

se ha desmentido desde hace más de 50 años, con ejemplos por todo el mundo que demuestran que es posible remover áreas impermeables sin tener un impacto negativo en la dinámica urbana. Ciudades como París, Portland, Dusseldorf, Barcelona y Río de Janeiro son referentes para la transformación urbana en aras de devolverle el espacio a la ciudadanía y a la naturaleza.

3.1.3 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Entre los muchos problemas que enfrentan las ciudades se encuentran las inundaciones. Debido a su crecimiento y al aumento de áreas impermeables cada año incrementa la cantidad de escurrimiento urbano y la intensidad con que ocurren las inundaciones, se estima que en México las pérdidas por inundaciones ascienden a 230 millones de dólares cada año y que 22 millones de personas están expuestas a desastres por inundación (Forbes, 2017).

Por su ubicación, México cuenta con varios factores que propician que existan fenómenos hidrometeorológicos extremos. Tenemos costas en el océano Pacífico y Atlántico, tenemos formaciones orográficas que retienen la humedad proveniente del mar y la mayor parte de las precipitaciones, del otro lado de estas formaciones el viento seco llega a las zonas áridas al centro y norte del país.

Además de la presencia de fenómenos perturbadores, muchas ciudades tienen distintos grados de vulnerabilidad relacionada con su propia ubicación y con las características del territorio, infraestructura y la población, impreparada para hacer frente a estos fenómenos.

Las ciudades mexicanas tienen dos formas de manejar la escorrentía urbana, una es a través de sistemas de drenaje pluvial dedicados (Figura 3-1) y la otra es a través de sistemas combinados que transportan tanto agua pluvial como aguas negras.

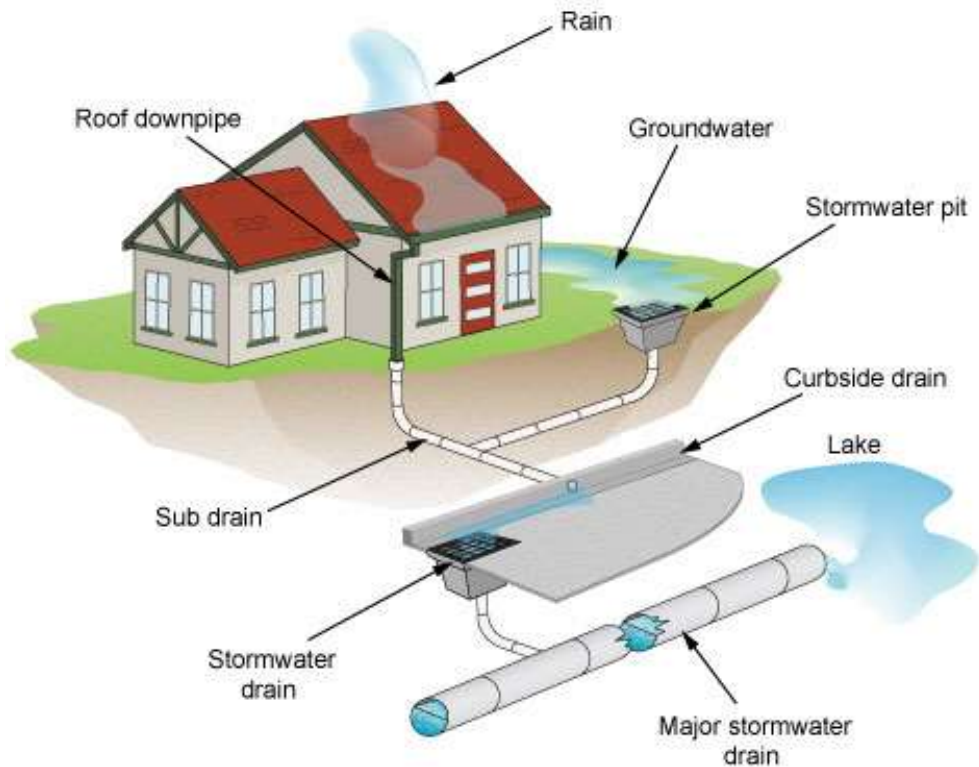


Figura 3-1 - Esquema de funcionamiento de un drenaje pluvial convencional (Licensed to Plumb, 2009)

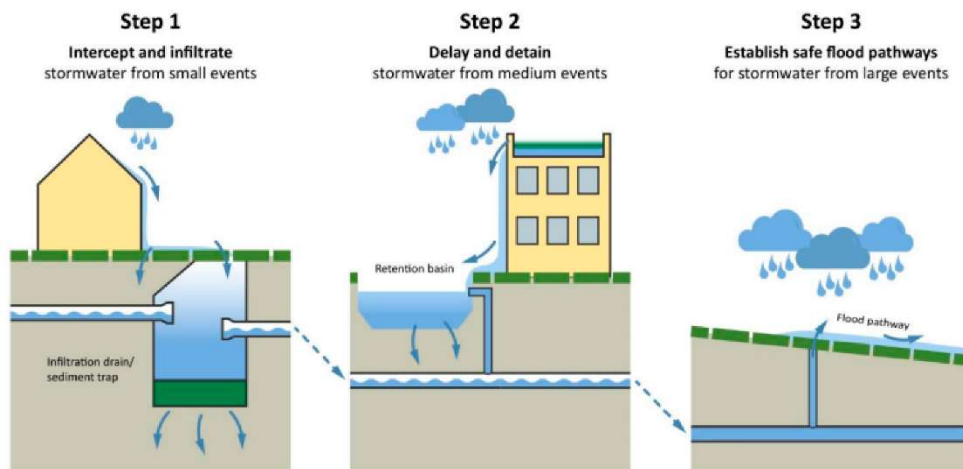


Figura 3-2 - Esquema de drenajes sostenibles (Andenæs et al., 2021)

Estos sistemas de drenaje convencional se encargan de captar la escorrentía en las calles y edificios y transportarla rápidamente hasta un punto de descarga que puede ser un río, un lago, una represa o el mar abierto (Qianqian, 2014). Sin embargo, este sistema tiene muchas desventajas, sobre todo por la forma en que se gestionan los mismos.

Considerando su funcionamiento al 100% de su capacidad, es decir, como nuevos, estos captan rápidamente el escurrimiento sobre las calles y lo transportan a su descarga, sin embargo, también arrastran los contaminantes que lleva el agua (heces, aceites, combustibles, metales pesados, sedimentos y basura) afectando los sitios de descarga, además, por la velocidad que lleva el agua conducida se genera erosión del suelo en los puntos de descarga y un mayor transporte de sedimentos. Aunado a esto el agua descargada en los ríos incrementa el nivel de estos, perjudicando colonias o comunidades aguas abajo.

Si consideramos su funcionamiento en condiciones reales el panorama cambia considerablemente. Como muchos otros sistemas y servicios, el mantenimiento de los sistemas de drenaje pluvial es realizado por instituciones públicas quienes por falta de presupuesto y planeación los dejan en el abandono quedando muchas veces inutilizados debido a taponamientos, aunado a esto parte de la población vierte aguas residuales y otros materiales al drenaje (Agencia de Noticias, 2022) deteriorando su estado.

Entre las acciones que se deben tomar en las ciudades para lograr un desarrollo sustentable es revalorar al agua pluvial, si esta fuera aprovechada podría aportar a mejorar la biodiversidad urbana, la interacción social con la naturaleza, añadir una estética naturalista a los edificios, centros de convivencia y paisajes y puede hacernos más resilientes al cambio climático (Woods Ballard et al., 2015).

Debido al cambio climático, el crecimiento poblacional, la urbanización desmedida y el consecuente abatimiento de pozos, la escasez de agua será uno de los principales problemas en los principales centros urbanos (algo que ya sucede en países y localidades menos desarrolladas), por lo que en los próximos años el agua se volverá un recurso estratégico, tanto como lo es hoy el petróleo y las tierras raras, principalmente en las regiones áridas y semi áridas (Eslamian, 2016).

Siguiendo la filosofía de las Soluciones Basadas en la Naturaleza se han generado propuestas para tener una gestión del agua pluvial sustentable entre ellas se encuentran los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, los cuales aprovechan los procesos de retención, infiltración, evapotranspiración, adsorción, ente otros, para controlar escurrimientos urbanos e intentar devolver al área a las condiciones hidrológicas para preservar los ecosistemas y restaurar el ciclo hidrológico (Qianqian, 2014).

Estos sistemas deben funcionar a distintos niveles (Rodríguez, 2017), como la prevención (disminuyendo el impacto humano en la escorrentía a través de la sensibilización y educación de la población y formación de estrategias de manejo de residuos y planes de desarrollo urbano), la gestión del agua en el origen del escurrimiento (controlando la escorrentía donde esta se genera), la gestión en el entorno urbano (a través de infraestructura en barrios o localidades) y la gestión a nivel de cuenca (con sistemas que requieren una gran superficie como los humedales artificiales).

Como objetivo entonces, un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible debe reducir la escorrentía y retrasar el gasto pico (Figura 3-3), disminuir la contaminación difusa a través de vegetación seleccionada y minimizar las descargas de agua (Rodríguez, 2017).

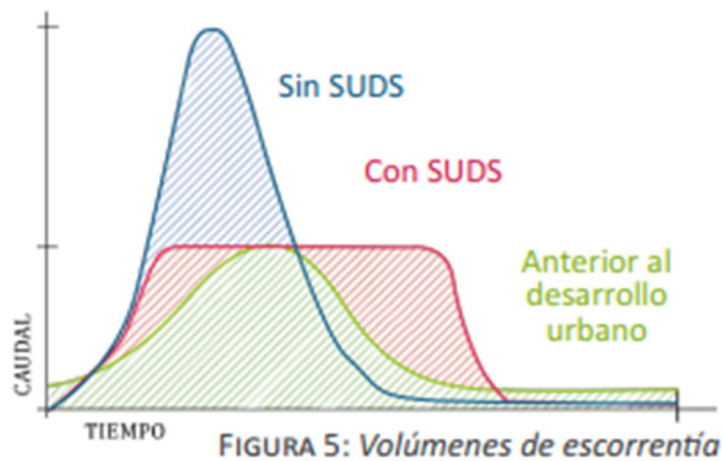


Figura 3-3 - Comparación de un hidrograma en un estadio previo a un desarrollo urbano, sin SUDS y con SUDS (Rodríguez, 2017)

En cuanto a su efectividad existe evidencia que comprueba que estos por ejemplo Winston (2016) encontró que un conjunto de celdas de retención puede tener un efecto en una tormenta de diseño de 1 año de entre el 24 y 96%, por otro lado, Rodríguez & Trapote (2019) observaron que sistemas como parques inundables o cuencas de retención pueden contener eventos con un periodo de retorno de 500 años, y particularmente en San Luis Potosí, (Pérez, 2021) generó mediante un análisis multi objetivo una propuesta a nivel ciudad concluyendo que la presencia de SUDS en cualquier cuenca reducirá el escurrimiento pico para eventos de cualquier periodo de retorno.

Existen distintos tipos de Sistemas y estos se clasifican en 4 categorías según cómo estos manejan la escorrentía (Qianqian, 2014; Rodríguez, 2017):

1. Control en el origen: captan la lluvia directamente donde entra en contacto con la superficie propiciando su infiltración y almacenamiento (SCALL, cuencas de detención, techos verdes, pavimentos permeables, etc.).
2. Transporte: movilizan el agua pluvial a otros sistemas o al cuerpo receptor (trincheras de infiltración, canales verdes, etc.).
3. Almacenamiento y tratamiento pasivo: se sitúan al final de todo el sistema, retienen y tratan los contaminantes arrastrados por el agua (estanques, depósitos de infiltración y humedales artificiales).

3.1.3.1 Cuencas de retención

Las cuencas de retención tienen el objetivo principal de retener la escorrentía producto de una precipitación en un embalse (Figura 3-4), el cual puede ser excavado o formado por bermas, y liberar el volumen de agua contenido de forma controlada a través de una estructura de salida que sigue el comportamiento de una gráfica de enrutamiento.



Figura 3-4 - Vista de nuevo parque inundable de Alicante (Ágora, 2022)

3.1.3.2 Techos verdes

Los techos verdes consisten en recubrir la superficie de azotea de un edificio con una combinación de capas de drenes, suelo y vegetación (Figura 3-5) con el objetivo de reducir la escorrentía urbana, mejorar el confort térmico y atraer especies locales. Estos se dividen en dos categorías:

Extensivos: con sustratos de bajo espesor y por tanto bajas cargas sobre la estructura, requieren poco mantenimiento y plantación sencilla.

Intensivos: tienen sustratos más profundos o consisten en macetas de gran tamaño, por lo que tienen un mayor impacto en la estructura, requieren mayor mantenimiento y especialidad en las plantaciones.



Figura 3-5 - Techo verde intensivo accesible (ContentLab, 2019)

3.1.3.3 Sistemas de captación de agua de lluvia

Los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) consisten en la captación de lluvia en las azoteas para ser aprovechada en usos domésticos, comerciales, agrícolas o industriales (Figura 3-6). Sus componentes incluyen el sistema de captación (una azotea habilitada y canaletas), conducción, almacenamiento y ocasionalmente tratamiento, dependiendo del uso que se le quiera dar al agua captada.



Figura 3-6 - Captación de agua de lluvia para una instalación educativa, imagen de Stormsaver

3.1.3.4 Pavimentos permeables

Los pavimentos permeables proveen de una superficie para tráfico peatonal o vehicular (Figura 3-7) que puede además permitir la filtración de agua de lluvia a capas inferiores, el agua se almacena temporalmente debajo del pavimento y puede ser conducida a un drenaje pluvial o infiltrada en el suelo natural subyacente.

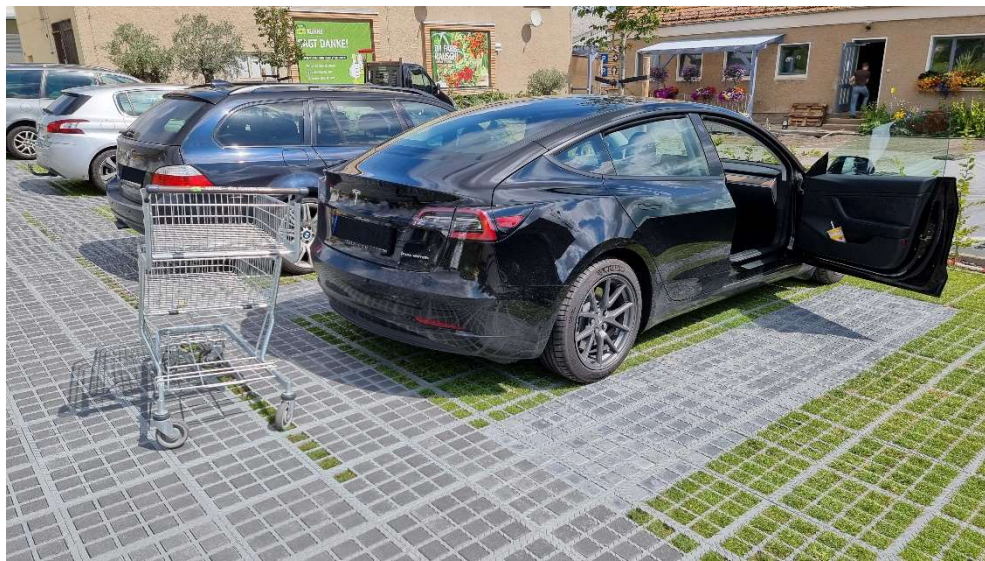


Figura 3-7 - Modelo de pavimento permeable (Hübner-Lee, 2022)

3.1.3.5 Jardines de lluvia

Son áreas superficiales embellecidas que reducen la escorrentía y tratan el agua a través de suelo mejorado y vegetación, son sistemas de intercepción que pueden ser implementados en parques, camellones o áreas de contención de la infraestructura urbana (Figura 3-8), tienen una limitada capacidad de contención en el suelo que puede ser incrementada al construirse bermas.



Figura 3-8 - Jardín de lluvia en área de contención junto a una banqueta, ilustración de Ecological Landscape Alliance

3.1.3.6 Canales vegetales

Son elementos superficiales que consisten en canales no recubiertos diseñados para conducir, tratar y en ocasiones atenuar la escorrentía urbana (Figura 3-9). Son colocados usualmente en carreteras, avenidas, parques o estacionamientos para captar el agua mediante un drenaje perimetral.

Al atenuar el flujo los canales retienen contaminantes a través de sedimentación, filtración a través del suelo y retención a través de las raíces de las plantas instaladas.



Figura 3-9 - Canal vegetal en Malasia (Ghani et al., 2008)

3.1.3.7 Humedales artificiales

Los humedales artificiales como los estanques consisten en un cuerpo de agua permanente (Figura 3-10) que proveen de atenuación de escurrimientos y tratamiento a los mismos con un flujo sobre (superficial) o a través de una masa de suelo (subsuperficial) en la que se coloca vegetación apta para la captación de contaminantes de diferentes tipos, sumado a la descomposición realizada por procesos anaeróbicos y la sedimentación de partículas suspendidas.



Figura 3-10 - Humedal artificial, (Iagua, 2016)

3.1.3.8 *Trincheras de infiltración*

Las trincheras de infiltración son excavaciones rectangulares que son llenadas con material pétreo bien graduado y con una pendiente en el fondo bastante baja (Figura 3-11). Es común que alrededor de estas trincheras se coloquen pastos u otra vegetación densa para la interceptación de agua. Estos sistemas promueven la sedimentación, filtración e infiltración (si la escorrentía cumple con los requisitos) para manejar el agua de lluvia.

Estos sistemas pueden contar además con sistemas de drenaje en forma de tuberías perforadas que puedan conducir el agua interceptada a otro sitio de interés.



Figura 3-11 - Trinchera de infiltración en un estacionamiento, (theagritect, 2012)

3.1.4 **Selección de asentamientos de SUDS**

Para maximizar los beneficios de la infraestructura verde es necesario realizar una buena ubicación de propuestas, para ello es importante contar con distintos criterios que permitan determinar los sitios más propicios para ello.

Algunas investigaciones han considerado distintos objetivos y escalas para evaluar criterios con los que seleccionar los mejores sitios de emplazamiento, considerando variables hidrológicas de hidráulicas (Tabla 3-1) que podrían reflejar el impacto que tendría la infraestructura propuesta, para este caso de estudio se usará la metodología de Jiménez et al. (2019) con un fuerte apoyo de Sistemas de Información Geográfica, información vectorial y censos de población y vivienda en escala de Área Geoestadística Básica extraídas de las bases de datos de INEGI.

Tabla 3-1 - Metodología multiescalar para la planeación de SUDS (Jiménez et al., 2019)

Escala	Paso	Actividades Principales	Información Requerida		Resultados	
Ciudad	Definir objetivos, marco de planeación y normativa local	Crear mesas de trabajo	Normativa local		Objetivos Limitantes del proyecto	
	Identificar subcuencas prioritarias y estratégicas	Definir unidades de manejo de drenaje urbano	Subcuencas urbanas		Análisis espacial unitario	
		Realizar análisis espacial	Calidad del agua;	Ríos, humedales, otros cuerpos de agua	Índice de calidad del agua	Subcuenca prioritaria
			Cantidad de agua;	Llanuras de inundación, capacidad del sistema pluvial, zonas de encharcamiento, puntos críticos	Índice de cantidad de agua	
			Información social y ambiental;	Calidad del aire, parques, árboles, edificios, población vulnerable, nivel socioeconómico	Índice social y ambiental	
			Corredores verdes		Índice de corredores verdes - azules	Subcuencas prioritarias
			Corredores verdes-azules			
			Desarrollo urbano y planes de desarrollo		Índice de planeación	
└			Restricciones físicas por tipo de SUDS			

Escala	Paso	Actividades Principales	Información Requerida	Resultados
	Identificar áreas para SUDS, viabilidad y potenciales restricciones	Analizar espacios públicos y/o privados de acuerdo con la información disponible	Rangos de pobreza Densidad de población Distribución de áreas verdes con A > 1,000 m2 Cobertura de drenaje pluvial Riesgo por inundación Propiedad del espacio Pendiente	Áreas potenciales para SUDS
Micro	Selección de tipos de SUDS y líneas de tratamiento para un área propuesta	Uso de matrices de selección	Pendiente Nivel estático del acuífero Dimensiones Área	SUDS recomendados

En este caso en particular se realizará una propuesta de infraestructura verde a escala local, por lo que para analizar los sitios potenciales se revisarán las restricciones físicas por tipo de SUDS, uso del área, nivel de agua subterránea, edificaciones y propiedad del espacio, se dejarán fuera los criterios de ritmo de infiltración (por falta de información referente al tema) y pendientes (debido a que las pendientes de la zona son muy bajas) y se agregarán cobertura de drenaje pluvial, cercanía a otras áreas verdes, niveles de pobreza y cantidad de población.

Partiendo desde los mapas de riesgo de inundación proporcionados por la autoridad de planeación urbana (IMPLAN, 2021) y de la evidencia de encharcamientos e inundaciones obtenida a través de Google® Earth® (Figura 3-12) se seleccionó las zonas de mayor relevancia para el emplazamiento de SUDS, teniendo un enfoque en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí, Villa de Pozos y la comunidad de Laguna de Santa Rita.

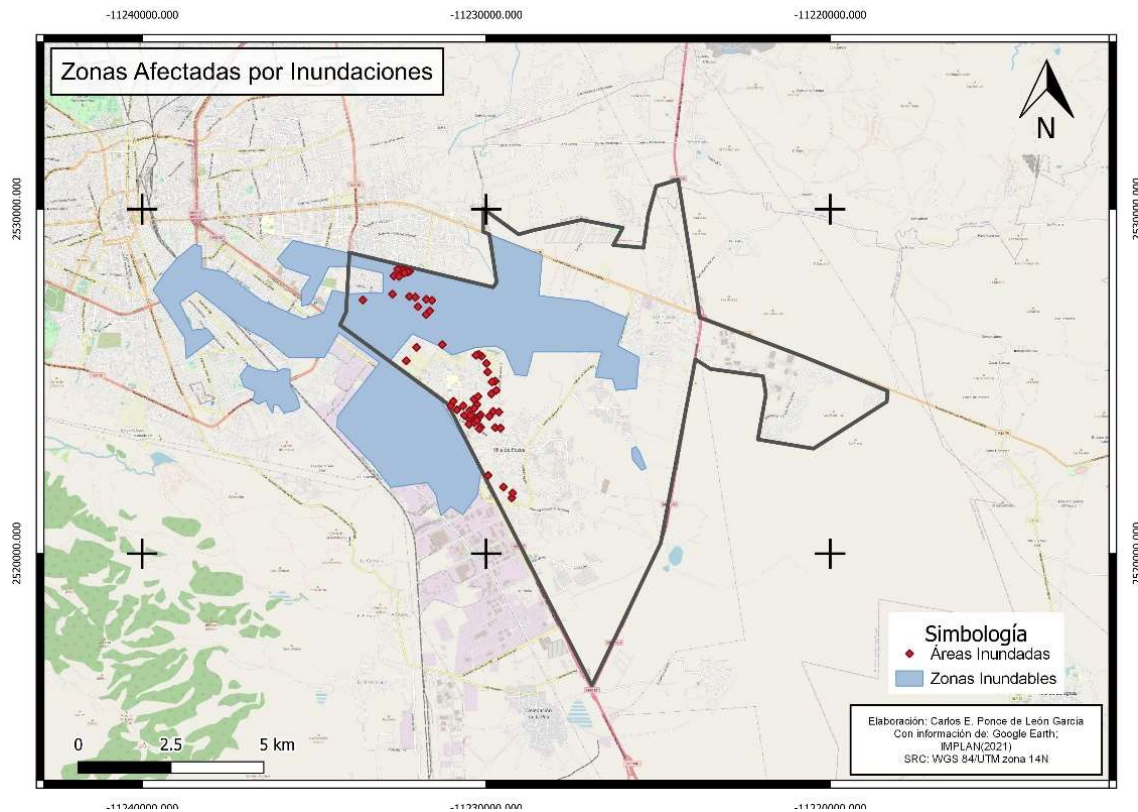


Figura 3-12 - Zonas en riesgo de inundación (IMPLAN, 2021) y afectadas por inundaciones

Dentro de estas tres zonas y con información vectorial de manzanas e infraestructura urbana se seleccionaron los polígonos correspondientes a parques y baldíos (por tener espacio suficiente para albergar cuencas artificiales); grandes estacionamientos (que puedan ser reconvertidos como pavimentos permeables); naves industriales, templos y escuelas (cuya azotea podría usarse para captar agua de lluvia); camellones (que podrían ser transformados en canales verdes), y otros espacios con potencial para adaptarse como infraestructura verde (Figura 3-13). En la Figura 3-13 se plasma además el Área de Construcción Controlada – Hídrica identificada por el IMPLAN en la que se busca implementar estrategias que promuevan la infiltración y recarga del acuífero, aunque ni en el Plan de Desarrollo Urbano ni en el reglamento de construcción se mencionan cuales ni qué requisitos especiales tendrán, más allá de realizar un estudio de impacto ambiental y un estudio hidrológico para cada propuesta de desarrollo inmobiliario.

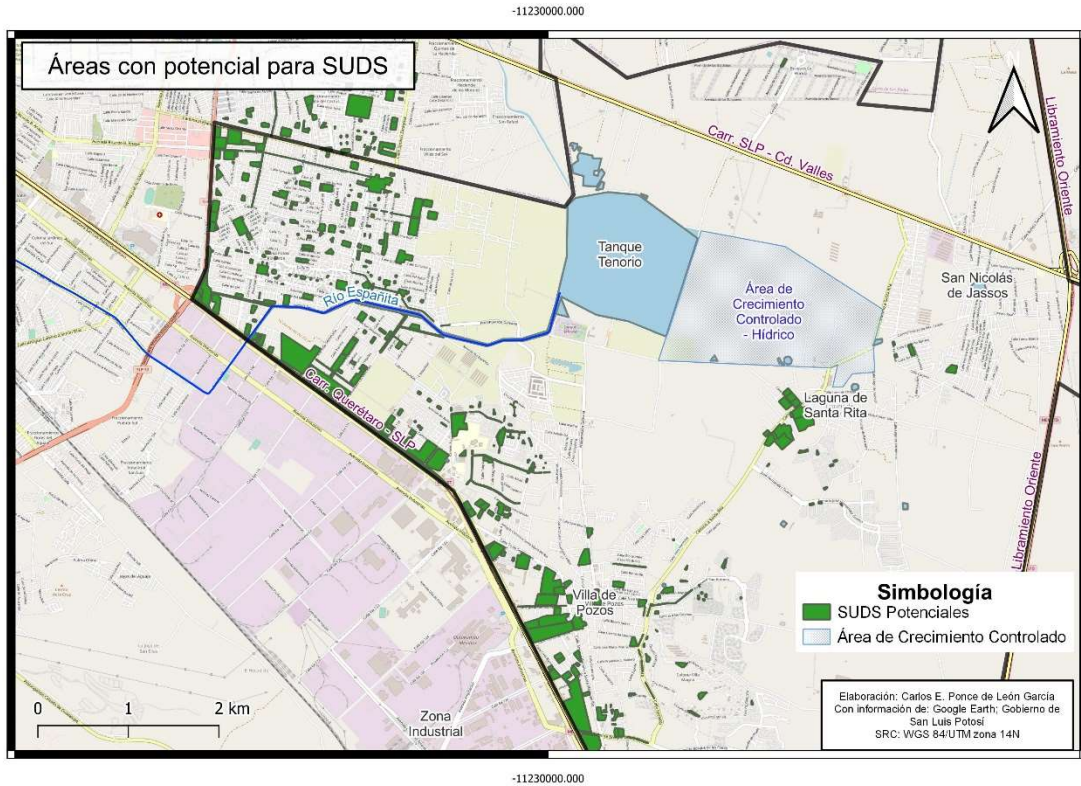


Figura 3-13 - Áreas potenciales observadas para SUDS

El siguiente paso fue crear un mapa de calor con la ubicación de todos los bocatormentas del sistema de drenaje pluvial existente (utilizando un radio de 300 metros), el cuál funcionaría como una representación de la cobertura del drenaje pluvial (Figura 3-14). Aquellos polígonos que estén más alejados de la influencia del drenaje pluvial tendrán una mayor valoración.

Para esto último se asignó un valor numérico para cada polígono de acuerdo con el mapa de calor generado, para normalizarlo se empleó el mayor valor obtenido como divisor, y el valor inverso de esto representaría la potencialidad que tendría para afectar el drenaje en el área. Este es un procedimiento que se realizó en todas las categorías.

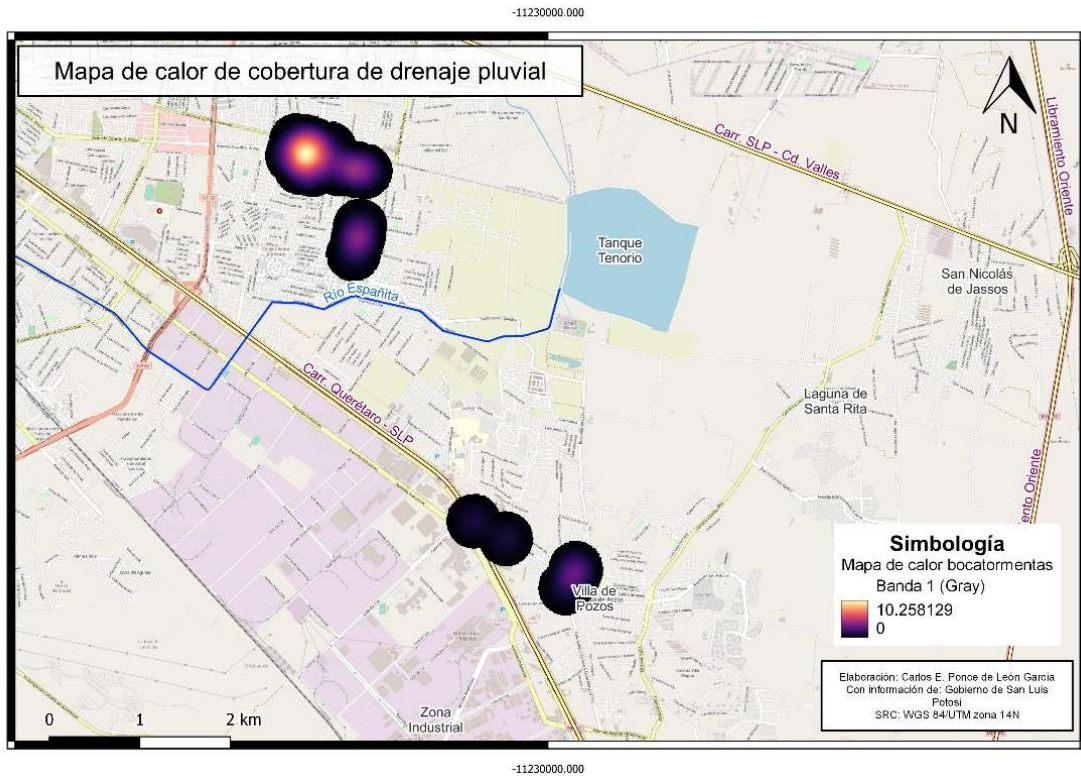


Figura 3-14 - Mapa de cobertura de drenaje pluvial convencional

Debido a que se busca que la propuesta de SUDS tenga un impacto no solo en la reducción de escurrimientos sino también en la calidad de vida de las personas se tomó en consideración la densidad de población (INEGI, 2020a) y niveles de pobreza de la delegación en escala de AGEB (CONEVAL, 2015) teniendo prioridad los polígonos en áreas con mayor densidad de población y mayores niveles de pobreza (Figura 3-15 y Figura 3-16).

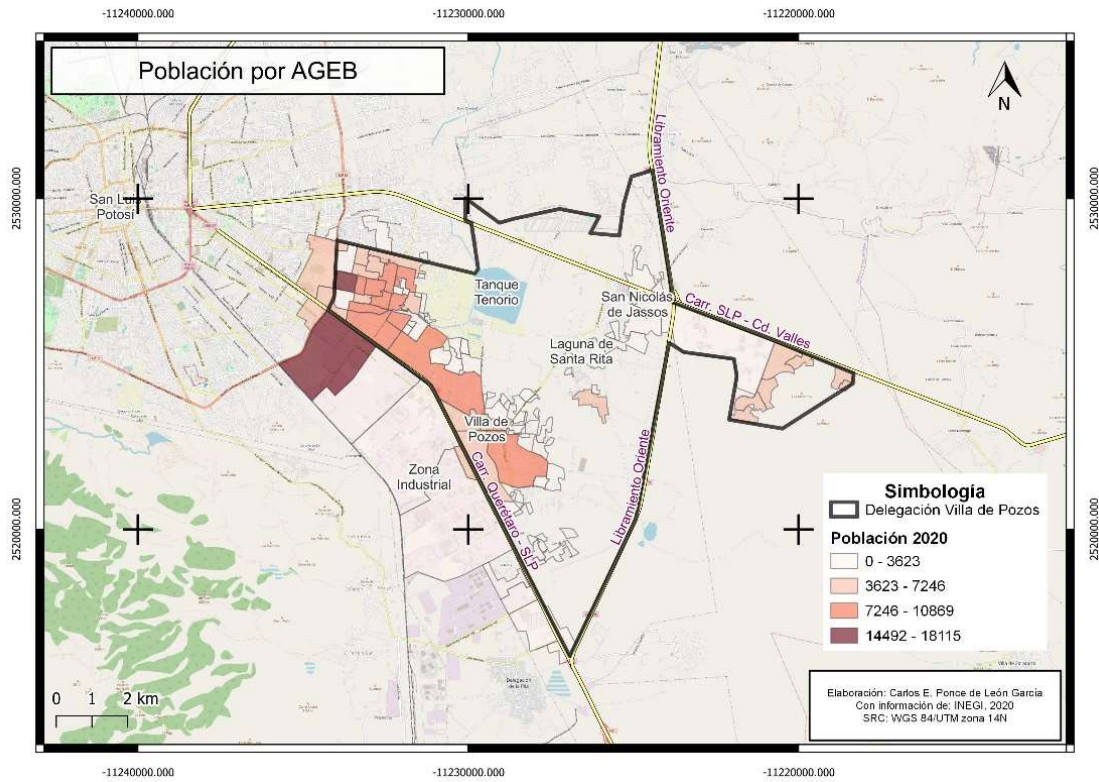


Figura 3-15 - Mapa de distribución de la población por AGEB (INEGI, 2020a)

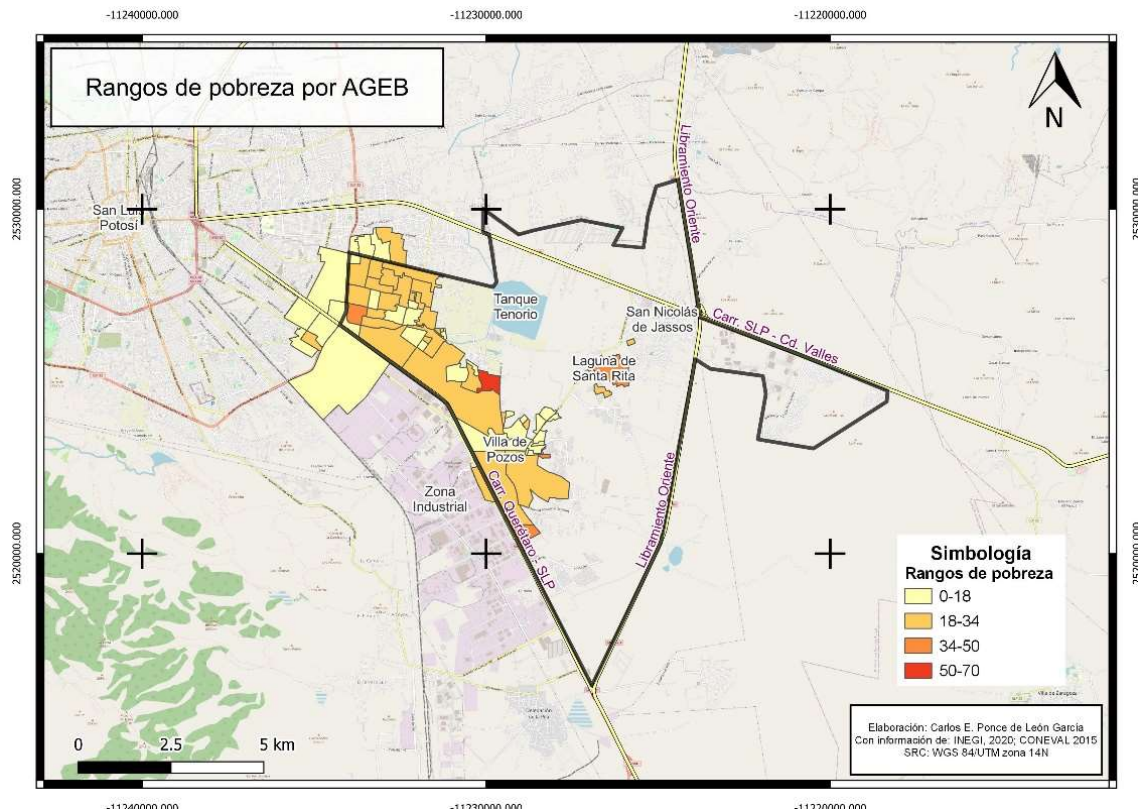


Figura 3-16 - Mapa de rangos de pobreza de acuerdo con CONEVAL, 2015

Las propuestas de infraestructura verde buscan mejorar los espacios en relación con el ambiente y la biodiversidad, aumentar las oportunidades de interacción con espacios naturales y mejorar la captación de agua en el suelo, por ello y siguiendo la metodología propuesta en (Jiménez et al., 2019) se definió que los sitios prioritarios serían aquellos que tengan los menores valores respecto de un mapa de calor creado a partir de las áreas verdes de más de 1,000 m² (Figura 3-17).

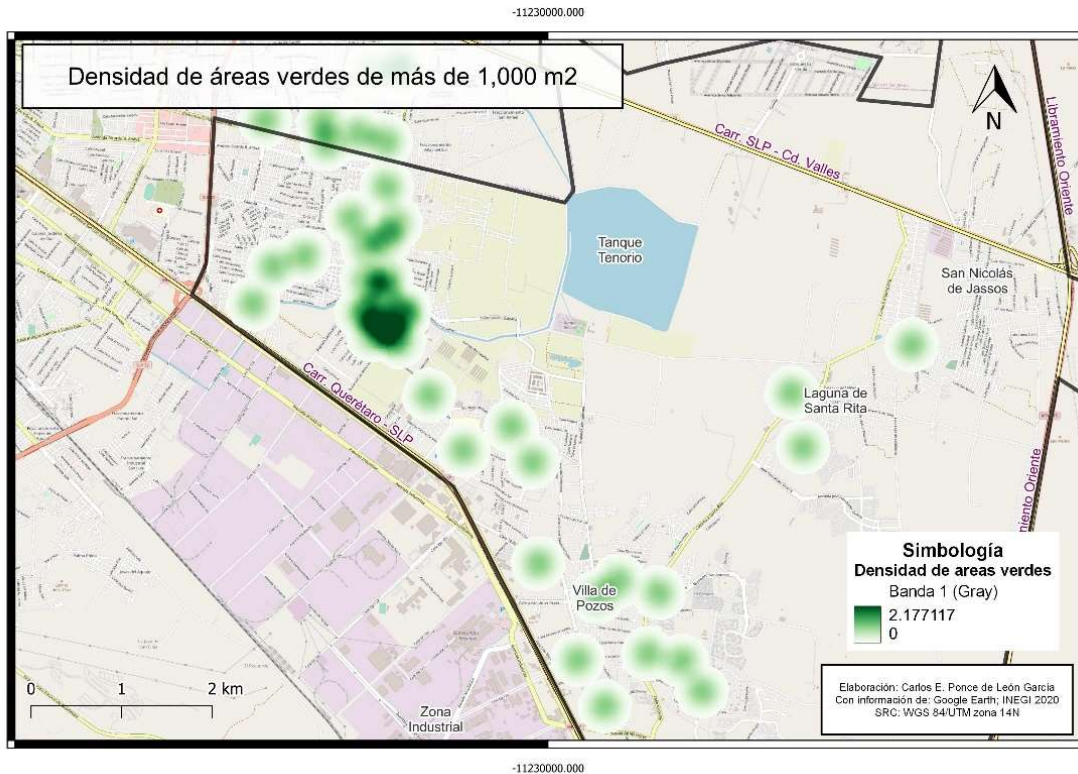


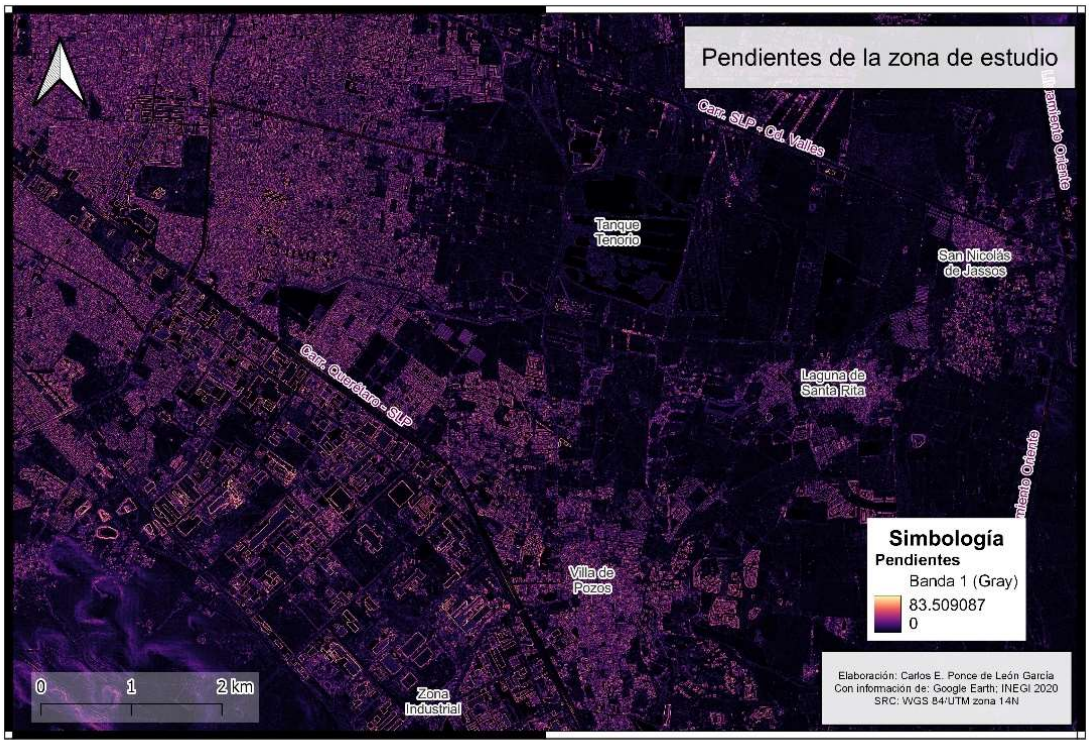
Figura 3-17 - Mapa de densidad de áreas verdes de más de 1,000 m²

Del mismo modo dependiendo del SUDS propuesto se tiene un requerimiento de pendiente máxima y distancia del nivel freático (Tabla 3-2), por lo que fue necesario generar una imagen ráster con las pendientes de la zona de estudio (Figura 3-18), con la cual se extrajo un valor para cada polígono propuesto, además, utilizando información de (CONAGUA, 2022a) obtenida a través del Geovisor de Monitoreo de Redes Piezométricas fue posible generar curvas de nivel estático del acuífero para conocer su profundidad (Figura 3-19).

Tabla 3-2 - Parámetros utilizados para clasificar áreas potenciales para SUDS, adaptado de (Jiménez et al., 2019)

Parámetro	Tipo de restricción	Canal vegetal	Trincheras de infiltración	Pavimentos permeables	Zonas de bioretención	Humedales	Cuenca de retención
Pendiente (%)	Máximo	10	5	5	10	15	15
	Mínimo	1	1	0.5	-	1	1
Distancia del nivel freático (m)	Mínimo	1.5	3	3	1.8	1.3	3

-11230000.000



-11230000.000

Figura 3-18 - Mapa de pendientes de la zona

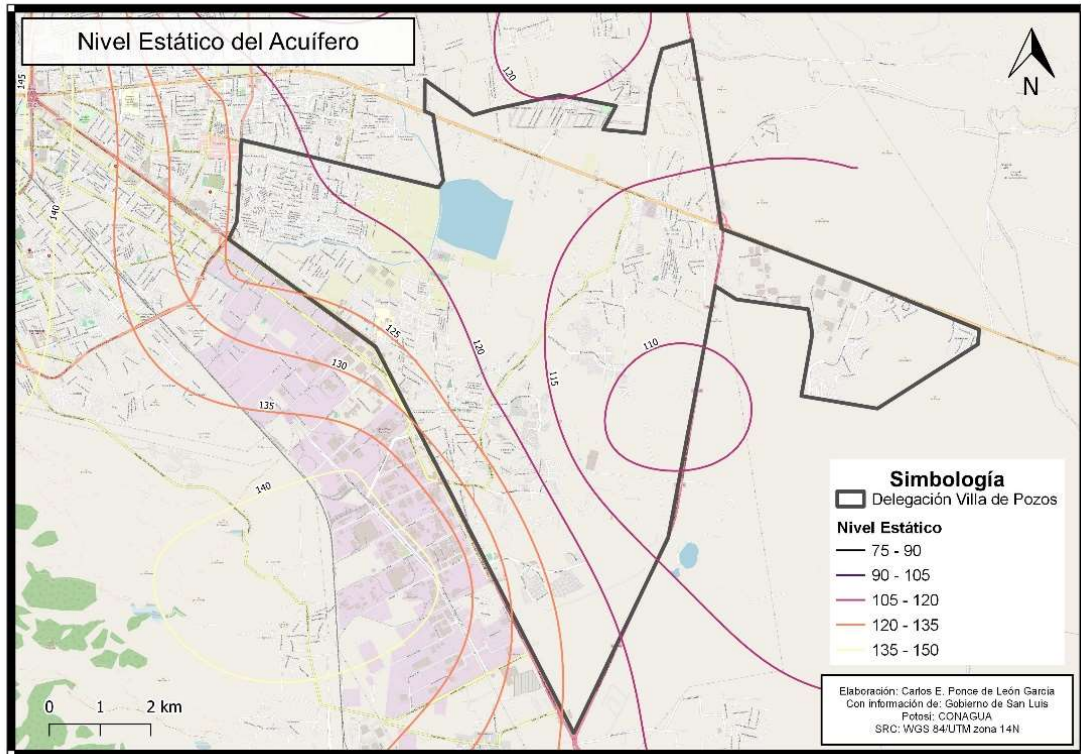


Figura 3-19 - Mapa del nivel estático del acuífero

Finalmente, para cada polígono se calculó el promedio de todos los índices generados y este promedio fue a su vez normalizado al dividirlo entre el valor máximo. Para seleccionar los polígonos de mayor importancia se clasificó la información por cuartiles, siendo aquellos del tercer cuartil los más propicios para la implementación de SUDS, en otras palabras, los elementos valorados dentro del tercer cuartil serían aquellos con las mejores características y que tendrían un mayor beneficio a la población, estos se identifican con el color amarillo en el mapa de la Figura 3-20.

Es de remarcar que todos estos polígonos están considerados dentro de la mancha urbana y se proponen para atenuar el problema de gestión de agua de lluvia actual, y que de acuerdo con la tendencia de crecimiento observado en el primer capítulo de este trabajo sería importante considerar mantener áreas de reserva para infraestructura verde en las áreas aún no urbanizadas (actualmente agrícolas) para prevenir futuros problemas de inundaciones.

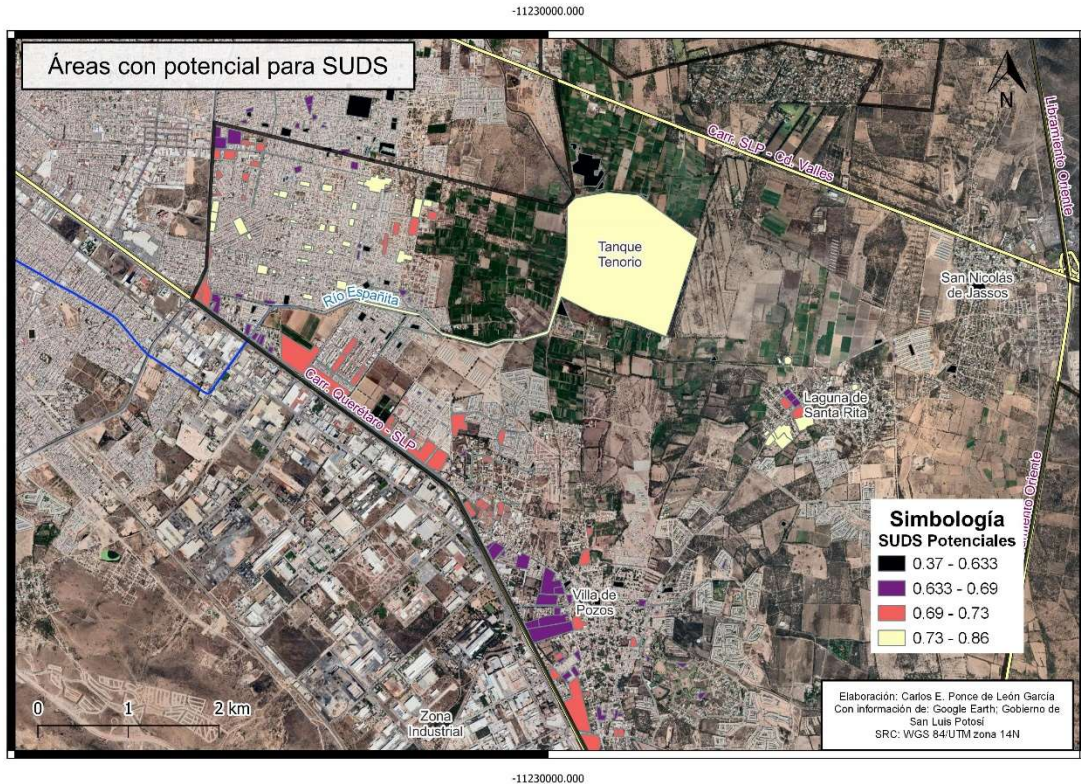


Figura 3-20 - Áreas potenciales para SUDS clasificadas por cuantiles

Existe un área de oportunidad en la incorporación de otras disciplinas para la planeación de la infraestructura verde, la sociología, el urbanismo, la economía, la geografía y la psicología son algunas de las áreas del conocimiento que enriquecerían el diseño de la infraestructura verde, por lo que se debe buscar el desarrollo de proyectos en conjunto para mejorar el impacto y la relación de la sociedad con estos proyectos de infraestructura.

Otro punto que considerar es que este trabajo tomó en cuenta las recomendaciones de instituciones sociales, gubernamentales y académicas para el planteamiento de SUDS, sin embargo, para incrementar la efectividad y durabilidad de cualquier proyecto social (estructural o no estructural) se requiere de la participación de la ciudadanía en todas las etapas del proyecto.

Para una mejor gestión de sus recursos hídricos, los centros de población requieren la participación de su población, se ha demostrado que los modelos de gestión participativa de cuencas permiten mejorar el uso del agua logrando acuerdos que faciliten la preservación de los ecosistemas y sus recursos (Merino, 2019). Para ello se necesita que haya una mayor

apertura por parte del gobierno mejorando los mecanismos de acceso a la información, planeación participativa, contraloría y defensoría ciudadana.

Sin la colaboración de la población los programas hídricos emanados de cualquier nivel de gobierno estarán destinados a fracasar, pues la planeación, construcción, supervisión y mantenimiento están actualmente en manos de la administración pública, quien tiene una capacidad de capital humano limitado e insuficiente para estas funciones, esto se evidencia en innumerables elementos de la infraestructura hídrica nacional que yacen en abandono o en mal funcionamiento. Con la asistencia de una sociedad que se apropie y vigile los proyectos relacionados con el agua se mejoraría considerablemente la gobernanza del agua y la sustentabilidad.

3.1.5 Diseño de SUDS

3.1.5.1 Canal vegetal

Para el diseño de canales vegetales se consideraron aquellos camellones que cuentan con poca o nula vegetación, el uso que tendrá esta infraestructura es principalmente para la conducción de escorrentía y evitar que esta inunde las vialidades aledañas, en el modelo SWMM® solo se considera el elemento de esta manera, sin embargo, en la práctica se pueden agregar elementos de control como vertedores para crear una retención dentro de los canales.

De acuerdo con especificaciones técnicas (Woods Ballard et al., 2015) los canales deben cumplir con ciertos requisitos para tener un buen desempeño hidráulico, estos se expresan en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 - Márgenes para las propiedades de un canal vegetal de acuerdo con Woods et al. (2015)

Propiedad	Margen
Fondo (m)	0.50 – 2.00
Pendiente longitudinal (%)	0.50 – 6.00
Pendiente lateral	1:4 – 1:3
Profundidad (m)	0.40 – 0.60

En casos en los que por los parámetros fisicoquímicos del agua no es conveniente propiciar la infiltración se debe colocar una geomembrana por debajo de la capa de material mejorado.

Para el caso de esta propuesta se diseña un canal tipo de 1.00 m de profundidad y 0.92 m de plantilla y un talud de 1:3, para proteger el tráfico se considera además colocar machuelos de 40 cm (Figura 3-21).

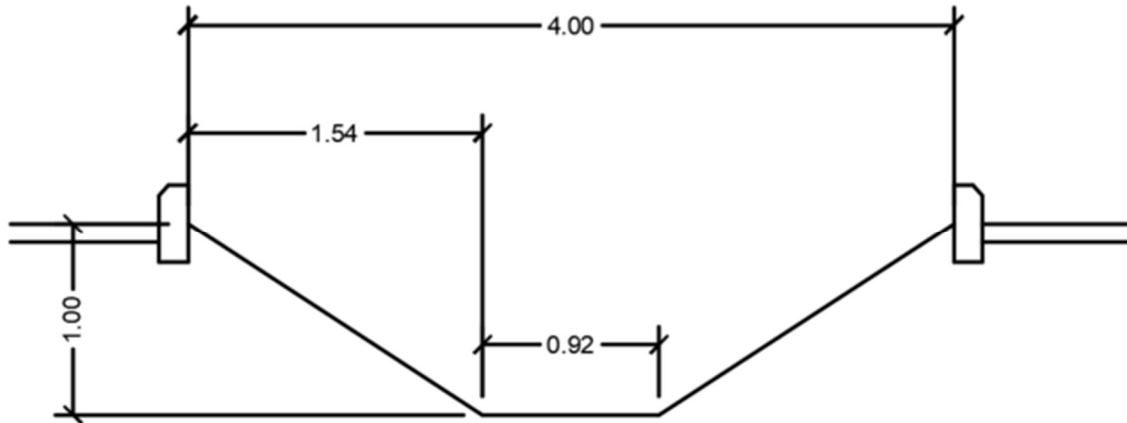
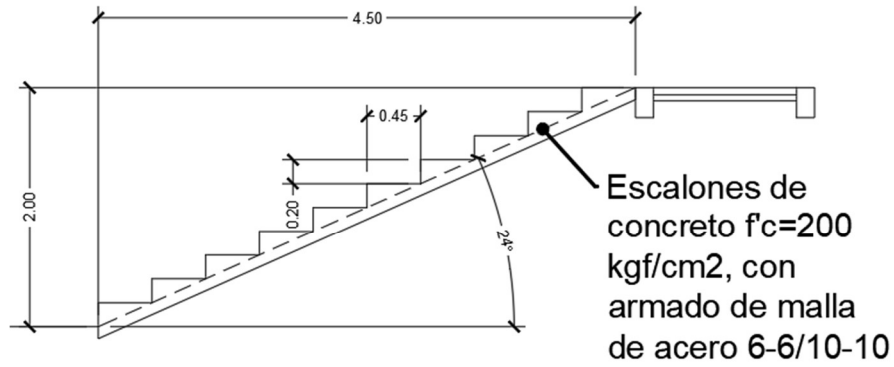


Figura 3-21 - Sección tipo de un canal vegetal

3.1.5.2 Cuencas de retención

Las cuencas de retención son el elemento de mayor efectividad en la reducción de escurrimientos debido al gran volumen que pueden acumular y liberar de forma controlada, sin embargo, estos elementos también son dependientes del espacio disponible, por lo que no son fácilmente aplicables en sitios ya urbanizados.

Para el diseño geométrico de las cuencas de retención se considera una pendiente de talud de 24° y en cada lado de la cuenca se consideran además escalones de acceso (Figura 3-22), del mismo modo para cada cuenca de retención se considera la construcción de una estructura de salida (Figura 3-22) conectada a la red de drenaje principal, por donde se irá descargando el agua de forma controlada. De igual forma para prevenir el desborde de la cuenca y afectaciones a vialidades y viviendas aledañas se considera una obra de excedencias (Figura 3-24) para evacuar eventos que superen la capacidad del embalse.



Sección A - A' de escalones

Figura 3-22 - Sección transversal de talud con escalones de acceso

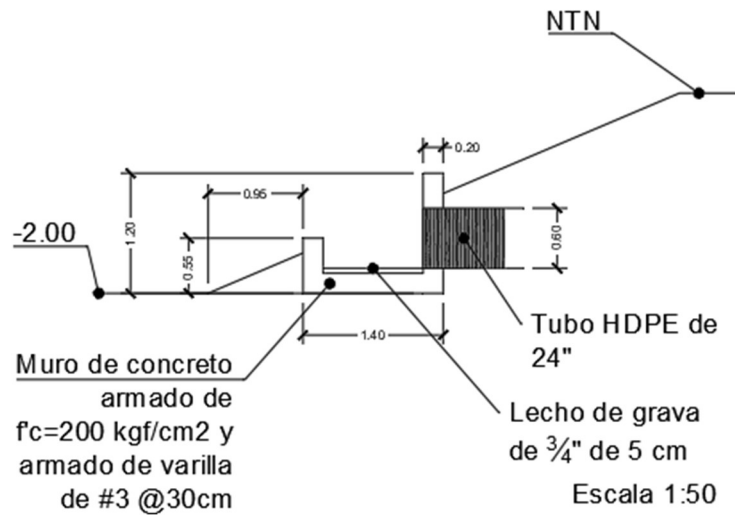


Figura 3-23 - Sección de estructura de salida tipo

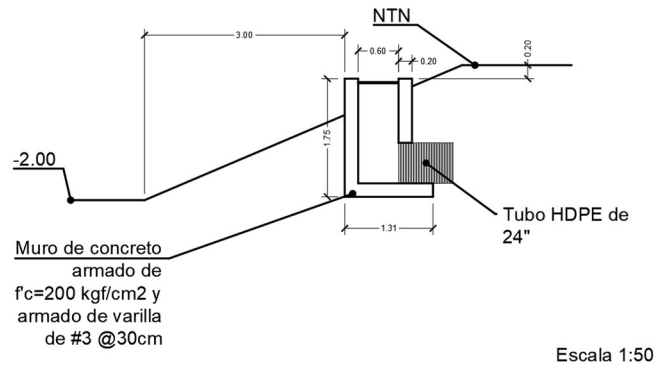


Figura 3-24 - Detalle de una obra de excedencias tipo

Para plasmar la forma de una cuenca de retención, se presenta en la Figura 3-25 los elementos básicos con los que contaría una vez construida, se pueden observar los escalones de acceso mencionados anteriormente, además de que alrededor del perímetro de la cuenca se considera una franja de piso adoquinado para que a su vez funcione como área para caminar alrededor cuando se encuentre llena. En la Figura 3-26 se muestra un corte transversal donde se puede dar una idea de la relación de la población con el nuevo espacio, donde se podría permitir el descanso de los visitantes y en caso de instalarse mesas (de concreto) la convivencia entre los mismos.

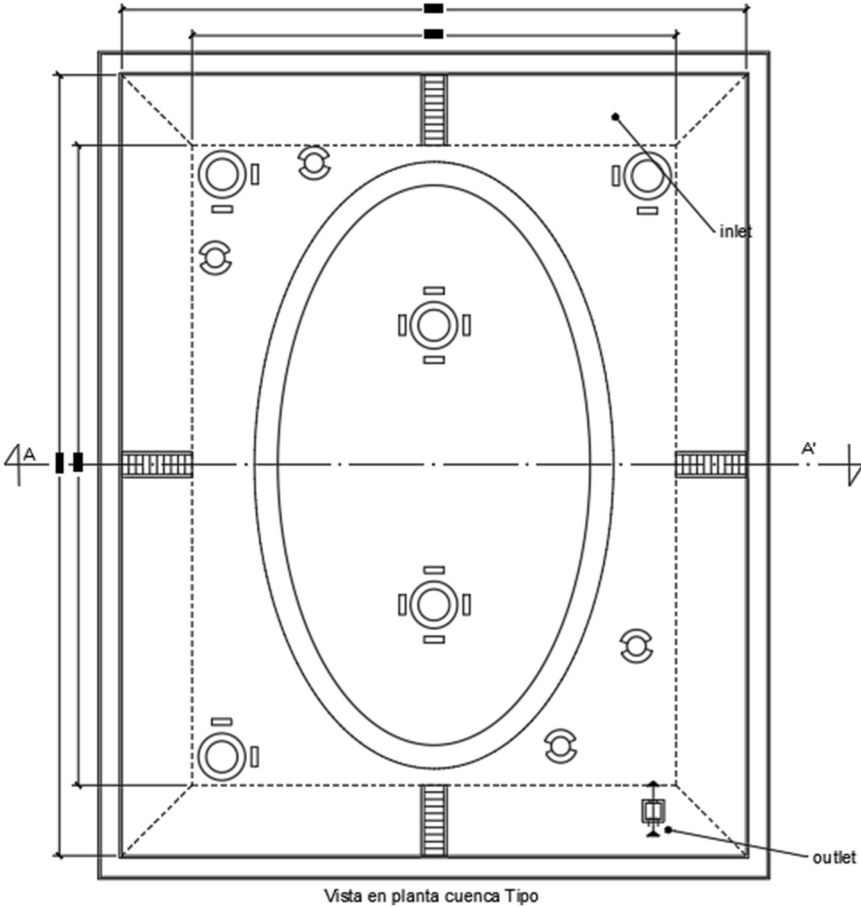


Figura 3-25 - Vista en planta de una cuenca de retención tipo

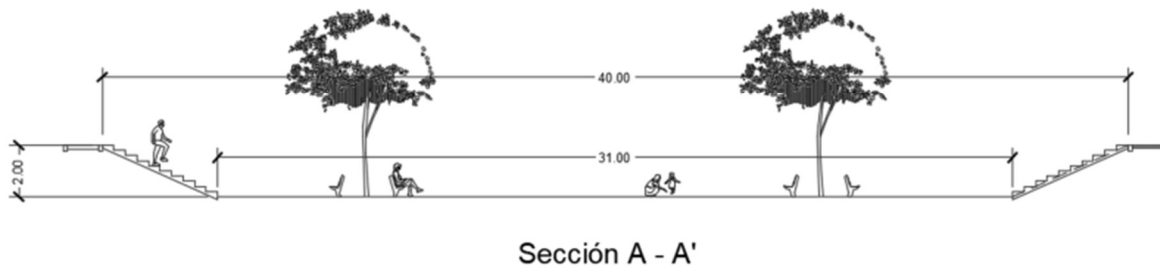


Figura 3-26 - Sección transversal A-A' para una cuenca de retención tipo

3.1.5.3 Sistemas de captación de agua de lluvia

Para el dimensionamiento de los tanques requeridos para la captación de agua de lluvia en diferentes instalaciones se partió de los métodos presentados en (Ward et al., 2010) donde se parte de una proporción de ingreso que se calcula:

$$IR = AR/D$$

Donde:

A, es el área de captación en metros cuadrados

R, es la precipitación media anual en mm

D, es la demanda anual promedio del edificio en metros cúbicos

Con esta proporción se utilizan las gráficas propuestas en (Fewkes & Wam, 2000) para determinar un nivel de desempeño deseado (E_T) y el número de días para los que se almacenaría agua (X), con esta información el volumen del tanque puede calcularse como el producto del número de días de reserva y la demanda diaria promedio.

$$S = XD_d$$

Se midieron las áreas de azotea de diferentes conjuntos de edificios que fueron considerados para captación de agua de lluvia, se consideró una precipitación media anual de 400 mm (INEGI, 2002) y una demanda de agua de 2.865 m³ diarios para 15 personas por edificio (CONAGUA, 2015), para el caso de las gráficas presentadas por Fewkes se tienen gráficas para diferentes valores de AR/D (Figura 3-27), los valores calculados se aproximarán a estos mismos valores.

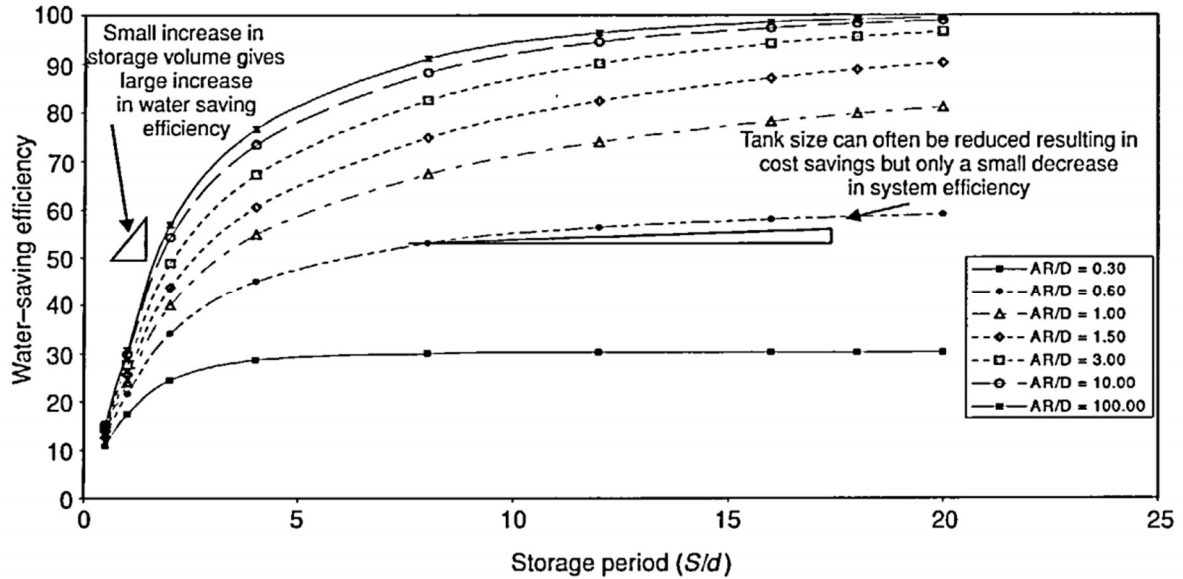


Figura 3-27 - Gráfica de eficiencia en el ahorro de agua vs periodo de reserva (Fewkes & Wam, 2000)

Para la estimación del periodo de reserva se consideró una eficiencia de ahorro de agua de al menos el 80%, con esta información y con la relación AR/D se determinó el periodo de reserva, con ello se definieron los volúmenes necesarios para cada SCALL (Tabla 3-4).

Tabla 3-4 - Relación de tanques de almacenamiento requeridos

Subc	Área de captación (m ²)	Almacenamiento (m ³)	Tanques (10m ³)
4	11510.81	229.2	18
5	15847.12	28.65	3
6	4187.95	42.975	5
7	5662.66	42.975	5
8	9694.03	42.975	5
9	9544.55	42.975	5
10	7826.41	42.975	5
11	3071.51	42.975	5
17	25590.24	524.295	56
18	3876.6	131.79	15
37	594.9	17.19	2
39	10392.53	42.975	5

3.1.5.4 Pavimento permeable

Los pavimentos permeables consisten en una capa de pavimento poroso (concreto poroso, grava, suelo reforzado o adoquín) que permitirá el paso del agua a una capa de drenaje o capa base para permitir su infiltración o conducción a un punto de desagüe.

En este caso de estudio se considerará un sistema de pavimento permeable compuesto por una superficie de adoquinado de 6 cm de espesor, una base de arena de 5 cm y una sub-base de grava bien graduada de 20 cm con un sistema de drenaje consistente en una tubería perforada de 4 pulgadas.

3.1.5.5 Trinchera de infiltración

Las trincheras de infiltración a pesar de que pueden parecer simples requieren que se cumpla varios criterios básicos, de acuerdo con CIRIA (2015), estos deben tener con una pendiente mínima (en el fondo) de 1% para evitar la acumulación de agua y un máximo del 5% para evitar la erosión.

En este caso de estudio se propone una cantidad pequeña de trincheras de infiltración en parques pequeños, de acuerdo con estudios (Woods Ballard et al., 2015) en trincheras mayores a 5 metros se tiene un buen desempeño en términos de retención de contaminantes o como pretratamiento más aún cuando se incorpora vegetación en el sistema.

Es posible diseñar una trinchera de infiltración con apoyo de la ecuación de Manning, es importante mencionar que se recomienda una velocidad máxima de 1.5 m/s para evitar la erosión del suelo.

$$V = \frac{d^{2/3} S^{1/2}}{n}$$

Siendo:

V, la velocidad media del flujo (m/s)

d, la profundidad del flujo (m)

S, la pendiente longitudinal (m/m)

n, el coeficiente de rugosidad de Manning

Para este caso de diseño se estimará la profundidad máxima que deberá tener el flujo dentro de la trinchera de infiltración para una velocidad de 1.5 m/s.

$$d = \left(\frac{V * n}{S^{1/2}} \right)^{3/2} = \left(\frac{1.5 * 0.025}{0.01^{0.5}} \right)^{3/2} = 0.23 \text{ m}$$

3.1.5.6 Techos verdes

En el caso de los techos verdes, se consideraron los márgenes propuestos en un trabajo de tesis de licenciatura donde se diseñó un techo verde tipo desde la conformación del suelo mejorado (Tabla 3-5).

Tabla 3-5 - Propiedades para un techo verde

Elemento (Superficie)	Valor	Notas	Fuente
Altura de la berma (mm)	250 mm		
Fracción del volumen de vegetación	0.0	0.1 a 0.2	(Rossman, 2015)
Rugosidad de la superficie (Manning)	0.24	Hierba Densa	
Pendiente	2.0%		
Elemento (Sustrato)	Valor	Notas	
Espesor (mm)	100 mm		
Porosidad	0.437		
Capacidad de campo	0.0835		
Punto de marchitez	0.0355		
Conductividad (permeabilidad)	75.19 mm/h – 74.52 mm/h (resultado de laboratorio)	Considerando que la textura del techo verde es una composición de arena y arena margosa	(O. Contreras, 2016)
Pendiente de conductividad	5		
Carga de succión	55 mm		
Elemento (Drenaje)	Valor	Notas	
Espesor (mm)	100 mm		(Rossman, 2015)

Fracción de vacíos	0.5	(Esponja Vegetal de Luffa y grava)
Rugosidad (Manning)	0.1	

3.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA CONSIDERANDO SUDS

3.2.1 Parámetros de los SUDS (LID Controls)

SWMM® considera dentro de sus funciones el incorporar elementos de control de Low Impact Development (LID), el equivalente en EE. UU. de los SUDS, para estos elementos el software considera distintos parámetros clasificados en propiedades de superficie, capa de pavimento, capa de suelo, almacenamiento y drenaje (Rossman, 2015). En cada elemento de control (SUDS) se consideran diferentes parámetros, algunos se comparten entre sí y otros son particulares para alguno (Tabla 3-6).

Tabla 3-6 - Parámetros usados para cada tipo de SUDS

Clasificación/SUDS	Superficie	Pavimento	Suelo	Almacenamiento	Drenaje	Celda de drenaje
Celda de biorretención	X		X	X	X	
Jardín de lluvia	X					
Techo Verde	X		X		X	X
Trinchera de infiltración	X			X	X	
Pavimento permeable	X		X	X	X	
SCALL				X		
Canal vegetal	X		X			

3.2.1.1 Parámetros de superficie

Estos describen la superficie de los SUDS que se considerarán en el modelo (Tabla 3-7), únicamente los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) no cuentan con parámetros de superficie.

Tabla 3-7 - Parámetros de superficie para LID Control

Parámetro	Descripción
Altura de la berma (o profundidad de almacenamiento)	Esto es la altura de los muros o bermas que contendrían el agua en el SUDS hasta que se desborde.
Fracción de volumen vegetal	La fracción de volumen dentro del almacenamiento lleno con vegetación (tallos, ramas y hojas). Puede ser ignorado, pero se puede llegar hasta 0.2 en un área con mucha vegetación.
Rugosidad superficial	El valor de Manning (n) para flujo superficial
Pendiente superficial	Pendiente del techo, pavimento o suelo (porcentual).
Pendiente lateral de canal (swale)	Pendiente (L/Z) de las paredes del canal. Solo aplica en los canales vegetales (swales)

3.2.1.2 Parámetros de la capa de pavimento

Describen la capa de pavimento para un pavimento permeable (Tabla 3-8).

Tabla 3-8 - Parámetros de la capa de pavimento para el LID Control

Parámetro	Descripción
Espesor (mm)	El espesor en milímetros de la capa de pavimento (puede ir de 100 a 150 mm)
Relación de vacíos	La relación entre el volumen de vacíos y el material del pavimento. Típicamente varía entre 0.12 y 0.21.
Fracción de superficie impermeable	La relación entre área de pavimento y el área total del SUDS. 0 para sistemas sin huecos como jardineras u otros elementos.
Permeabilidad	La conductividad del material de pavimento o relleno (grava o arena) medida en mm/h.

Parámetro	Descripción
Factor de taponamiento*	Gradualmente la permeabilidad del pavimento se verá reducida por el taponamiento con materiales finos.

*El factor de taponamiento se puede calcular con la formula

$$CF = \frac{y_{clo} * P_a * CR * (1 + e) * (1 - ISF)}{h * VR}$$

Donde:

P_a es la precipitación total anual

CR es la proporción de captura (el área de captación de lluvia entre el área de pavimento)

e es la relación de vacíos

ISF es la Fracción de Superficie Impermeable

h es el espesor de la capa de pavimento

3.2.1.3 Parámetros para la capa de suelo

Los parámetros de la capa de suelo describen a las propiedades de un suelo mejorado usado en los diferentes SUDS (Tabla 3-9).

Tabla 3-9 - Parámetros de la capa de suelo para el LID Control

Parámetro	Descripción
Espesor (mm)	El espesor en milímetros de la capa de suelo (puede ir de 75 a 150 mm en techos verdes o de 450 a 900 mm para otros sistemas).
Porosidad	El volumen de espacio de poros relativo al volumen total del suelo (en fracción).
Capacidad de campo	Volumen de agua en poro relativa al volumen total una vez que el suelo ha sido totalmente drenado (en fracción). Después de este punto no existe drenaje vertical de agua.
Punto de marchitez	Volumen de agua en poro relativa al volumen total de un suelo seco drenado donde solo el

Parámetro	Descripción
	agua unida a raíces permanece. El contenido de humedad de un suelo no puede bajar de este límite.
Conductividad (mm/h)	Conductividad hidráulica de un suelo completamente saturado.
Pendiente de conductividad	Pendiente de la curva de log(conductividad) – contenido de humedad. Los valores típicos van del 30 al 60. Puede estimarse con un análisis granulométrico.
Altura de succión (mm)	El valor promedio de la succión de capilaridad del suelo a través del punto de marchitez. Es el mismo parámetro usado en el modelo de infiltración Green-Ampt

3.2.1.4 Parámetros de la capa de almacenamiento

Describen las propiedades de la capa de grava en algunos elementos con una capa de material de retención o en el caso de sistemas de captación de agua de lluvia a la altura del tanque de almacenamiento (Tabla 3-10).

Tabla 3-10 - Parámetros para la capa de almacenamiento para el LID Control

Parámetro	Descripción
Espesor o profundidad de cisterna (mm)	El espesor en milímetros de la capa de almacenamiento (puede ir de 150 a 450 mm). También se refiere a la altura de un tanque cisterna.
Relación de vacíos	La relación entre el volumen de vacíos y la grava. Típicamente varía entre 0.5 y 0.75 para gravas.
Velocidad de filtración (mm/h)	La velocidad con la que el agua se infiltra en el suelo natural bajo la capa de grava. La Conductividad Hidráulica Saturada si se usa un modelo Green-Ampt o la Velocidad Mínima de Infiltración si se usa un modelo de infiltración de Horton, en el caso de que no haya filtraciones se usa el valor 0.

Parámetro	Descripción
Factor de taponamiento	Gradualmente la permeabilidad de la capa se verá reducida por el taponamiento con materiales finos.

3.2.1.5 Parámetros de la capa de drenaje

Opcionalmente algunos SUDS tendrán un sistema de drenaje dentro de la capa de almacenamiento que transporta el agua a la red de drenaje pluvial u a otro sitio de aprovechamiento (Tabla 3-11).

Tabla 3-11 - Parámetros para la capa de drenaje para el LID Control

Parámetro	Descripción
Coeficiente de drenaje* y Exponente de Drenaje	Determinan la velocidad del flujo a través del drenaje en función de la altura del agua almacenada sobre la corona del drenaje. Si no hay drenaje se usa C=0.
Elevación de efluente (mm)	Altura a la que se encuentra el efluente respecto al fondo de la capa de almacenamiento.
Retraso de drenaje	El número de días secos que pasan antes de que se abra el drenaje. Si el drenaje siempre está abierto se usa un valor de 0. Se usa solo para SCALLS.
Capacidad de flujo (mm/h)	La velocidad máxima de flujo que las canaletas y bajantes pueden manejar antes de desbordarse.

*El coeficiente de drenaje se calcula con la formula:

$$q = Ch^n$$

Dónde:

q es la velocidad de flujo en mm/h

h es la altura del medio saturado sobre el drenaje

n es el exponente de drenaje (usualmente 0.5)

3.2.1.6 Parámetros de celda de drenaje

En el caso de los techos verdes estos usualmente cuentan con celdas de drenaje colocadas entre la azotea y el sustrato que permiten conducir el agua hasta la salida del drenaje (Tabla 3-12).

Tabla 3-12 - Parámetros de capa de celda de drenaje del LID Control

Parámetro	Descripción
Espesor (mm)	El espesor en milímetros de la capa de almacenamiento (puede ir de 25 a 50 mm).
Relación de vacíos	Típicamente varía entre 0.5 y 0.6.
Rugosidad superficial	El valor de Manning (n) para flujo superficial. Usualmente los proveedores no dan esta información, estudios han encontrado un rango de 0.1 a 0.4.
Factor de taponamiento	Gradualmente la permeabilidad de la capa se verá reducida por el taponamiento con materiales finos.

3.2.1.7 Cuenca de Retención

De acuerdo con el diseño realizado se ingresan lo siguientes parámetros para una cuenca de retención (Figura 3-28), además, en lo que respecta al suelo mejorado, este tendrá las mismas propiedades que el suelo considerado en los techos verdes. No se analizan parámetros de drenaje.

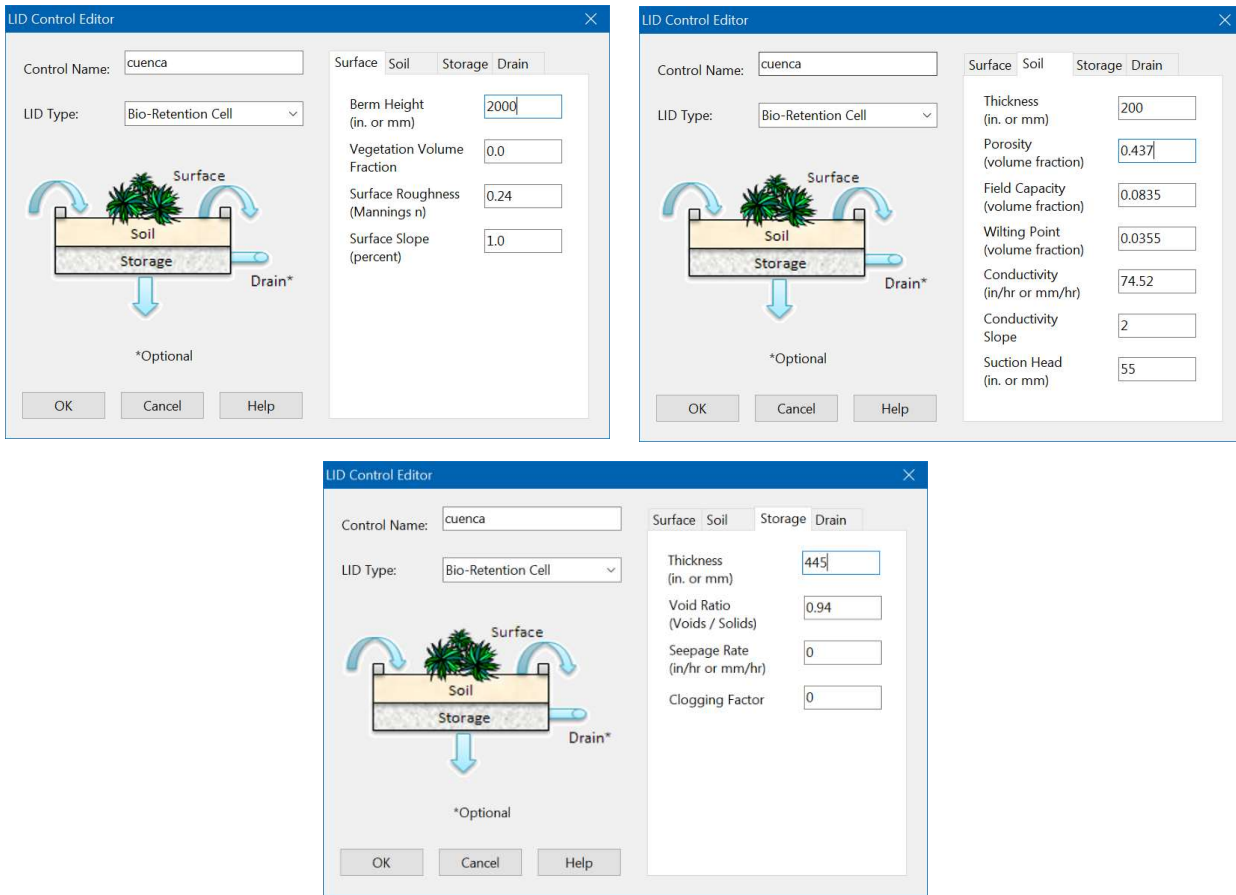


Figura 3-28 - Parámetros ingresados para las cuencas de retención

3.2.1.8 Canal Vegetal (swale)

Los canales vegetales considerarán las propiedades establecidas en el diseño y en el manual de uso de SWMM® (Figura 3-29) (Rossman, 2015).

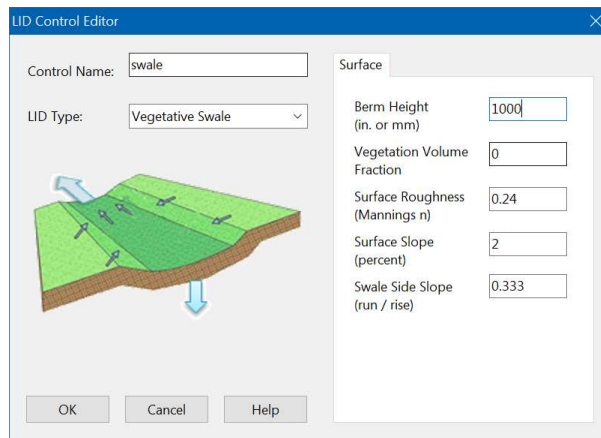


Figura 3-29 - Parámetros ingresados para canales vegetales

3.2.1.9 Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL)

En el caso de los sistemas de captación de agua de lluvia se considera únicamente el parámetro de almacenamiento correspondiente a la altura del tanque, que en el caso de la cisterna de 10mil litros es de 2.0 metros (Figura 3-30).

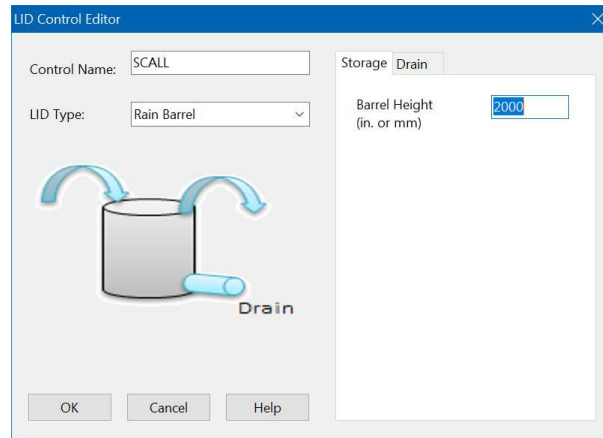
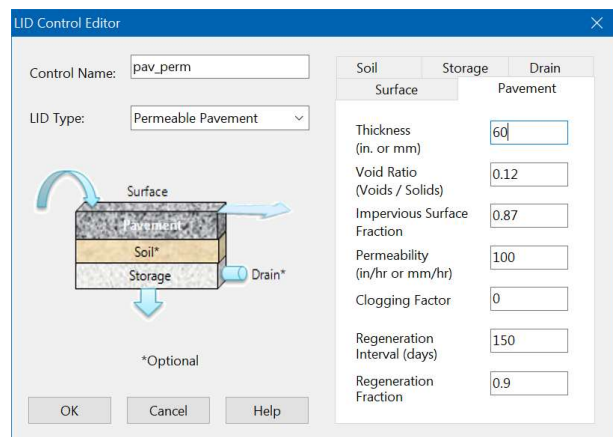
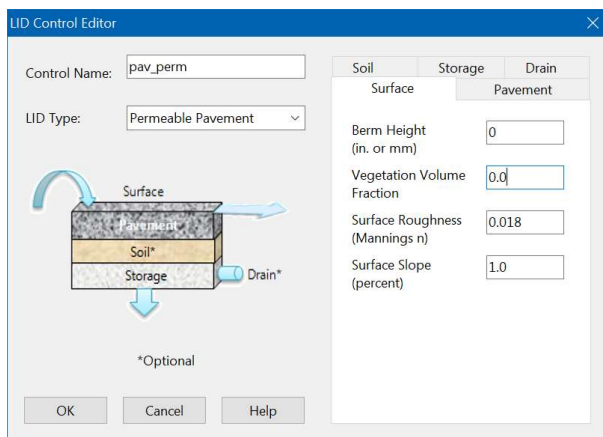


Figura 3-30 - Parámetros ingresados para captación de agua de lluvia

3.2.1.10 Pavimento Permeable

En el caso de pavimentos permeables se consideran los siguientes parámetros con base en su diseño y en las recomendaciones del manual de uso de SWMM® (Figura 3-31) (Rossman, 2015).



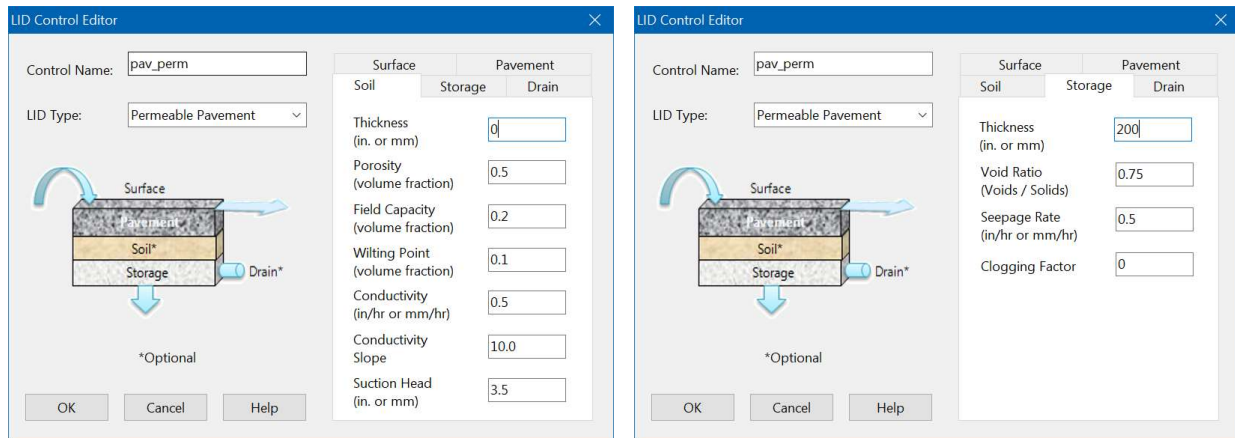


Figura 3-31 - Parámetros ingresados para pavimentos permeables

3.2.1.11 Trinchera de Infiltración

Con las trincheras de infiltración como se considerarán como elementos de intercepción y retención no se considerará la pestaña de drenaje, pero si los parámetros de superficie y almacenamiento de acuerdo con el diseño y las recomendaciones del manual de SWMM® (Figura 3-32) (Rossman, 2015).

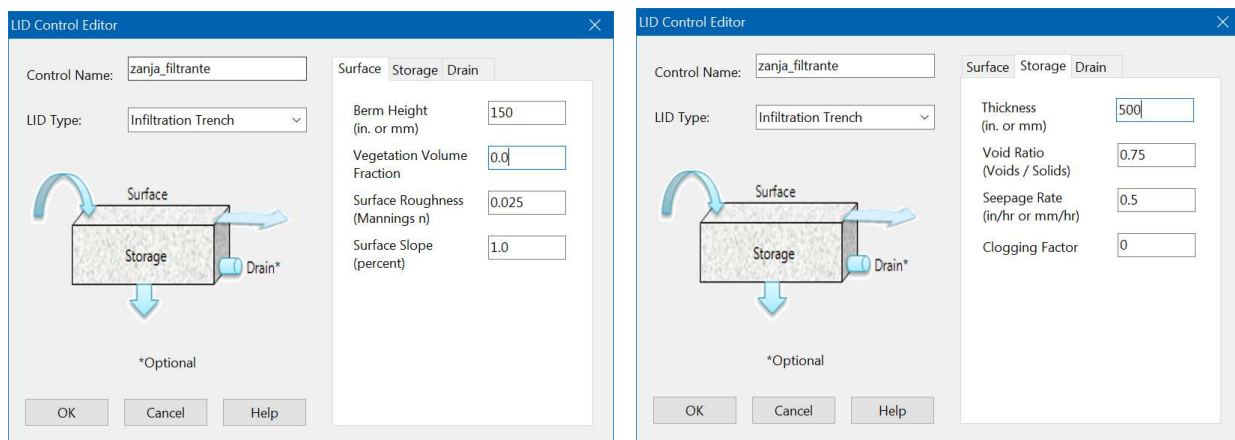


Figura 3-32 - Parámetros ingresados para trincheras de infiltración

3.2.1.12 Techo Verde

Los techos verdes tendrán las propiedades determinadas en la etapa de diseño a partir de los datos presentados en la tesis de (O. Contreras, 2016) y las recomendaciones dadas por el manual de uso de SWMM® (Figura 3-33) (Rossman, 2015).

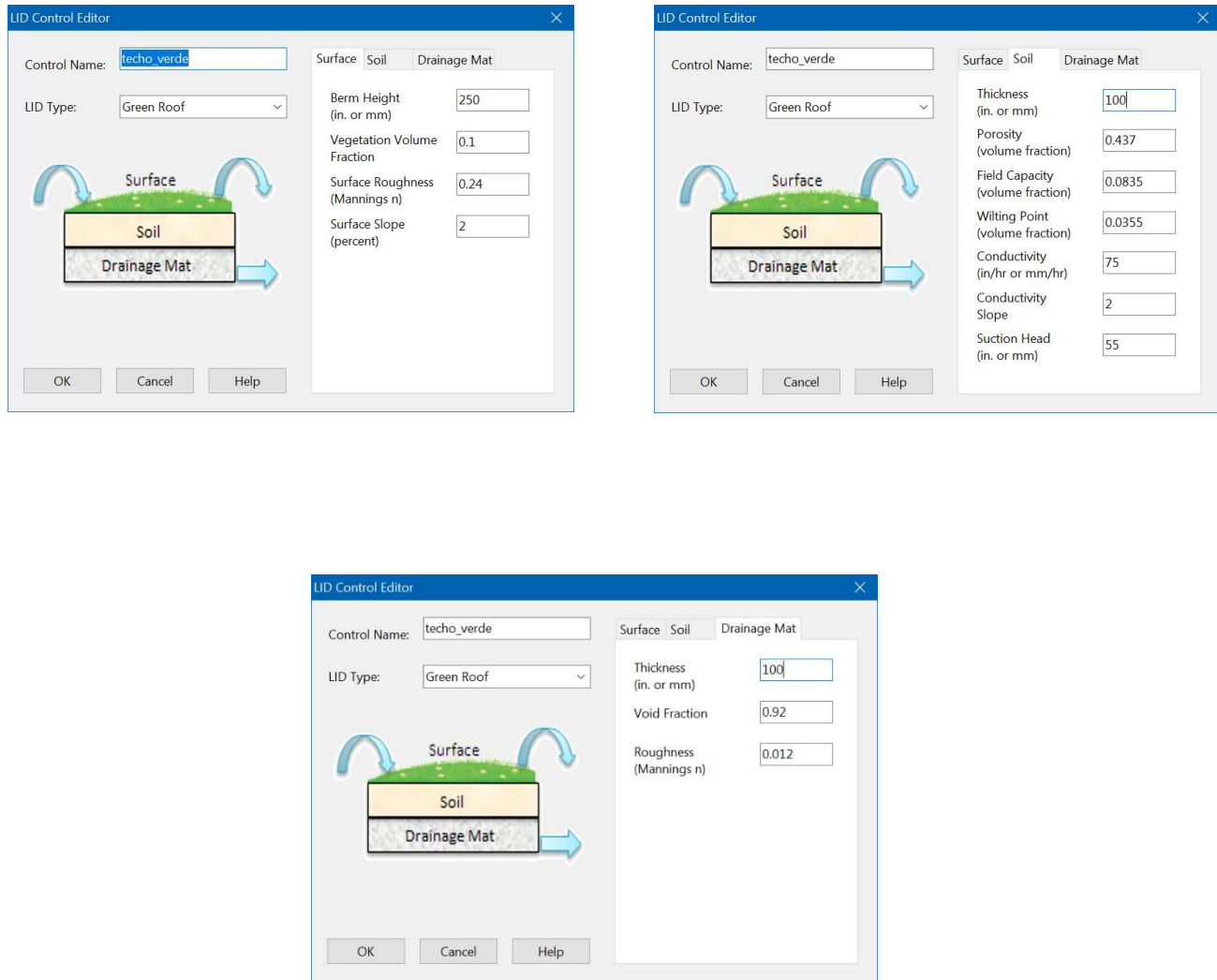


Figura 3-33 - Parámetros ingresados para techos verdes

3.2.2 Integración en el modelo conceptual

La integración de los SUDS en la modelación con SWMM® es sencilla, una vez que se tienen los parámetros de cada uno estos se ingresan en las propiedades de la cuenca en el apartado "LID Control" (Figura 3-34).

Property	Value
Name	Subc-4
X-Coordinate	306147.433
Y-Coordinate	2444379.550
Description	
Tag	
Rain Gage	Pluv-1
Outlet	N-4
Area	89.6211
Width	515.87
% Slope	0.3068
% Imperv	53.64
N-Imperv	0.008435379
N-Perv	0.073530397
Dstore-Imperv	0.05
Dstore-Perv	0.05
%Zero-Imperv	25
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration Data	CURVE_NUMBER
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	2
Land Uses	0
Initial Buildup	NONE

Figura 3-34 - Propiedades de una cuenca donde se incluyen los LID Controls

Para cargar la información se utiliza la ventana del editor de uso de LID (*LID Usage Editor* (Figura 3-35 - Editor de uso de LID), donde se ingresa la información referente al sistema que será propuesto para esa cuenca (Tabla 3-13), algunos parámetros son opcionales y otros de uso necesario según sea el sistema propuesto, además si la cuenca corresponde a un SUDS en particular se puede seleccionar esta opción en la ventana.

Tabla 3-13 - Parámetros para el editor de uso de LID ((Rossman, 2015)

Parámetro	Descripción	Uso
Área de cada unidad (m ²)	Extensión superficial de cada unidad	En todos los casos
Número de unidades	Cantidad de unidades que tendrá la cuenca	En todos los casos
Ancho de cada unidad (m)	Ancho de la unidad por donde correrá el agua	Techos verdes, pavimentos permeables, trincheras de infiltración y canales vegetales (swales)
% de saturación inicial	El grado en el inicialmente el suelo contiene agua. 0%	Celdas de biorretención, cuencas de retención,

Parámetro	Descripción	Uso
	corresponde al punto de jardines de lluvia y techos marchitez y el 100% representa a verdes.	
	un contenido de humedad igual a la porosidad	
% de área impermeable tratada	El porcentaje de la porción de suelo impermeable que será tratada por el LID.	En todos los casos
% de área permeable tratada	El porcentaje de la porción de suelo permeable que será tratado por el LID	En todos los casos
Enviar flujo drenado a	El nombre del nodo o subcuenca hacia el que será enviado el excedente drenado. Si se deja en blanco se considera que se descarga hacia la salida de la subcuenca.	En todos los casos (opcional)
Retornar todo el excedente al área permeable	Se selecciona si el excedente de flujo se enviará al área permeable de la subcuenca	SCALL y techos verdes (opcional)

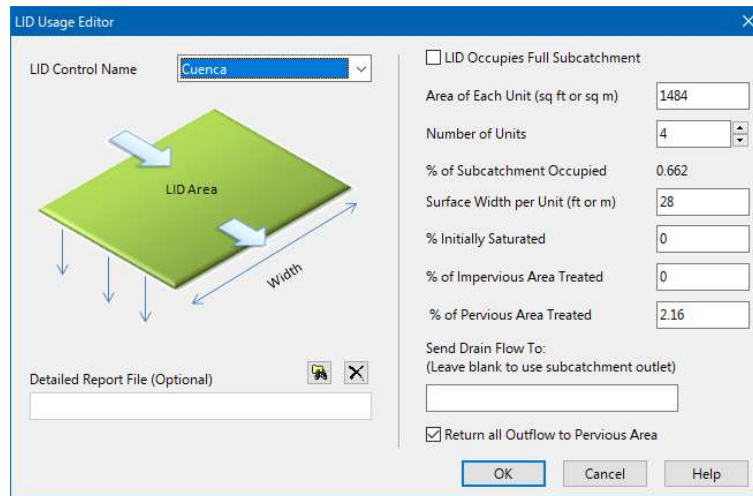


Figura 3-35 - Editor de uso de LID

3.2.3 Resultados

Una vez corrida la simulación se obtuvieron nuevos valores para la escorrentía superficial y para los flujos dentro de los colectores. De forma general, se puede graficar la respuesta de todo el sistema como una gráfica de escorrentía en litros por segundo, SWMM® permite graficar esta respuesta para hacer una comparación de todo el sistema.

En el caso de toda la zona norte (Figura 3-36), existe una reducción visible del escurrimiento y un desplazamiento del momento en que ocurre el pico en el escurrimiento con el esquema de SUDS (graficado en verde), lo cual es beneficio en la gestión del agua pluvial, sin embargo, para mejorar los resultados sería necesario realizar una intervención en la infraestructura pluvial y en el esquema de SUDS para mejorar su capacidad de atenuación de escorrentía.

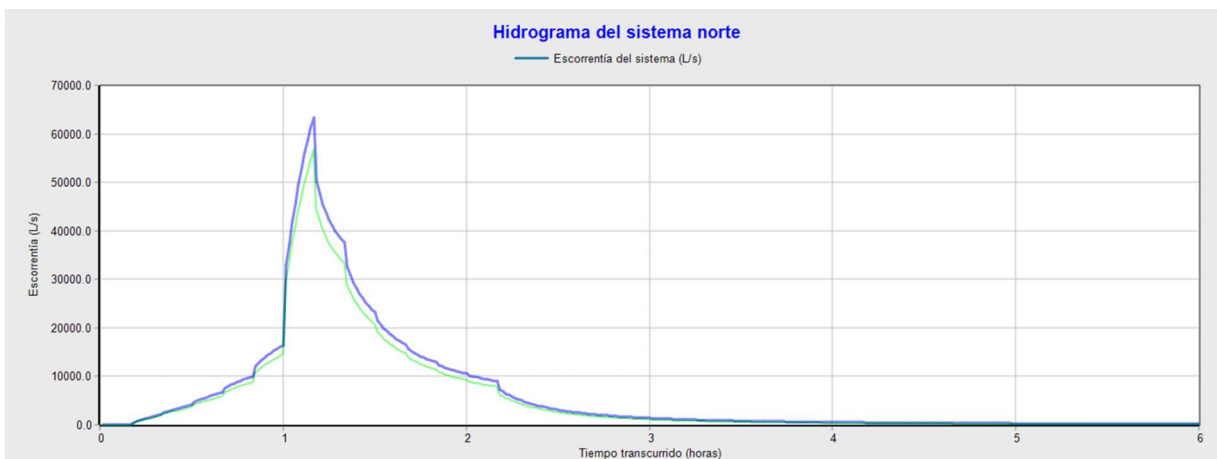


Figura 3-36 - Hidrograma del sistema norte, se muestra la escorrentía original en azul y la escorrentía con SUDS en verde

A diferencia del caso anterior, en el hidrograma de la zona sur (Figura 3-37), la diferencia entre el escurrimiento pico y el momento en que ocurre cuando se consideran SUDS (graficado en verde) es muy pequeña, por lo que se necesitaría otra estrategia tanto como de intervención en la infraestructura pluvial existente como de SUDS para atenuar estas condiciones.

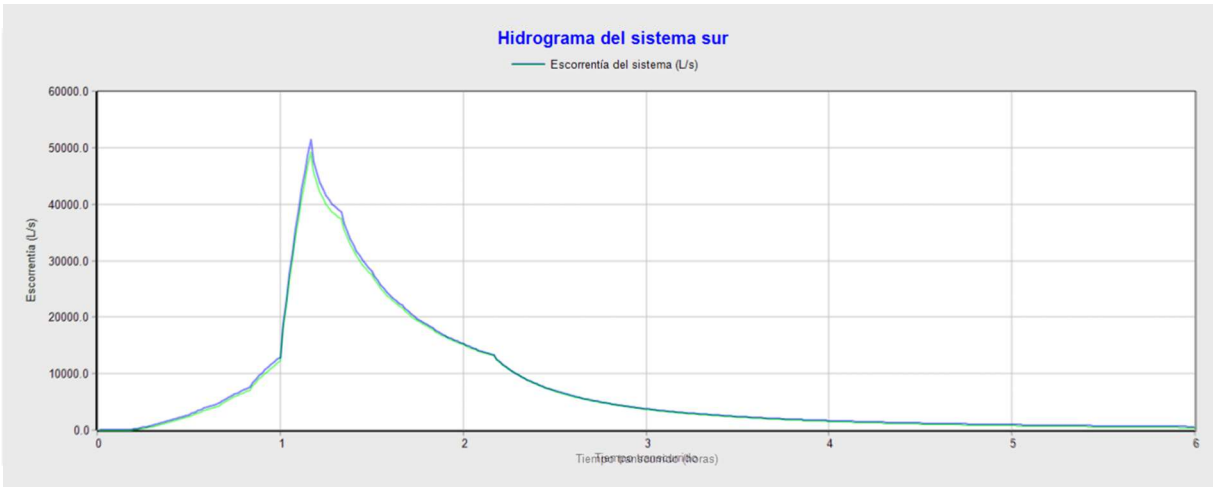


Figura 3-37 - Hidrograma del sistema sur, se muestra la escorrentía original en azul y la escorrentía con SUDS en verde

De forma desglosada se presentan los escurrimientos para cada subcuenca, y acuerdo con los SUDS propuestos existen reducciones en el escurrimiento de hasta un 40% en la zona norte mientras que en la zona sur estos llegan a ser de hasta 27% (Figura 3-38).

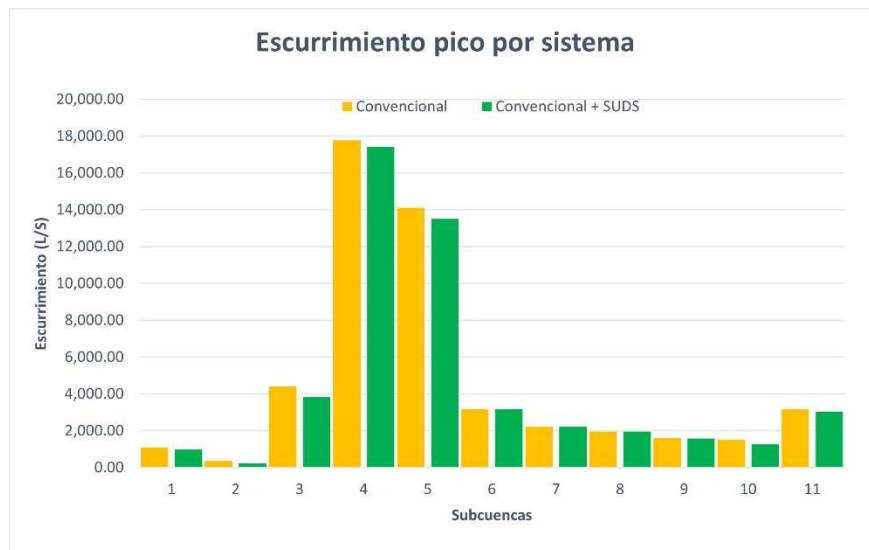


Figura 3-38- Comparación del escurrimiento superficial en la zona sur

Sin embargo, en la zona norte existen subcuencas (37-40) donde el cambio en los escurrimientos es muy pequeño, esto es debido a que la falta de espacios desocupados hace difícil implementar casi cualquier sistema, en estos casos únicamente se propusieron sistemas de captación de agua de lluvia, sin embargo, existe la posibilidad de implementar techos

verdes en todos los hogares y edificios departamentales o educativos lo que requeriría una gran inversión por parte de cada hogar no solo en su construcción si no también en su mantenimiento.

En la zona norte los cambios son más notables los cambios en las subcuencas con escurrimientos más importantes, sin embargo, entre las cuencas 37 a 41 no se observan cambios significativos (Figura 3-39), esto debido a que solo fue posible incluir una limitada cantidad de SCALLs por la disponibilidad de espacios aptos para este fin.

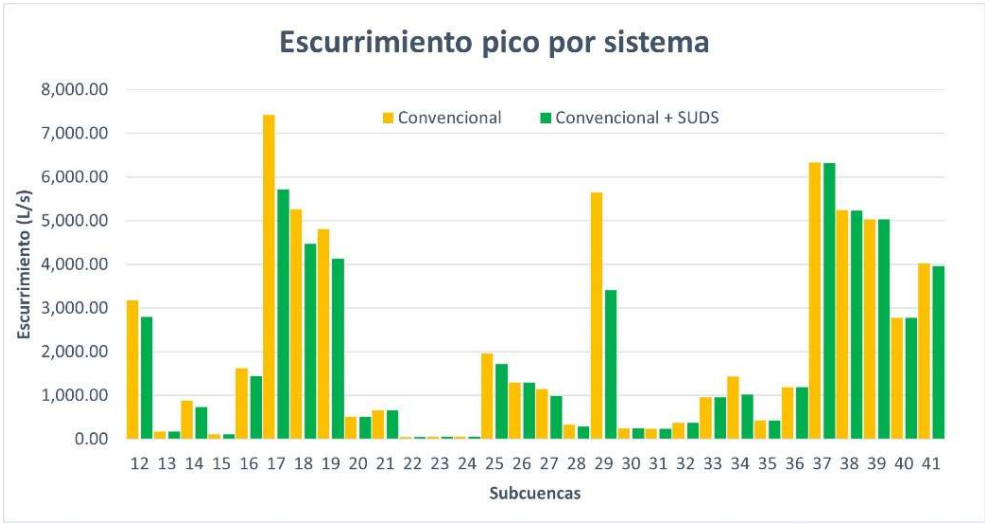


Figura 3-39 - Comparación del escurrimiento superficial en la zona norte

Al respecto de los resultados obtenidos en la reducción de caudales en los sistemas de drenaje existen resultados variados y en algunos tramos imperceptibles o hasta mayores que en la situación previa. En el caso de la primera sección de la zona sur los cambios son negativos, ya que el gasto pico incrementa o se mantiene sin cambio.

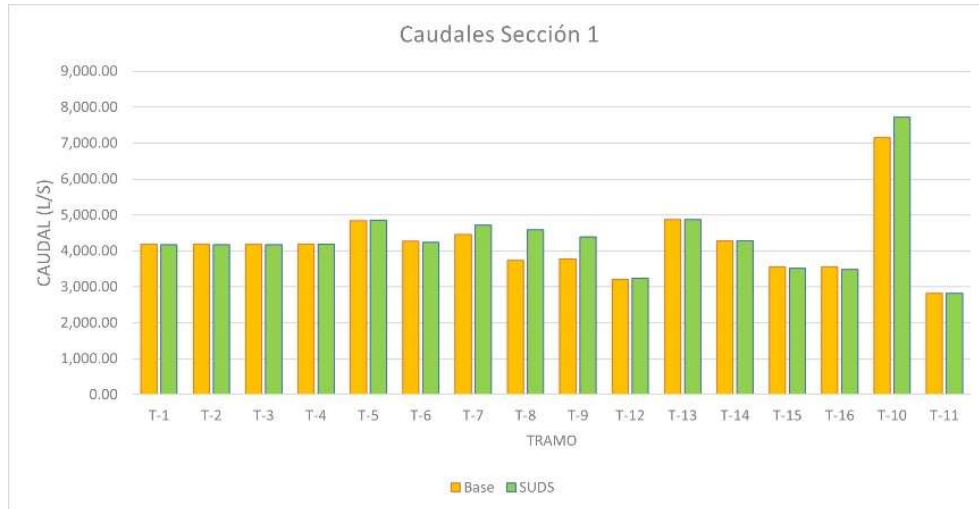


Figura 3-40 - Comparación de caudales zona sur sección 1

En la sección 2, formada por una pequeña zona industrial se mantienen los caudales registrados en la calle Golondrinas (Figura 3-41), a pesar de que se consideran SCALLs en cada nave industrial, parece no haber un impacto en la cantidad de agua en la calle.

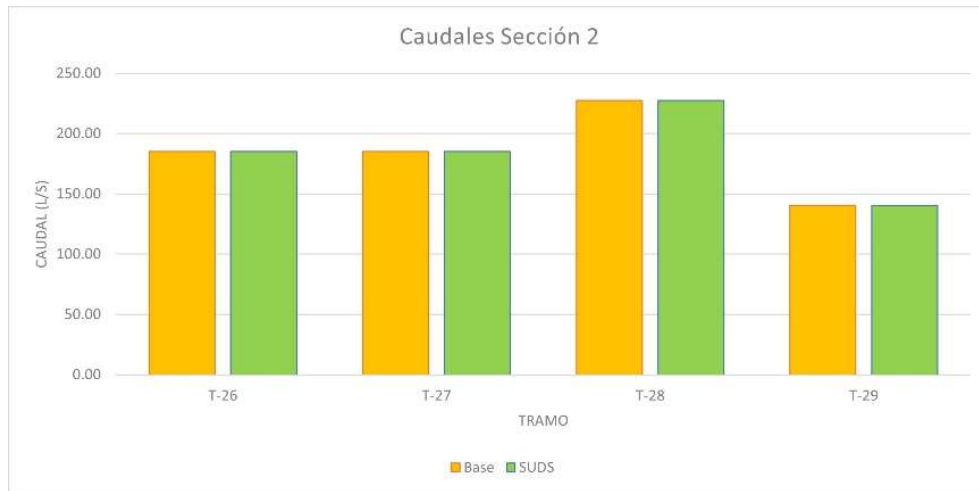


Figura 3-41 - Comparación de caudales zona sur sección 2

En la zona rural de Laguna de Santa Rita se presentan algunas reducciones en el flujo que se presenta sobre la calle 24 de febrero, sin embargo, para una mayor reducción del caudal en la zona será necesaria la construcción adicional de un drenaje pluvial convencional.

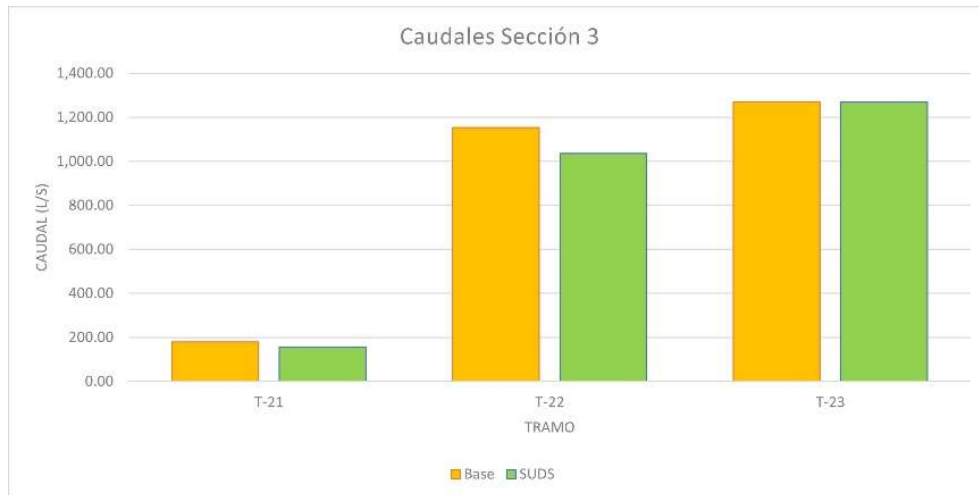


Figura 3-42 - Comparación de caudales zona sur sección 3

En la zona norte el comportamiento de los colectores se mantiene más estable, manteniéndose el caudal presentado y reduciéndose en algunos tramos evaluados (Figura 3-43), pero bajo un margen pequeño.

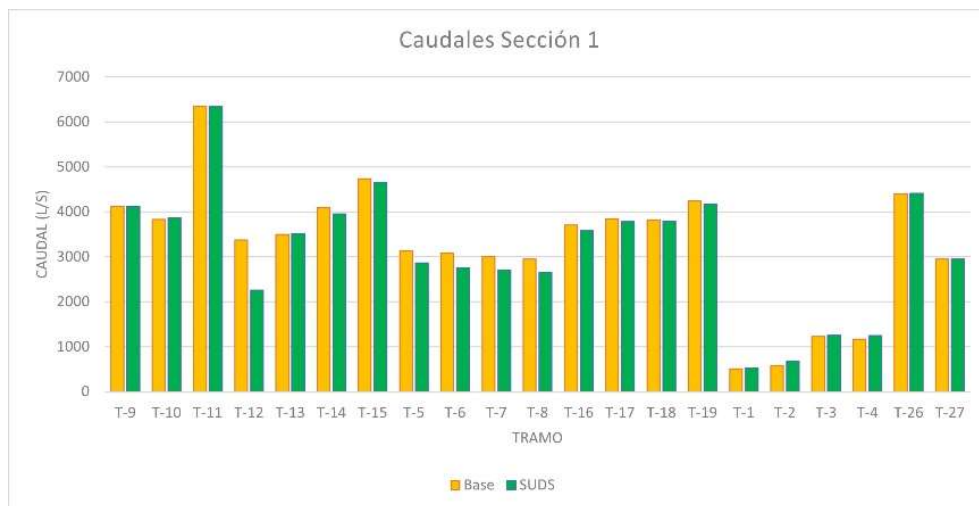


Figura 3-43 - Comparación de caudales en zona norte sección 1

En la segunda sección, a pesar de tener un espacio limitado y considerar principalmente SCALLs se evidencia una reducción considerable en la cantidad de agua que corre por la calle (Figura 3-44) (en esta sección no se reporta drenaje pluvial).

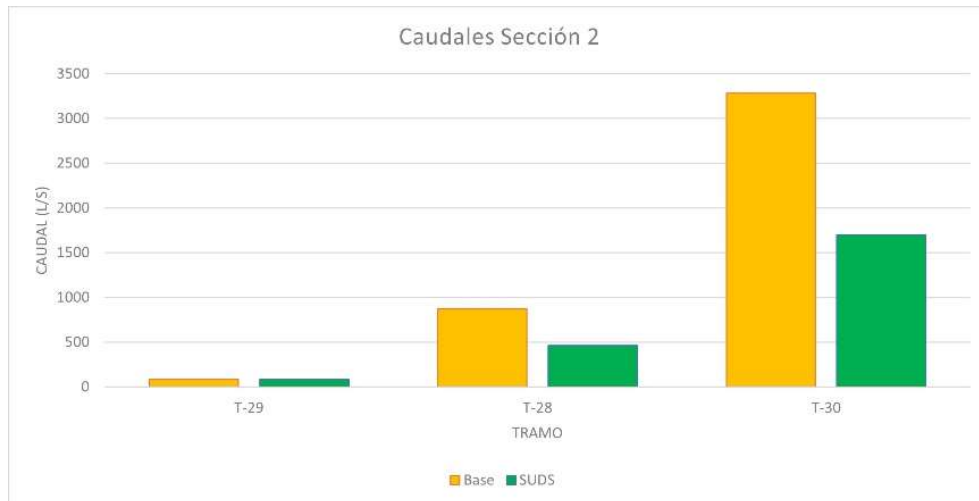


Figura 3-44 - Comparación de caudales en zona norte sección 2

En el caso de la sección 3, que corresponde a un colector pluvial sin ramificaciones, se observó igualmente un cambio en los caudales (Figura 3-45), teniendo hasta un 12% menos de gasto en el tramo 20.

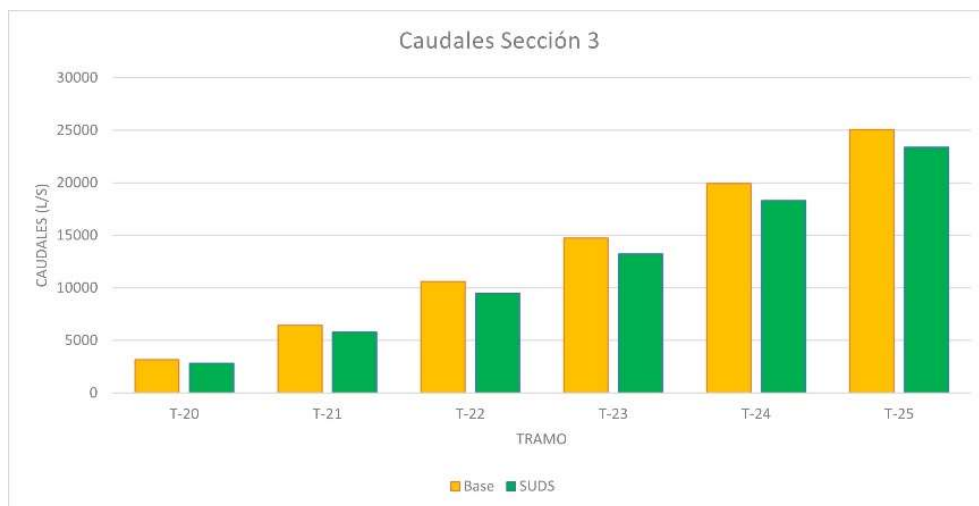


Figura 3-45 - Comparación de caudales en zona norte sección 3

Finalmente, en la sección 4, que corresponde a un área agrícola, no se tienen resultados sensibles (Figura 3-46) (solo un 1% menos), por lo que el sistema de retención no tiene un impacto significativo en la capacidad de drenaje.

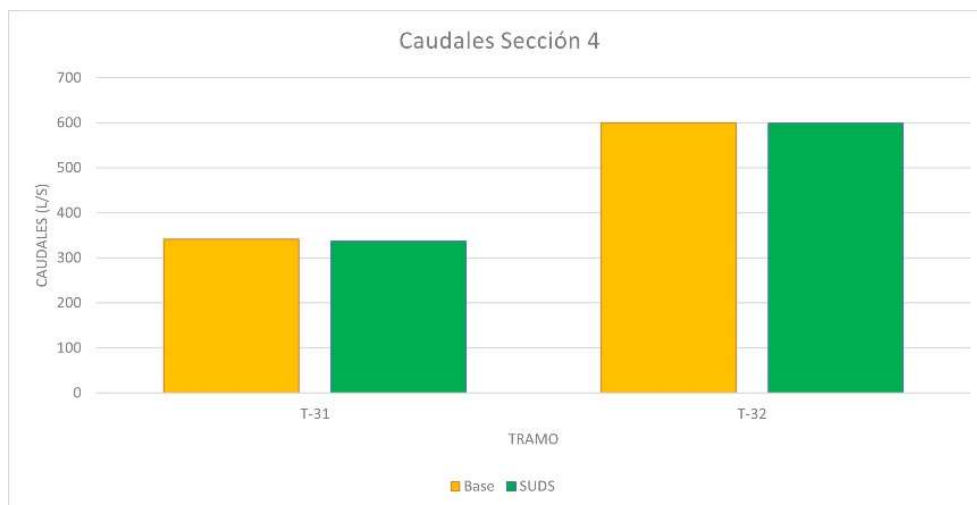


Figura 3-46 - Comparación de caudales en zona norte sección 4

De todos estos resultados se puede inferir que en las subcuencas de mayor tamaño (como la subcuenca 4 que tiene una superficie de 89 hectáreas) el impacto de los sistemas propuestos es muy pequeño ya que, aunque una cuenca de retención capte 80 m^3 si la subcuenca produce $10,000 \text{ m}^3$ en un evento de lluvia la reducción de escurrimiento solo es de 0.8%, es por esto por lo que en las subcuencas de menor tamaño es más fácilmente perceptible el efecto de los sistemas de drenaje sustentable.

En particular, el programa SWMM® también puede reportar el comportamiento de cada elemento SUDS que considera en la simulación en forma de un balance hídrico (Figura 3-47), dando información importante sobre su desempeño.

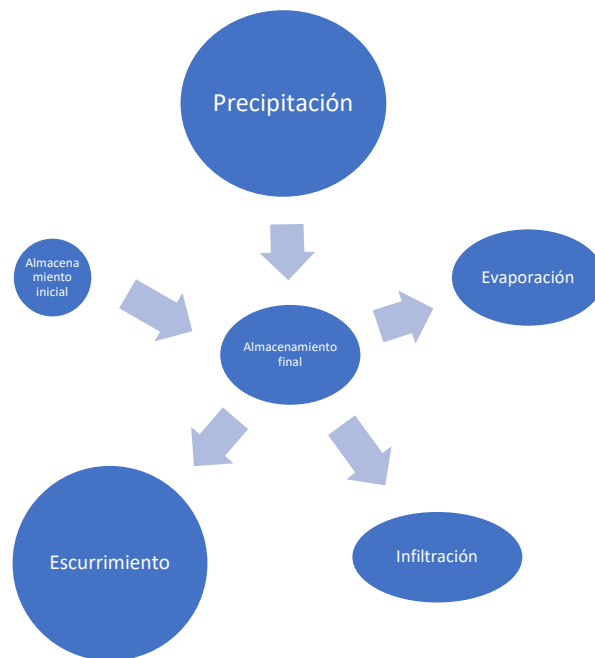


Figura 3-47 - Balance hídrico realizado por SWMM®

Cada elemento de control SUDS capta un volumen de escurrimiento. Con la información de la siguiente tabla (Tabla 3-14) se puede observar que los elementos que tienen mayor utilidad para disminuir la esorrentía captada son las cuencas de retención y los sistemas de captación de agua de lluvia, mientras que los canales vegetales tienen una retención, sin embargo, esto es esperado ya que son más bien sistemas de conducción, aunque es posible agregar muros de contención para que funcionen también como sistemas de retención.

Tabla 3-14 - Desempeño de SUDS propuestos en la zona norte

Subc.	SUDS	Ingreso (mm)	Pérdidas por ETP	Pérdidas por inf.	Flujo superficial (salida)	Drenaje (salida)	Alm. inicial	Alm. final	Retención
Subc-17	cuenca	602.67	0	0	0	0	0	602.67	100%
Subc-18	cuenca	589	0	0	0	0	0	589	100%
Subc-19	cuenca	748.1	0	0	0	0	0	748.1	100%
Subc-25	cuenca	668.4	0	0	0	0	0	668.4	100%
Subc-27	cuenca	422.17	0	0	0	0	0	422.17	100%
Subc-28	cuenca	170.01	0	0	0	0	0	170.01	100%
Subc-29	cuenca	95.85	0	0	0	0	0	95.85	100%

Subc.	SUDS	Ingreso (mm)	Pérdidas por ETP	Pérdidas por inf.	Flujo superficial (salida)	Drenaje (salida)	Alm. inicial	Alm. final	Retención
Subc-34	Cuenca	1529.48	0	0	0	0	0	1529.48	100%
Subc-12	Cuenca	1062.06	0	0	0	0	0	1062.06	100%
Subc-14	Cuenca	991.03	0	0	0	0	0	991.03	100%
Subc-16	Cuenca	316.18	0	0	0	0	0	316.18	100%
Subc-41	Cuenca	114.61	0	0	0	0	0	114.61	100%
Subc-37	SCALL	590.43	0	0	0	0	0	590.43	100%
Subc-40	SCALL	92.14	0	0	0	0	0	92.14	100%
Subc-29	Trinch. inf.	95.84	0	5.42	0	0	0	90.42	94%
Subc-19	SCALL	3145.8	0	0	1145.8	0	0	2000	64%
Subc-17	Pav. Perm.	165.2	0	5.42	75.05	0	0	84.73	51%
Subc-18	SCALL	7444.03	0	0	5444.03	0	0	2000	27%
Subc-38	SCALL	8515.59	0	0	6515.59	0	0	2000	23%
Subc-17	SCALL	11153.51	0	0	9153.51	0	0	2000	18%
Subc-39	SCALL	178586.26	0	0	176586.26	0	0	2000	1%
Subc-18	Canal	1505.53	0	0.67	1502.52	0	0	2.34	0%
Subc-17	Canal	1774.03	0	0.44	1770.92	0	0	2.67	0%
Subc-34	Canal	5533.63	0	0.51	5531.52	0	0	1.6	0%

Por otro lado, en la zona sur se consideró implementar techos verdes en las cuencas más pequeñas, sin embargo, su efectividad en términos de reducción de la escorrentía captada es mínimo (Tabla 3-15).

Tabla 3-15 - Desempeño de SUDS propuestos en la zona sur

Subcuenca	SUDS	Ingreso (mm)	Pérdidas por ETP	Pérdidas por inf.	Flujo superficial (salida)	Drenaje (salida)	Alm. inicial	Alm. final	Retención
Subc-5	Cuenca	364.85	0	0	0	0	0	364.85	100%
Subc-4	Cuenca	185.74	0	0	0	0	0	185.73	100%
Subc-11	Cuenca	231.29	0	5.42	0	0	0	231.26	100%
Subc-3	SCALL	12688.02	0	0	10588.02	0	0	2100	17%
Subc-11	SCALL	21903.27	0	0	19803.27	0	0	2100	10%

Subcuenca	SUDS	Ingreso (mm)	Pérdidas por ETP	Pérdidas por inf.	Flujo superficial (salida)	Drenaje (salida)	Alm. inicial	Alm. final	Retención
Subc-4	SCALL	29596.61	0	0	27496.61	0	0	2100	7%
Subc-6	SCALL	36970.63	0	0	34870.63	0	0	2100	6%
Subc-2	Techo Verde	92.14	0	0	0	87.33	0	4.81	5%
Subc-1	Techo Verde	92.14	0	0	0	87.34	0	4.8	5%
Subc-3	Techo Verde	92.14	0	0	0	87.34	0	4.8	5%
Subc-7	SCALL	47333.56	0	0	45233.56	0	0	2100	4%
Subc-10	SCALL	73643.12	0	0	71543.12	0	0	2100	3%
Subc-9	SCALL	81707.03	0	0	79607.03	0	0	2100	3%
Subc-8	SCALL	82665.93	0	0	80565.93	0	0	2100	3%
Subc-5	SCALL	149817.16	0	0	147717.16	0	0	2100	1%

Se requiere una reestructuración del sistema de drenaje convencional existente a fin de redistribuir las áreas de influencia y disminuir la cantidad de agua que cada boca de tormenta recibe, además de cambiar los diámetros del sistema, el cual se encuentra considerablemente rebasado. Por otro lado, es importante considerar que toda esta evaluación se está realizando bajo el supuesto de que el sistema funciona como nuevo, lo cual en la realidad es inexacto ya que como se pudo observar en campo, muchos bocatormentas se encuentran totalmente obstruidos por sedimentos y basura.

En cuanto al impacto de la infraestructura verde en la gestión de agua pluvial, se observó que los sistemas propuestos tienen diferentes niveles de efectividad que van del 1 al 100% para la reducción de escorrentía, aquellos que se basan en la retención de grandes cantidades de agua son los que tienen un mejor desempeño en la reducción de la escorrentía urbana, no obstante, es el esquema completo (incluyendo sistemas de captación y conducción) el que trae una mayor cantidad de beneficios. Una alternativa al diseño actual puede ser la propuesta de un tren de tratamiento que conecte distintos SUDS, por dar un ejemplo, que un canal vegetal capte el agua en una avenida y la transporte a una Cuenca de retención, que a su vez conduzca el agua retenida a un humedal artificial que le dé un tratamiento antes de descargarla en alguno de los colectores que conducen al tanque Tenorio.

4 ANÁLISIS DEL COSTO Y BENEFICIOS SOCIOECONÓMICOS Y AMBIENTALES DEL SISTEMA PROPUESTO

4.1 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE SUDS

4.1.1 Catálogo de conceptos y precios unitarios

Para realizar el análisis de precios unitarios y catálogo de conceptos se utilizó la plataforma Prisma Master® (Figura 4-1), un portal desarrollado en México para la creación de bases de datos de presupuestos y precios unitarios en la nube con actualización de costos de insumos y tasas e indicadores nacionales.

The screenshot displays the Prisma Master 2.0 interface. At the top, the project name 'SUDS Pozos' and the data source 'PRISMA Base de Dato...' are visible. The main area is titled 'Hoja del Presupuesto' and shows a table with 7 rows of items. A summary bar at the top right indicates 'IMPORTE a COSTO DIRECTO \$ 0.00'. Below the table, there are navigation and action buttons like 'Exportar a Excel', 'Exportar a PDF', and 'Seleccionar todo'. The footer contains copyright information for Prisma Master and links for 'Acerca', 'Aviso de Privacidad', and 'Términos y Condiciones'.

Fila	Partida	Subpartida	Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Directo	Importe	%
1			06.0101.0101.00	Excavación en cepa o zanja con herramienta de mano en material seco	m3	0.0000	90.56	0.00	0.00
2			30.0121.0101.00	Acarreo en camión 1er km material abundado (capacidad de 6 m3), incluye	m3	0.0000	81.26	0.00	0.00
3			30.0121.0103.00	Acarreo en camión km subsecuente (capacidad de 6 m3)	m3	0.0000	3.34	0.00	0.00
4			06.0302.0117.00	Consolidación de fondos en capas de 20 cm, compactado con compactador	m3	0.0000	52.62	0.00	0.00
5			07.0302.0102.00	Concreto hidráulico hecho en obra vaciado con carretilla y botes en	m3	0.0000	3,819.98	0.00	0.00
6			17.6701.0103.00	Cama de grava en cepas para tubería	m3	0.0000	763.72	0.00	0.00
7			08.0406.0112.00	Piso de adoquín de concreto en color de 10 x 20 x 8 cm asentado sobre cama de	m2	0.0000	702.08	0.00	0.00

Figura 4-1 - Interfaz de usuario de Prisma Master® 2.0

Se utilizó la versión gratuita, por lo que la cantidad de conceptos con los que se puede crear fue limitada, sin embargo, se utilizaron los conceptos ya existentes en la base de datos general de Prisma Master® la cual está expresada en costos para Ciudad de México.

Tabla 4-1 - Total de presupuesto para Cuencas de retención

Cuencas de retención						
Fila	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Directo		Importe
1	Excavación en cepa o zanja con herramienta de mano en material seco tipo II, zona A, profundidad de 0.00 m a 2.00 m, incluye afine de taludes y fondo	m3	42,603.00	\$ 142.31	\$	6,062,832.93
2	Acarreo en camión de material mixto, primer kilómetro con carga mecánica (cargador frontal)	m3	53,253.75	\$ 18.80	\$	1,001,170.50
3	Acarreo en camión de material mixto por kilómetro subsecuente en zona urbana con tráfico mediano, velocidad promedio de 40 km/h	m3	53,253.75	\$ 6.37	\$	339,226.39
4	Descarga por volteo de cualquier tipo de material transportado en camión	m3	53,253.75	\$ 17.95	\$	955,904.81
5	Suministro y tendido de malla geotextil para aislamiento de terreno natural. Incluye: materiales, mano de obra y herramienta	m2	22,918.17	\$ 159.40	\$	3,653,156.30
6	Tendido y acomodado de tierra vegetal en una capa de 20 cm de espesor	m3	4,644.79	\$ 600.92	\$	2,791,147.21
7	Concreto hidráulico hecho en obra vaciado con carretilla y botes en elementos de cimentación, f'c=150 kg/cm2, resistencia normal (a los 28 días) agregado máximo de 19 mm (3/4"), revenimiento de 10 cm +/- 2.5 cm, incluye curado con agua durante 28 días	m3	24.97	\$ 2,810.52	\$	70,178.68
8	Concreto hidráulico hecho en obra vaciado con carretilla y botes, f'c=200 kg/cm2, resistencia normal (a los 28 días) agregado máximo de 19 mm (3/4"), revenimiento de 10 cm +/- 2.5 cm, incluye curado con agua durante 28 días	m3	297.02	\$ 3,422.02	\$	1,016,408.38
9	Cimbra común en dentellones	m2	2,702.15	\$ 367.31	\$	992,526.72
10	Piso de adoquín de concreto en color de 10 x 20 x 8 cm asentado sobre cama de arena, en 5 cm de espesor	m2	5,522.53	\$ 702.66	\$	3,880,460.93
11	Suministro, siembra, abono y mantenimiento durante 30 días de arbusto de Trueno de 1.00 m, no incluye tierra vegetal	pieza	600.00	\$ 30.28	\$	18,168.00
12	Suministro, siembra, abono y mantenimiento durante 30 días de árbol de Casuarina de 2.00 m, no incluye tierra vegetal	pieza	45.00	\$ 184.15	\$	8,286.75
13	Suministro, siembra, abono y mantenimiento durante 30 días de árbol de Fresno de 5.00 m, no incluye tierra vegetal	pieza	75.00	\$ 312.22	\$	23,416.50
14	Suministro, siembra, abono y mantenimiento durante 30 días de árbol de Colorín de 4.00 m, no incluye tierra vegetal	pieza	30.00	\$ 279.40	\$	8,382.00
				Total	\$	20,821,266.10

Tabla 4-2 - Total de presupuesto para SCALLS

Sistemas de Captación de Agua de Lluvia						
Fila	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Directo		Importe
1	Limpieza de terreno de materiales de construcción con herramienta de mano, no incluye acarreo	m2	107,799.31	\$	7.90	\$ 709,319.46
2	Tubo de PVC sanitario liso de 100 mm, incluye suministro y colocación	m	376.00	\$	243.31	\$ 91,484.56
3	Codo de PVC sanitario de 45 grados con campana de 100 mm, incluye suministro y colocación	pieza	94.00	\$	139.66	\$ 13,128.04
4	Codo de PVC sanitario de 87 grados para cementar de 100 mm, incluye suministro y colocación	pieza	94.00	\$	231.64	\$ 21,774.16
5	Piso de concreto hidráulico premezclado f'c=200 kg/cm ² , armado, de 10 cm de espesor, reforzado con malla de acero electrosoldada 6 x 6-10/10, resistencia normal (a los 28 días), agregado máximo de 19 mm (3/4"), revenimiento de 10 cm +/- 2.5 cm, refuerzo con varillas corrugadas de acero alta resistencia fy=6000 kg/cm ² número 2.5 (5/16") varilla 2.5 a cada 25 cm, acabado pulido	m2	356.04	\$	643.03	\$ 228,944.40
6	Suministro y colocación de tanque cisterna de 10,000 litros	pieza	129.00	\$	49,812.19	\$ 6,425,772.51
Total				\$		7,490,423.13

Tabla 4-3 - Total de presupuesto para pavimentos permeables

Pavimentos permeables						
Fila	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Directo		Importe
1	Excavación en cepa o zanja con herramienta de mano en material seco tipo I, zona A, profundidad de 0.00 m a 2.00 m, unidad medida en banco, incluye afine de taludes y fondo	m3	7,713.91	\$	90.56	\$ 698,571.24
2	Acarreo en camión 1er km material abundado (capacidad de 6 m3), incluye carga a maquina	m3	9,642.38	\$	81.26	\$ 783,539.90
3	Acarreo en camión km subsecuente (capacidad de 6 m3)	m3	9,642.38	\$	3.34	\$ 32,205.55
4	Consolidación de fondos en capas de 20 cm, compactado con compactador manual de placa vibratoria	m3	3,856.95	\$	52.62	\$ 202,952.84
5	Concreto hidráulico hecho en obra vaciado con carretilla y botes, f'c=200 kg/cm ² , resistencia normal (a los 28 días) agregado máximo de 19 mm (3/4"), revenimiento de 10 cm +/- 2.5 cm, incluye curado con agua durante 28 días	m3	93.60	\$	3,819.98	\$ 357,550.13
6	Cama de grava	m3	3,008.42	\$	763.72	\$ 2,297,592.78
7	Piso de adoquín de concreto en color de 10 x 20 x 8 cm asentado sobre cama de arena, en 5 cm de espesor	m2	15,427.81	\$	702.66	\$ 10,840,504.97

Total \$ **15,212,917.41**

Tabla 4-4 - Total de presupuesto para canales vegetales

Canal vegetal						
Fila	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Directo		Importe
1	Excavación en cepa o zanja con herramienta de mano en material seco tipo I, zona A, profundidad de 0.00 m a 2.00 m, unidad medida en banco, incluye afine de taludes y fondo	m3	214.68	\$	90.56	\$ 19,441.42
2	Acarreo en camión 1er km material abundado (capacidad de 6 m3), incluye carga a maquina	m3	268.35	\$	81.26	\$ 21,806.12
3	Acarreo en camión km subsecuente (capacidad de 6 m3)	m3	268.35	\$	3.34	\$ 896.29
4	Suministro y tendido de malla geotextil para aislamiento de terreno natural. Incluye: materiales, mano de obra y herramienta	m2	3,661.29	\$	159.40	\$ 583,609.63
5	Consolidación de fondos en capas de 20 cm, compactado con compactador manual de placa vibratoria	m3	915.32	\$	52.62	\$ 48,164.27
6	Tendido y acomodado de tierra vegetal en una capa de 20 cm de espesor	m3	4,644.79	\$	600.92	\$ 2,791,147.21
7	Concreto hidráulico hecho en obra vaciado con carretilla y botes, f'c=200 kg/cm2, resistencia normal (a los 28 días) agregado máximo de 19 mm (3/4"), revenimiento de 10 cm +/- 2.5 cm, incluye curado con agua durante 28 días	m3	51.12	\$	3,819.98	\$ 195,277.38
8	Cimbra común en dentellones	m2	2,702.15	\$	367.31	\$ 992,526.72
				Total	\$	4,652,869.03

Tabla 4-5 - Total de presupuesto para trincheras de infiltración

Trincheras de infiltración						
Fila	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Directo		Importe
1	Excavación en cepa o zanja con herramienta de mano en material seco tipo I, zona A, profundidad de 0.00 m a 2.00 m, unidad medida en banco, incluye afine de taludes y fondo	m3	77.81	\$	90.56	\$ 7,046.64
2	Acarreo en camión 1er km material abundado (capacidad de 6 m3), incluye carga a maquina	m3	97.26	\$	81.26	\$ 7,903.74
3	Acarreo en camión km subsecuente (capacidad de 6 m3)	m3	97.26	\$	3.34	\$ 324.86
4	Suministro y tendido de malla geotextil para aislamiento de terreno natural. Incluye: materiales, mano de obra y herramienta	m2	155.62	\$	159.40	\$ 24,805.83
5	Relleno con grava graduada	m3	101.16	\$	878.28	\$ 88,842.57
				Total	\$	128,923.64

Tabla 4-6 - Total del presupuesto para techos verdes

Techos verdes					
Fila	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Directo	Importe
1	Limpieza de terreno de materiales de construcción con herramienta de mano, no incluye acarreo	m2	19,530.00	\$ 7.90	\$154,208.88
2	Impermeabilización de azotea con impermeabilizante a base de llantas recicladas calidad 10 años a dos manos. Incluye: sellador, malla, materiales, mano de obra y herramienta.	m2	19,530.00	\$ 278.66	\$5,442,231.46
3	Suministro y tendido de malla geotextil para aislamiento de terreno natural. Incluye: materiales, mano de obra y herramienta	m2	23,436.00	\$ 444.14	\$10,408,865.04
4	Tendido y acomodado de tierra vegetal en una capa de 20 cm de espesor	m3	2,441.25	\$ 600.92	\$1,466,995.95
5	Suministro, siembra, abono y mantenimiento durante 30 días de pasto alfombra en rollo, no incluye tierra vegetal.	m2	19,530.00	\$ 57.30	\$1,119,069.00
Total					\$ 18,591,370.33
Total del presupuesto					\$ 66,897,769.63

4.1.2 Presupuesto final de obra

De los costos analizados se puede obtener la siguiente información general del presupuesto (Tabla 4-7) para todo el proyecto de infraestructura verde, donde se puede observar donde la mayor parte se concentra en las cuencas de retención, las que tienen un mayor impacto en la reducción de escurrimientos y en los pavimentos permeables, esto debido a los elevados costos de movimientos de terracerías (excavaciones, acarreos, rellenos, etc.).

Tabla 4-7 - Totales generales del presupuesto

Totales	Costo Directo
Cuencas de retención	\$ 20,821,266.10
SCALL	\$ 7,490,423.13
Pavimentos permeables	\$ 15,212,917.41
Canal vegetal	\$ 4,652,869.03
Trincheras de infiltración	\$ 128,923.64
Techos verdes	\$ 18,591,370.33
Total del presupuesto	\$ 66,897,769.63

Además, se puede observar que el costo de los techos verdes es igualmente elevado para la cantidad de hogares que se verían beneficiados, y que además es un costo muy elevado como para que una familia en situación vulnerable pueda dedicar recursos a su implementación y

sobre todo para el mantenimiento del mismo ya que aunque el presupuesto considera un mantenimiento por 30 días, se requiere tener un riego constante en el periodo de estiaje anual sobre todo en una región semiárida como lo es San Luis Potosí.

A partir del presupuesto y con las extensiones de cada SUDS se pueden generar costos paramétricos (Figura 4-2), en este caso un costo por metro cuadrado de infraestructura, donde se puede observar que el menor costo está en los SCALL y el mayor en los canales vegetales, sin embargo, en el caso de los canales vegetales su costo elevado y su bajo impacto en la reducción de escurrimientos no justifica su implementación si se considera únicamente el beneficio en una menor de cantidad de agua en las calles. Algo similar ocurre con los techos verdes, que, aunque tienen un costo relativamente bajo, su impacto en la escorrentía es bajo igualmente.



Figura 4-2 - Costos paramétricos para cada SUDS

4.2 ESTIMACIÓN DE BENEFICIOS SOCIALES Y AMBIENTALES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SUDS

4.2.1 Determinación del valor ambiental del área

En cualquier evaluación económica basada en capitales se requiere conocer la línea base para un proyecto de inversión, la cual, representará el valor del área si el proyecto no fuera implementado. En el caso de este proyecto, para establecer la línea base se utilizó la plataforma i-Tree® Canopy, la cual utiliza imágenes satelitales y un método de Clasificación Supervisada para determinar distintas áreas que representarán el arbolado de una zona de

interés, una vez que la herramienta conoce la extensión de arbolado le asigna un valor económico en términos de reducción de emisiones y retención de carbono y otros contaminantes, obteniendo así el valor del área.

Para este caso se definieron 3 áreas delimitadas por las subcuencas utilizadas para evaluar el drenaje pluvial convencional (Figura 4-3), las cuales fueron digitalizadas en QGIS. La razón por la que se usaron estas tres áreas en lugar de una sola del tamaño de la Delegación es para reducir tiempos de cálculo y debido a que son estas áreas urbanas las que serán beneficiadas directamente por la implementación de los SUDS.

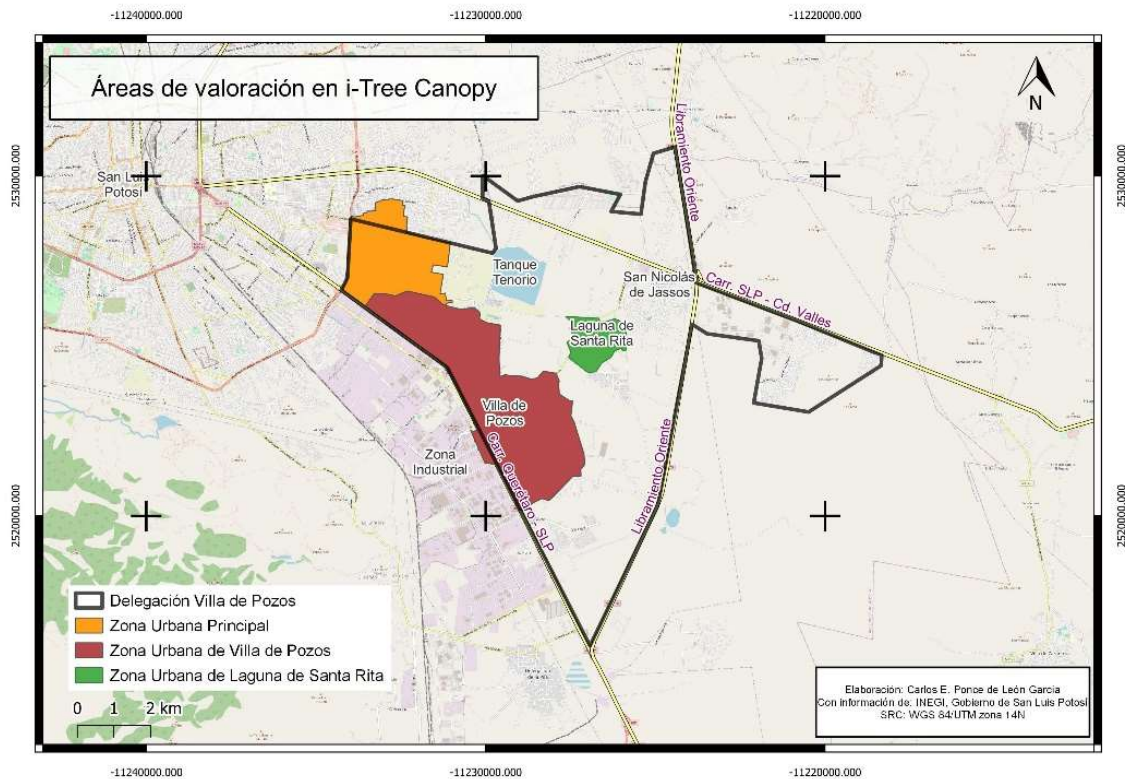


Figura 4-3 - Áreas de valoración para i-Tree®

Para cada área se reconocieron al menos 100 puntos de muestra para la clasificación supervisada, donde se reconocieron puntos de arbolado (identificando las copas de los árboles), pastizal (donde se observa vegetación de baja altura), suelo descubierto (áreas donde se observa escasa vegetación) y área impermeable (edificaciones, estacionamientos y vialidades) (Figura 4-4).

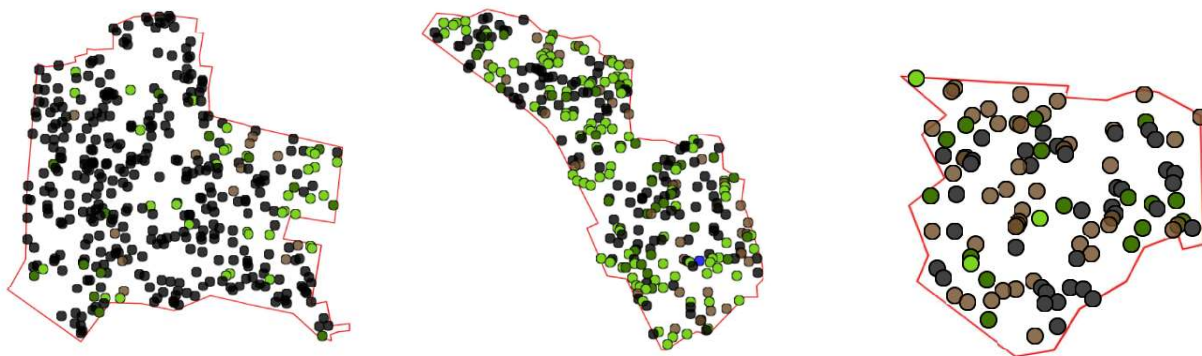


Figura 4-4 - Puntos de muestra para las Zonas Urbanas Principal, de Villa de Pozos y de Laguna de Santa Rita

i-Tree[®] Canopy realiza algunas estimaciones para determinar los contaminantes captados por la zona analizada basada en trabajos del USDA Forest Service y en adaptaciones realizadas por The Davey Tree Expert Company (Ellingsworth et al., 2017) y se les asigna de igual forma un valor convertido a la moneda nacional mexicana (Tabla 4-8 y Tabla 4-9).

Tabla 4-8 - Proporciones empleadas en i-Tree[®] para la estimación de carbono

Carbono	(t/ha/año)	CO2 equivalente (t/ha/año)	\$MXN/ton
Retenido	3.06	11.22	3'873.42
Almacenado	76.85	281.78	1'056.39

Tabla 4-9 - Proporciones empleadas en i-Tree[®] para la estimación de contaminantes

Contaminante	Kg/ha/año	\$ MXN/kg/año
CO	1.011	1.93
NO ₂	5.511	0.61
O ₃	54.886	3.19
SO ₂	3.473	0.17
PM _{2.5}	2.667	135.71
PM ₁₀	18.385	6.91

Para cada una de las zonas se calculó el carbono retenido, carbono almacenado, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono, dióxido de azufre, partículas menores a 2.5 micrones y partículas entre 2.5 y 10 micrones removidas del ambiente y a cada contaminante se le asignó un valor total con un error estándar en función de la cantidad de puntos de muestreo.

La primer área analizada, y la más fuertemente urbanizada, obtuvo un valor acumulado de \$5,757,156.00 MXN (Figura 4-5), en este caso la vegetación detectada por el algoritmo proviene principalmente de parques, camellones y jardines en la zona.

La segunda área valuada, de mayor tamaño y con características compartidas entre zona urbana y rural, tiene un valor monetario de \$42,182,767.00 MXN (Figura 4-5), la vegetación identificada por i-Tree® proviene de grandes extensiones de suelo sin explotar adenañas a la autopista, áreas de cultivo, parques, camellones y jardines.

La tercer área, más pequeña y con características rurales, tiene un valor de \$8,492,503.00 MXN (Figura 4-5), la vegetación valuada proviene principalmente de grandes extensiones de suelo sin aprovechamiento de una escuela, una iglesia y un área deportiva.

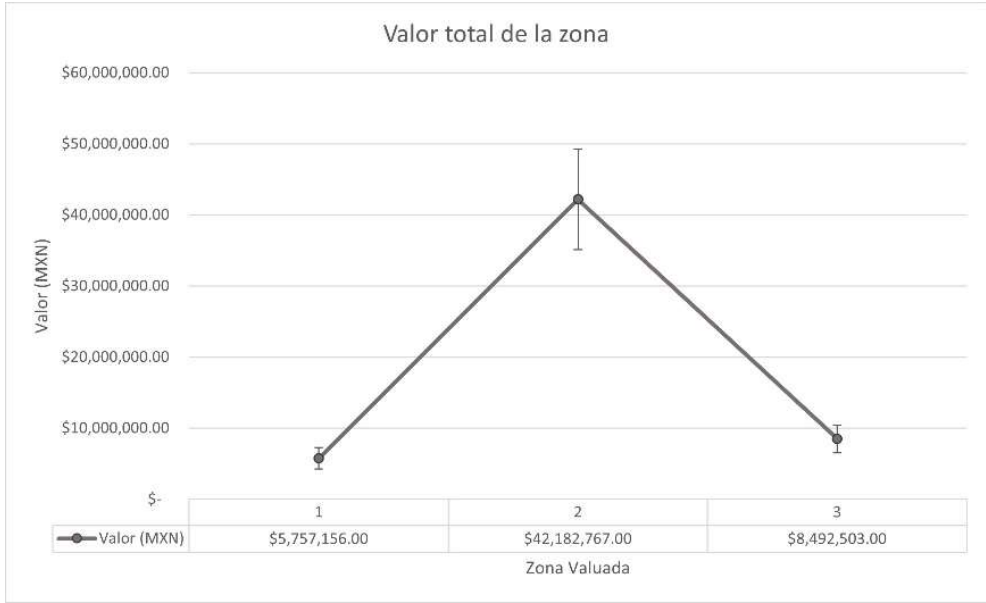


Figura 4-5 - Valor total de cada zona urbana

Con estas estimaciones se le puede dar un valor que sirva como línea base para la evaluación realizada en B£ST con un valor de \$56'432'426.00 MXN o £ 2'290'277.00 considerando £1.00 GBP = \$24.64 MXN (al 13/07/2022).

4.2.2 Evaluación y monetización de beneficios con B£ST

La herramienta para estimación de beneficios (Benefits Estimation Tool - B£ST) es un medio de apoyo diseñado por la Asociación de Investigación en la Industria de la Construcción (CIRIA) para funcionar como apoyo en la evaluación y monetización de los beneficios financieros, sociales y ambientales de la implementación de Infraestructura Verde – Azul permitiendo que los usuarios y partes interesadas entender los beneficios de la infraestructura más allá de la reducción de inundaciones y sustentar rutas de financiamiento e inversión (Horton et al., 2019).

Para la aplicación de esta herramienta se deben seguir 4 pasos principales:

1. Confirmación de que la evaluación es requerida y apropiada; Estableciendo las razones y puntos clave para realizar la evaluación.
2. Filtrado y evaluación cualitativa; Identificando el tipo, tamaño y escala espaciotemporal de la evaluación, así como los probables beneficios y su potencial significancia.
3. Evaluación de beneficios; Ayuda a cuantificar y monetizar los beneficios más significativos del esquema, considerando escala, ubicación, tiempo, etc.
4. Resumen y presentación de resultados; Los resultados de la evaluación se presentan concentrando las diferentes categorías de beneficios a través del tiempo.

La herramienta evalúa 18 categorías de beneficios monetizados y no monetizados (Tabla 4-10) de acuerdo con los servicios ecosistémicos que presenta la propuesta de Infraestructura Verde – Azul (I V-A).

Tabla 4-10 - Beneficios evaluados en B£ST

#	Categoría	Descripción	Monetizado	Servicios ecosistémicos
1	Calidad del Aire	Impacto sanitario por la contaminación del aire	Si	Regulatorios
2	Amenidad	Atractivo del área	Si	Culturales
3	Desempeño de elementos	Reducción del flujo a sistemas combinados	Si	Abastecimiento
4	Biodiversidad y ecología	Valor ecológico	Si	Apoyo

#	Categoría	Descripción	Monetizado	Servicios ecosistémicos
5	Sensación térmica	Enfriamiento o aislamiento en verano/invierno	Si	Regulatorios
6	Reducción y retención de carbono	Operacional (reducción en consumo energético), incorporado (reducción en consumo de agua), retenido (plantación)	Si	Regulatorios
7	Crimen	Contra la propiedad y personales	No	Abastecimiento/ Culturales
8	Crecimiento económico	Negocios, trabajos, productividad	No	Abastecimiento
9	Educación	Mejores oportunidades educativas en materia ecológica	Si	Culturales
10	Posibilidad de desarrollo	Impulso a la vivienda u otros desarrollos	Si	Abastecimiento
11	Inundación	Daño personal o a la propiedad	Si	Regulatorios/ Culturales
12	Salud	Física, emocional, mental	Si	Culturales
13	Reducción de ruido	Atenuación del ruido relacionado con el tráfico	Si	Culturales
14	Recreación	Involucramiento en actividades recreativas específicas	Si	Culturales
15	Turismo	Atractivo de sitios turísticos	No	Abastecimiento

#	Categoría	Descripción	Monetizado	Servicios ecosistémicos
16	Atenuación de tráfico	Riesgo de accidentes de tráfico u oportunidades de recreación relacionadas con la calle	Si	Culturales
17	Calidad del agua	Mejora en la calidad del agua superficial	Si	Regulatorios/ Culturales
18	Cantidad de agua	Recarga de agua subterránea, cosecha de agua de lluvia, etc.	Si	Abastecimiento/ Regulatorios

Sin embargo, estos beneficios son mejor evaluados en esquemas más grandes o mayor cantidad de elementos. Esquemas de menor tamaño igualmente tendrán beneficios, aunque serán limitados.

Cuando se utiliza la herramienta se debe estar consciente de que se deberán hacer asunciones de acuerdo con la información disponible, el proceso de diseño y la confianza en dicha información, de cualquier forma, B&ST también considera estas incertidumbres y permite asignarle un nivel de confianza a los datos ingresados.

4.2.2.1 Confirmación de que la evaluación es requerida

Siendo este un proyecto al nivel de visión y propuesta se requiere una forma de respaldar su presentación hacia una parte interesada, eso se realizará a través de una evaluación de los costos y beneficios que reflejaría el proyecto.

La evaluación de beneficios permitirá tener información con la que sustentar una propuesta que aporte a un desarrollo sustentable de la zona, mejorando la gestión de escorrentías urbanas, reduciendo inundaciones, mejorando la calidad del aire proveyendo un mayor capital natural además de que mejorará el aspecto y posibilidades de convivencia para la población beneficiada por el proyecto.

Además, con esta evaluación de beneficios será posible presentar el proyecto a instancias internacionales que otorgan fondos para la implementación de infraestructura verde y

soluciones basadas en la naturaleza como el Grupo Institucional de Inversores en Cambio Climático (IIGCC) o la Red de Inversores de Riesgo Climático (INCR) empleando bonos verdes (Merk et al., 2012).

4.2.2.2 Filtrado y evaluación cualitativa

Se establecen el tipo, tamaño y escala de la Infraestructura Verde-Azul que será implementada y la escala espacial-temporal de la evaluación. Se identifican los beneficios más probables y se da un indicador de su potencial significancia.

Es necesario hacer un filtrado de los beneficios que es más probable que reporte el esquema de SUDS propuesto (Tabla 4-11) para de esta manera obtener resultados más precisos en cuanto a los beneficios que reportará.

Tabla 4-11 - Filtrado de beneficios evaluados en B&ST para el esquema de SUDS

#	Categoría	Evaluada en el esquema SUDS propuesto	Justificación
1	Calidad del Aire	Si	La cantidad de árboles propuestos y espacios verdes aportarán a mejorar la calidad del aire
2	Amenidad	Si	La renovación de espacios públicos atraerá visitantes locales
3	Desempeño de elementos	No	Se requiere información de desempeño de los sistemas de abastecimiento privados
4	Biodiversidad y ecología	Si	La cantidad de árboles propuestos y espacios verdes atraerán especies locales
5	Sensación térmica	No	No se contempla la implementación de techos verdes en el esquema propuesto
6	Reducción y retención de carbono	Si	La cantidad de árboles propuestos y espacios verdes aportarán a aumentar la captación de carbono
7	Crímen	No	Se requieren estudios que comparen la relación de índices

#	Categoría	Evaluada en el esquema SUDS propuesto	Justificación
8	Crecimiento económico	No	delictivos con áreas públicas en la ciudad Se requieren estudios que comparen la relación de espacios públicos con el desarrollo económico de la ciudad
9	Educación	Si	Existen diversos planteles educativos en la zona de estudio Se requieren estudios que comparen el valor de las propiedades y su variación respecto a espacios públicos
10	Posibilidad de desarrollo	No	Existe información sobre los escurrimientos e impactos sobre la infraestructura pública y privada
11	Inundación	Si	La renovación de espacios públicos dará una nueva perspectiva a la zona y valor para la salud mental
12	Salud	Si	No existen estudios que detallen los niveles de ruido en la ciudad
13	Reducción de ruido	No	La renovación de espacios públicos atraerá visitantes locales Dentro del esquema no se consideran espacios destinados al turismo
14	Recreación	Si	Dentro del esquema no se consideran elementos que aporten al manejo del tráfico
15	Turismo	No	Existe información referente a los contaminantes que arrastra la escorrentía urbana pero el esquema propuesto no impactará
16	Atenuación de tráfico	No	
17	Calidad del agua	No	

#	Categoría	Evaluada en el esquema SUDS propuesto	Justificación
18	Cantidad de agua	No	en la calidad de agua al no incluir elementos como estanques permanentes o humedales Dentro del esquema no se consideran elementos que propicien la infiltración de agua de lluvia

4.2.2.3 Evaluación de beneficios

Se cuantifican y monetizan los beneficios más significativos de la Infraestructura Verde-Azul tomando en cuenta la escala, ubicación, periodo, etc. También se consideran los beneficios no monetizados.

Para cada una de las categorías se requiere información mínima para ser evaluada, en caso de no existir lo mejor es no evaluarla (Tabla 4-12).

Tabla 4-12 - Beneficios evaluados por B&ST y la información mínima requerida para ello

#	Categoría	Información mínima requerida	Fuente recomendada
1	Calidad del Aire	Tamaño/tipo de componentes verdes como árboles y techos verdes	Instancias gubernamentales de ecología, estudios científicos
2	Amenidad	Número/tipo de propiedades habitacionales/comerciales y número de personas afectadas por el proyecto	INEGI
3	Desempeño de elementos	Cambio en el flujo o uso de energía	Autoridad competente en el manejo del agua
4	Biodiversidad y ecología	Cambio en el tamaño/tipo de espacios verdes o azules	Planes locales de manejo de arbolado o espacios públicos
5	Sensación térmica	Área de techos verdes o cantidad de arboles	Planes de manejo de hábitats
6	Reducción y retención de carbono	Número y tipo de arboles	Planes de manejo de carbono
7	Crimen	Estimación cualitativa no profesional de impactos potenciales	Evaluaciones del cambio en índices delictivos

#	Categoría	Información mina requerida	Fuente recomendada
8	Crecimiento económico	Estimación cualitativa no profesional de impactos potenciales	Evaluaciones de valor añadido, creación de empleos, productividad, etc.
9	Educación	Número de niños beneficiados o visitas educativas	Informes de actividades escolares y programas educativos
10	Posibilidad de desarrollo	Gastos en infraestructura evitados	Plan local de desarrollo, planes de manejo de lluvia
11	Inundación	Cantidad de edificios o personas beneficiadas	Evaluación de riesgos por inundación
12	Salud	Número de hogares y personas beneficiadas	Planes de manejo de salud
13	Reducción de ruido	Tipo/tamaño de componentes verdes del proyecto, número de arboles	Estudios de manejo de contaminación auditiva
14	Recreación	Cambio en el número de visitas y tipo de actividades	Estudios sobre el uso de espacios públicos
15	Turismo	Estimación cualitativa no profesional de impactos potenciales	Evaluaciones del cambio en el número de visitantes
16	Atenuación de tráfico	Estimación cualitativa no profesional de impactos potenciales	Evaluaciones del cambio en movimientos vehiculares, tipo de transportes, número de accidentes de tráfico
17	Calidad del agua	Calidad del agua actual y proyectadas, dimensiones del cuerpo de agua beneficiado	Planes de manejo de contaminantes y de cuerpos de agua urbanos
18	Cantidad de agua	Volumen de agua infiltrada, número de propiedades domésticas y consumos	Estudios de aguas subterráneas, estudios de consumo de agua

4.2.2.3.1 Calidad del aire

Para la estimación del beneficio en términos de calidad del aire B&EST considera dos caminos.

1. Partiendo desde un estudio de impacto sobre la calidad del aire (AQ1)
2. Estimando el impacto en la calidad del aire sin contar con estudios previos (AQ2)

Para la realización de un estudio sobre el impacto que tendría el esquema se recomienda la implementación de la herramienta i-Tree® Eco, sin embargo, esta herramienta requiere contar con un inventariado detallado de los árboles de la zona de estudio. Como esta información no

se ha generado se ingresarán únicamente el número de árboles y el tamaño esperado que tengan al estar completamente desarrollados.

La fórmula mostrada es la utilizada por la herramienta para evaluar la categoría:

Reducción de contaminantes

$$= (\text{número de árboles}) * (\text{nivel de remoción de contaminantes promedio})$$

BEST utiliza un promedio de 40 años para el cálculo de la remoción de contaminantes para simplificar el cálculo, además la reducción de contaminantes es estimada en términos de toneladas por año. En este sentido los desarrolladores se basaron en un estudio presentado por la USDA Forest Service para asignar la captura anual de contaminantes de acuerdo con 3 categorías de tamaño de árbol (McPherson et al., 2002), además se considera la retención ofrecida por techos verdes (US EPA, 2014) (Tabla 4-13).

Tabla 4-13 - Valores de retención base de contaminantes por tamaño del árbol (McPherson et al., 2002)

Tamaño	Parámetro de calidad del aire	Retención anual promedio (Kg/árbol)
Chico	NO ₂	0.0363
	SO ₂	0.0136
	O ₃	0.0635
	PM10	0.0680
Mediano	NO ₂	0.0771
	SO ₂	0.0317
	O ₃	0.1225
	PM10	0.1315
Grande	NO ₂	0.1270
	SO ₂	0.0454
	O ₃	0.1950
	PM10	0.2041
Techo Verde	NO ₂	23.29 Kg/ha
	SO ₂	19.82 Kg/ha
	O ₃	44.92 Kg/ha
	PM10	6.49 Kg/ha

Para el caso de la asignación de valores económicos a cada uno de estos contaminantes se utiliza como base la metodología propuesta por el gobierno de Reino Unido en materia de

calidad del aire, el cual se basa a su vez en la aproximación del costo de daños (Tabla 4-14), por ejemplo el daño a la salud evitado por la reducción de contaminantes (Powell et al., 2019).

Tabla 4-14 - Valor económico asignado para cada parámetro de calidad del aire

Parámetro	Valor en £/ton/año (Powell et al., 2019)			Factor de Conversión PM2.5/PM10
	Mínimo	Medio	Máximo	
NOx (transporte)	980	10,699	40,896	
NOx (industrial)	593	5,671	21,070	
NOx (doméstico)	1,229	13,950	53,711	
SOx	1,491	6,273	17,861	
NH3	1,133	6,046	18,867	
PM (transporte)	42,713	203,331	625,927	0.673
PM (industrial)	20,679	95,847	308,503	0.534
PM (doméstico)	18,171	85,753	247,526	0.977

Para estos valores es necesario establecer un nivel de confianza el cuál dependerá en el probable impacto que tendría el esquema en la calidad del aire, por ejemplo, si el área ya está fuertemente vegetada y el impacto sería bajo, el nivel de confianza será igualmente reducido, por el contrario, si el proyecto beneficiará a la población de forma muy notable, el nivel de confianza será elevado.

Para este caso de estudio se determinó el área de intervención sumando el área de todos los polígonos considerados para SUDS con infraestructura verde (Figura 4-6) (techos verdes, canales y cuencas de retención) y un estimado de la cantidad de árboles que se plantarían como parte de la intervención (Figura 4-7).

SECTION AQ2 - use this section to estimate the impact of the proposals

Proposed option

Vegetative interventions excluding trees

Information taken from SuDS Used Sheet for the types of SuDS below	
Green roof intensive	0 ha
Green roof extensive	0 ha
New basins (total incl. surrounding)	2.4518 ha
Area of other interventions e.g. raingardens, swales	0.3661 ha
Total contributing vegetative interventions area	2.8179 ha

Select vegetation pollutant removal levels (tonnes/year/ha)	
SO2	0.01982299
NO2	0.023289572
O3	0.04491909
PM-10	0.006493738
CO	

GENERAL NOTES

Default values shown as single value available
 Default values shown as single value available
 Default values shown as single value available
 Default values shown as single value available

Figura 4-6 - Parámetros ingresados para cuantificar beneficios en calidad del aire (color rosa)

New trees planted

Tree size	Tree type (small)	Tree type (medium)	Tree type (large)	GENERAL NOTES
	Tree type (small)	Tree type (medium)	Tree type (large)	
Numbers	45	75	30	Size of tree (species) when it has matured Distribute the total number of trees across the size range
Default tree pollutant removal levels from ranges (tonnes/year/tree): Low, Central, High, User defined	SO2	0.000013608	0.000031752	0.00004536 Default values shown as single value available
	NO2	0.000036288	0.000077112	0.000127008 Default values shown as single value available
	O3	0.000063504	0.000122472	0.000195048 Default values shown as single value available
	PM-10	0.00006804	0.000131544	0.00020412 Default values shown as single value available
	CO			

Figura 4-7 - Parámetros ingresados para cuantificar beneficios en calidad del aire (color rosa)

4.2.2.3.2 Amenidad

Para la estimación del beneficio en términos de amenidad, B&EST considera dos caminos.

1. Partiendo desde un estudio de impacto sobre la amenidad de espacios públicos (AM1)
2. Estimando el impacto en la amenidad sin contar con estudios previos (AM2)

Para la cuantificación de beneficios se consideran a los componentes del esquema propuesto y la calidad del espacio que será creado comparado con las condiciones existentes. Adicionalmente se estimará la cantidad de habitantes que serán beneficiados por la mejora del espacio urbano, por ejemplo, el número de visitantes, hogares o propiedades comerciales que más probablemente observarán la mejoría (estando directamente frente a la intervención o a una distancia de 450 metros o una caminata de 5 minutos).

Para la valuación de beneficios se utilizaron estudios basados en la Voluntad de Pago y Valuación en los cuales se modelaron el impacto en los precios de propiedad cuando se implementa una mejora en el ambiente local (Tabla 4-15). Algunos de estos estudios han

encontrado que en Inglaterra el valor de las propiedades aumenta 5.4% por cada 100 metros de distancia de parques mejorados (en un radio de 500 metros).

Tabla 4-15 - Valuación de beneficios relacionados con la amenidad del espacio urbano

Contexto	Valor (2014)			Unidades	Indicaciones
	Bajo	Medio	Alto		
Creación o mejora de parques o espacios verdes comúnmente visitados		3.92 (Londres)			Usarse donde parques locales o espacios verdes son creados o mejorados significativamente.
		2.31 (Noreste)			
		2.20 (Noroeste)			
		2.54 (Medio este)			
		2.67 (Este Ing.)			
		2.66 (Medio oeste)			
		1.68 (Yorks y Humber)		£/pers/mes	
		2.23 (Sureste)			
		2.56 (Suroeste)			
		2.33 (Escocia)			
	2.41 (Wales)				
	2.33 (Irl. Norte)				
Mejoras en calles, incluyendo plantación de árboles	1.72 (árboles pequeños)	1.98 (árboles grandes)	2.46 (árboles grandes y jardineras)	£/pers/mes	Uso en proyectos de Infraestructura Verde-Azul en calles
Nuevos o mejores estanques	5.93	11.56	19.75	£/hogar/mes	Usarse solo en caso de nuevos estanques
Mejora de parques (hogares a <450 m)	Departamentos	Vivienda Unifamiliar Adosada	Vivienda Unifamiliar Aislada		
Parque local	7.92	9.44	9.62		Uso solo donde se crearán o mejoraran significativamente espacios urbanos y se beneficiará a hogares a 450 m
Parque urbano	7.54	2.93	19.97		
Espacio abierto	4.70	0.44	2.71	Incremento porcentual en el valor (%)	
Zona comercial	3	3	15		

Para este estudio se utilizará el valor de **9.44%** de incremento en el valor de hogares a 450 m por mejoras en parques locales.

En el caso de Villa de Pozos, el valor de propiedades domésticas varía entre 630 mil pesos y 7.5 millones de pesos, mientras que, en el municipio de San Luis Potosí, el precio promedio de vivienda es de **\$2,606,900.00** (£ 105,799.51) con un promedio de 160 m² de terreno (Propiedades.com, 2022), en este caso se consideran las casas en un radio de 450 metros de los sistemas de cuencas de retención, siendo un total de 18,037 casas (Figura 4-8).

Property price increase as a result of enhancements to parks

Average property price, £				Benefit, £ (one-off) before confidence	Confirm the confidence you have in the calculation method and valuation		Benefit, £ (one-off) after confidence
Detached	Other houses	Flats	Commercial		Quantity	Valuation (£)	
	105,799.51						
City public park enhancement	No. of detached houses < 450m from park			£	50%	75%	£
	No. of other houses < 450m from park						
	No. of flats < 450m from park						
Local public park enhancement	No. of detached houses < 450m from park			£ 180,144,064	50%	50%	£ 45,036,016
	No. of other houses < 450m from park	18,037					
	No. of flats < 450m from park						
Public open green space enhancement	No. of detached houses < 450m from park			£	50%	75%	£
	No. of other houses < 450m from park						
	No. of flats < 450m from park						
New / improved green space	No. of commercial properties overlooking new or improved green space		3%	£	50%	75%	£

Figura 4-8 - Parámetros ingresados para cuantificar beneficios en amenidad (color rosa)

4.2.2.3.3 Biodiversidad y ecología

Para la estimación del beneficio en términos de Biodiversidad y Ecología, B&ST considera dos caminos.

1. Partiendo desde un estudio de impacto sobre la Biodiversidad y Ecología (BE1)
2. Estimando el impacto en la Biodiversidad y Ecología sin contar con estudios previos (BE2)

Para ambas aproximaciones se presentan dos tablas en las que se establecen una línea base y el esquema propuesto, en el caso de que se trate de una modificación de un sitio ya existente se empleará únicamente la tabla de esquema propuesto.

Para la estimación de este beneficio únicamente se debe considerar el hábitat o tipo de ecosistema predominante en el área, en este caso de estudio, como no se cuentan con investigaciones en el área se hará una estimación usando la extensión en hectáreas de la intervención (Figura 4-9).

Para la valuación del beneficio en Biodiversidad y Ecológico se tiene un respaldo en estudios de Voluntad de Pago para crear o mejorar distintos tipos de hábitat (Tabla 4-16).

Tabla 4-16 - Valor para cada tipo de hábitat de acuerdo con la Voluntad de Pago

Tipo de hábitat dominante	Valor (2014)	Unidades
Márgenes arables	14.78	
Ciénegas	302.61	
Setos	117.01	
Cobertura de caliza	152.36	
Pastizales sobre caliza	23.85	
Pastizales en terreno ácido	6.25	
Brezal en tierras bajas	190.24	
Prados en tierras bajas	96.41	
Molinias	251.12	
Pastizales sobre caliza en tierras altas	58.43	£/ha/año
Prados en tierras altas	36.68	
Brezal en tierras altas	162.99	
Llanuras costeras	235.25	
Fangal	26.14	
Ciénegas elevadas	57.93	
Cañaverales húmedos	165.05	
Bosque nativo	268.62	
Campos arables	2.42	
Pastizales mejorados	36.34	

Sin embargo, aunque en la zona de estudio predomina el Matorral Xerófilo este tipo de hábitat no existe en Inglaterra se utilizará el hábitat más parecido posible, siendo este el Brezal de las tierras bajas.

Changes to biodiversity and ecology land use / type (1)

				Confirm the confidence you have in the calculation method and valuation				Present value before confidence applied	Present value after confidence applied
Option Description	Size of existing area or intervention (ha)	Select the type of area or intervention	Select the type of area or intervention	Quantity	Valuation (€)	Confirm the start and end year of the evaluation			
Baseline option	0	Lowland heath	£ 198.13	50%	75%	Start	End	€ -	£ -
Proposed option	2.4588	Lowland heath	£ 198.13	50%	75%	2022	2042	€ 4,538	£ 1,702
Difference								€ 4,538	£ 1,702

Figura 4-9 - Parámetros usados para estimar los beneficios en la biodiversidad y ecología (en rosa)

4.2.2.3.4 Reducción y retención de carbono

Para la estimación del beneficio en términos de reducción y retención de carbono, B&ST considera cuatro caminos.

1. Partiendo desde un estudio de impacto sobre la reducción y retención de carbono (CS1)
2. Se requiere de apoyo para evaluar la retención de carbono como parte de un esquema de reforestación (CS2)
3. Se requiere de apoyo para evaluar la retención de carbono como parte de un esquema de restauración de llanuras de inundación (CS3)
4. Se ha evaluado la cantidad de carbono en bosques y se requiere apoyo para monetizarlo (CS4)

Esta parte de la evaluación se ha basado en la herramienta i-Tree® para aproximar la cantidad de carbono retenido en diferentes tipos de árboles bajo diferentes condiciones.

- Árboles pequeños caducifolios; p.e. cereza silvestre, manzanos
- Árboles medianos caducifolios; p.e. sauces, espinos
- Árboles grandes caducifolios; p.e. abedules, álamos, abetos, etc.
- Coníferas; p.e. pinos, cipreses, etc.

Para cuantificar los beneficios se debe ingresar en la herramienta la cantidad y tamaño de árboles que contempla el esquema propuesto y para realizar la valuación del beneficio se toma una aproximación de precios de carbono en el Reino Unido el cuál se basa a su vez en el régimen de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea.

Para este caso de estudio se consideraron 150 árboles en total (aunque la cantidad puede incrementar) y se evalúa un periodo de 20 años (Figura 4-10).

						Confirm the confidence you have in the calculation method and valuation	
Type of Trees	Number of trees planted	Start Year for life of tree	Finish Year for life of tree	Sequestered (tonnes)	Present Value of Carbon £	Quantity	Valuation (£)
Deciduous - Small	45	2022	2042	9	£ 351	25%	100%
Deciduous - Medium	75	2022	2042	18	£ 735	50%	100%
Deciduous - Large	30	2022	2042	12	£ 468	75%	100%
Conifer				0	£ -	75%	100%
	Non-traded Carbon	Estimated present value before confidence scores	Estimated present value after confidence scores				
	Central	£ 1,554	£ 806				

Figura 4-10 - Parámetros usados para cuantificar los beneficios en retención de carbono

4.2.2.3.5 Educación

Para la estimación del beneficio en términos de Educación, B£ST considera dos caminos.

1. Partiendo desde un estudio de impacto sobre la Educación (Edu1)
2. Estimando el impacto en la Educación sin contar con estudios previos (Edu2)

Para determinar el valor de este beneficio se necesita estimar un número de viajes escolares a los espacios mejorados con la intención de analizar y su valor ambiental y de reducción de riesgos.

Para monetizar este beneficio se parte de un costo de inversión, lo que quiere decir que se asume que la inversión (en la visita escolar) no se realizaría si esta no tuviera una ventaja educativa (

Tabla 4-17). Y para la evaluación de este beneficio en el proyecto se estimó un promedio de 5,000 estudiantes por año (Figura 4-11) de acuerdo con el manual de BEST (Horton et al., 2019).

Tabla 4-17 - Inversión en viajes educativos a espacios naturales

Contexto	Valor (2014)			Unidades
	Bajo	Medio	Alto	
Costo de inversión en viajes escolares a espacios naturales	15.94	20.16	24.38	£/viaje

Option description		Estimated no. of students visiting per year	Select appropriate monetary value (or enter used defined)	Quantity	Valuation (£)	Confirm the start and end year of the evaluation		Present value before confidence applied	Present value after confidence applied
						Start	End		
Baseline option		0	21.42			Start	End	£ -	£ -
Proposed option		5000	21.42	25%	50%	2022	2042	£ 1,000,326	£ 125,041
							Difference	£ 1,000,326	£ 125,041

Figura 4-11 - Parámetros utilizados para la estimación de beneficios en términos educativos (en rosa)

4.2.2.3.6 Inundación

Para la estimación del beneficio en términos de reducción de inundaciones, B&ST considera cinco caminos.

1. Se cuenta con una evaluación de daños a la propiedad y un valor presente (F1)
2. Se trabaja con un Organismo Operador o una Comisión de Agua y se considera la Voluntad de Pago para evaluar el beneficio (F2)
3. Se ha calculado el daño anual promedio a la propiedad, pero no se ha calculado el valor presente (F3)
4. Se está utilizando la calculadora FCRM para estimación de fondos compartidos del gobierno de Reino Unido (F4)
5. Se estimarán impactos más allá de daños a la propiedad (interrupción de traslados o efectos intangibles en la salud) (F5)

En caso de que no exista un estudio que evalúe la reducción de riesgos por inundación se debe tener un mínimo de información que incluye:

- El número de propiedades de diferentes tipos en el área de reducción de riesgo

- El cambio en el riesgo (frecuencia de inundaciones)
- Cualquier información cuantitativa relacionada a impactos ajenos a la propiedad
- La reducción en el tiempo perdido por la población en sus traslados debido a la inundación
- La cantidad de metros cúbicos almacenados por el esquema

Para la valuación de este beneficio es necesario utilizar herramientas externas como lo es el Multi-Coloured Handbook de la Universidad de Middlesex o estudios de Voluntad de Pago de Organismos Operadores o Comisiones de Agua.

Para este caso se utilizó como recuento de daños a la cantidad de pesos mexicanos destinados a la atención de desastres relacionados con inundaciones proporcionados por el FONDEN de 1999 a 2018 (Figura 4-12).

	Option description	Damage to property: AAD (€)	Other damage costs: AAD (€)	Other damage costs: description	Level of confidence of the quantity calculated	Level of confidence of the monetary value selected/used	Evaluation time frame (year)		Present value before confidence	Present value after confidence applied
Baseline option	El área de trabajo está fuertemente urbanizada en el límite con la ZMSLP	€ -	€ 198,525	recursos asignados del FONDEN 1999-2018	50%	50%	Start	End	€ 1,854,676	€ 463,689
Proposed option	funcionamiento de obras de bioretención, SCALLS y canales	€ -	€ -	Insert summary	50%	50%	2022	2042	€ -	€ -
							Difference		€ 1,854,676	€ 463,689

Figura 4-12 - Parámetros usados para cuantificar el beneficio en función de reducción de inundación (con información del FONDEN, 2019)

4.2.2.3.7 Salud

Para la estimación del beneficio en términos de Salud, B£ST considera cuatro caminos.

1. Partiendo desde un estudio de impacto sobre la Salud (H1)
2. Valuando los impactos en la salud física por nuevas oportunidades para caminar o hacer ciclismo (H2A)
3. Estimando el impacto del incremento de actividad física en costos evitados (por atención médica) (H2B)
4. No hay investigaciones sobre salud mental (H3)

Para cuantificar los beneficios se debe contar con información que indique el número adicional de viajes para caminar o hacer ciclismo relacionados con la mejoría del espacio urbano y la duración promedio de estos viajes.

Para la valuación de beneficios B£ST se basa en estudios realizados en Inglaterra que estiman el costo evitado por la mejoría de la salud pública (Tabla 4-18) (la reducción del gasto en tratamiento de enfermedades debido al incremento de la actividad física).

Tabla 4-18 - Monetización de beneficios en la salud física y emocional relacionados con espacios verdes

Contexto	Valor (2017)			Unidades	Indicaciones
	Bajo	Medio	Alto		
Salud emocional debido al incremento en el uso de parques o áreas verdes	8.47	15.77	22.83	£/visita	Debe usarse el valor bajo cuando se evalúa el bienestar emocional. Los otros valores son para medir sensibilidad.
Perspectiva directa hacia espacios verdes desde el hogar o el trabajo	151	329	506	£/pers/año	Se debe usar cuando se espera un incremento en la perspectiva a espacios verdes.
Reducción en el gasto público para tratamiento de enfermedades relacionadas con la inactividad física		2.50		£/visita activa	Debe usarse cuando se espera un impacto sobre la actividad física de residentes.

Para este proyecto se utilizó la recomendación del manual de usuario que indica que en proyectos de mejora de áreas verdes como parques y jardines pueden esperarse hasta 10,000 visitas al año, y como línea base se asumió un 50% de ese potencial (Figura 4-13).

Use this if you know or wish to estimate the number of visits per year for physical activity		Confirm the confidence you have in the calculation method and valuation				Confirm the start and end year of the evaluation		Present value before confidence applied	Present value after confidence applied
Option description	Estimated number of visits by adults to green space per year	Select appropriate monetary value description (or enter used defined) £/visit/yr	Quantity	Valuation (£)	Start	End	£	£	
Baseline option	5000	2.55	50%	50%			118,995	29,749	
Proposed option	10000	2.55	50%	50%	2022	2042	237,990	59,498	
						Difference	118,995	29,749	

Figura 4-13 - Parámetros usados para la estimación de beneficios en la salud física (en rosa)

4.2.2.3.8 Recreación

Para la estimación del beneficio en términos en la Recreación, B&ST considera dos caminos.

1. Partiendo desde un estudio de impacto sobre actividades recreativas (R1)
2. Estimando el impacto en actividades recreativas sin contar con estudios previos (R2)

Para la cuantificación de este beneficio se debe contar con el número de visitas con propósitos recreativos relacionadas directamente con la mejoría del espacio verde, la guía de B&ST ofrece una guía indicando que el número de visitas por personas adultas a un sitio de importancia local varía de 10 mil a 30 mil por año.

En términos de monetización del beneficio existen estudios que se basan en la Voluntad de Pago de la población en relación con la intención de visitar espacios urbanos mejorados (Tabla 4-19). Es importante considerar si el esquema, independientemente de su tamaño, tipo o ubicación, llevará a un incremento en su uso recreacional.

Tabla 4-19 - Valores para mejoras en el aspecto recreativo

Contexto	Valor (2016)			Unidades	Indicaciones
	Bajo	Medio	Alto		
Beneficios recreacionales de humedales construidos o restaurados	153	421	874	£/ha/añual	Se usa cuando la creación o restauración de humedales crea oportunidades recreativas
Voluntad de Pago por visitas adicionales para pesca recreativa		4.86		£/visita	Debe usarse donde la mejora en la calidad del agua resulte en mayores oportunidades para practicar la pesca recreativa
Voluntad de Pago por visitas adicionales para pesca deportiva		6.12		£/visita	Debe usarse donde la mejora en la calidad del agua resulte en mayores oportunidades para practicar la pesca deportiva
Valor de visitas recreativas en general (pastizales, franjas arboladas, márgenes urbanos y espacio verde urbano)	2.01	4.03	6.04	£/visita	Debe usarse donde el incremento en la calidad/cantidad de espacio verde crea mayores oportunidades recreativas
Valor de visitas recreativas en general	2.01	6.04	30.21	£/visita	

(cuerpos de agua y llanuras de inundación)

Valor de visitas recreativas en general (bosques) 2.01 10.07 19.13 £/visita

Debe usarse donde el incremento en la calidad/cantidad de bosque crea mayores oportunidades recreativas

Para este proyecto se utilizó la recomendación del manual de usuario que indica que en proyectos de mejora de áreas verdes como parques y jardines pueden esperarse hasta 5,000 visitas al año (Figura 4-14).

General recreational visits grassland, greenbelt, urban fringe and urban green space						Confirm the confidence you have in the calculation method and valuation			
	Option description	Estimated no. of general recreational visits (per year)	Select appropriate monetary value description (or enter used defined) £/visit	Quantity	Valuation (£)	Confirm the start and end year of the evaluation		Present value before confidence applied	Present value after confidence applied
Baseline option	El área de trabajo está fuertemente urbanizada en el límite	0	4.19	100%	50%	Start	End	£ -	£ -
Proposed option	Se propone una serie de celdas de biorretención SCALS y	5000	4.19	75%	75%	2022	2042	£ 195,806	£ 110,141
Difference								£ 195,806	£ 110,141

Figura 4-14 - Parámetros usados para cuantificar los beneficios en términos de recreación (en rosa)

4.2.2.3.9 Cantidad de agua (Captación de agua de lluvia)

Para la estimación del beneficio en términos de cantidad de agua (en este caso reducción del consumo de agua), B&S considera tres caminos.

1. Partiendo desde un estudio del impacto sobre la reducción del consumo de agua potable y su valor presente (QW3-RWH1)
2. Se conoce el volumen de agua potable ahorrada por año (QW3-RWH2)
3. Se estima el volumen de agua potable ahorrada por año (QW3-RWH3)

En el esquema propuesto se incluyen sistemas de captación de agua de lluvia para naves industriales y escuelas, por lo que el volumen retenido puede ser restado directamente del consumo anual de cada uno.

Dado que el ahorro en consumo de agua potable derivará en la reducción de costos de extracción, conducción y tratamiento será adecuado asociar el beneficio con el costo por metro cúbico que ofrece el Organismo Operador local (INTERAPAS), hasta 2020 la tarifa aprobada para Instituciones Públicas de tamaño mediano (escuelas primarias o secundarias) es de \$16.50/m³ (hasta 30 m³) al bimestre y en el caso de la cuota comercial es de \$19.25/m³ (hasta 30 m³) al bimestre y como costo de tratamiento de agua el 22% del valor por metro cubico (Figura 4-15).

Confirm the start and end year of the evaluation								
Total reduction in water use (m ³)	Input the consumer cost of a m ³ of water (£)	Input the cost to treat water per / m ³ (£)	Start	End	Traded Carbon	Annual customer bill reduction (£)	Annual cost to treat reduction (£)	Annual Carbon Emissions to treat (kg CO ₂ /ML)
2060	4.02	0.88	2022	2042	Central	£ 8,281	£ 1,813	700

Figura 4-15 - Parámetros usados para estimar el beneficio en reducción de consumo de agua (en rosa)

4.2.2.4 Resumen y presentación de resultados

Una vez que se han estimado los beneficios para cada categoría aplicable se presentan los resultados obtenidos con el factor de confianza que le aplica a cada uno según la estimación de cantidades y los precios presentados por el propio sistema (Tabla 4-20).

Tabla 4-20 - Relación de beneficios monetizados por el esquema de SUDS propuesto (adaptado de la interfaz de B£ST)

Categoría	Valor presente antes de evaluación de confianza (£)	Valor presente después de evaluación de confianza (£)
Calidad del aire	£46,784	£35,088
Amenidad	£140,030,141	£48,135,361
Desempeño de infraestructura	£-	£-
Biodiversidad y ecología	£4,538	£1,702
Confort térmico	£-	£-
Captación y retención de carbono	£2,984	£1,879
Criminalidad	£-	£-

Crecimiento económico	£-	£-
Educación	£1,000,326	£125,041
Impulso al desarrollo	£-	£-
Reducción de inundaciones	£1,854,676	£463,669
Salud	£118,995	£29,749
Reducción de ruido	£-	£-
Recreación	£195,806	£110,141
Turismo	£-	£-
Atenuación del tráfico	£-	£-
Calidad del agua	£-	£-
Cantidad de agua	£94,301	£70,726
Total (GBP)	£143,348,551	£48,973,354
<i>Total (MXN)</i>	<i>\$3,532,108,287.71</i>	<i>\$1,206,703,451.51</i>
Total (MXN/año)	\$176,605,414.39	\$60,335,172.58

Con este resumen de valuación de beneficios se puede observar que el principal impacto está en la amenidad, pues este representa el incremento en el costo de las propiedades aledañas a los SUDS, sin embargo también pueden reportarse beneficios importantes en la reducción de daños por inundación, recreación y calidad del aire, este último puede incrementarse aumentando la cantidad de árboles nuevos considerados en el esquema de SUDS propuesto aun si estos no son colocados dentro de los sistemas, si no un programa simultaneo de reforestación.

4.3 ANÁLISIS COSTO - BENEFICIO

Para la realización del análisis costo-beneficio se seguirán los lineamientos vigentes ante la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP, 2012).

En primer lugar, se determinó el Valor Presente Neto (VPN), para lo cual se consideró un horizonte de evaluación de 20 años, siendo el mismo periodo el evaluado en BEST, una tasa social de retorno del 10% (SHCP, 2022) y un costo de mantenimiento anual igual al 10% de la inversión inicial del proyecto.

Siguiendo la fórmula para VPN se obtuvo la distribución de información mostrada en la tabla siguiente.

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + r)^t}$$

Donde:

B_t , es el beneficio total en el año t

C_t , es el costo total en el año t

r, es la tasa social de retorno

t, es el año de evaluación

n, es el horizonte de evaluación

En la Tabla 4-21 se puede observar la evolución del Valor Presente Neto y el flujo de capital para cada año del proyecto de inversión.

Tabla 4-21 - Tabulación del VPN

Año	C_t	B_t	B_t-C_t	VPN
0	\$66,897,769.63	\$-	-\$66,897,769.63	-\$66,897,769.63
1	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$48,768,541.47
2	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$44,335,037.70
3	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$40,304,579.72
4	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$36,640,527.02
5	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$33,309,570.02
6	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$30,281,427.29
7	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$27,528,570.26
8	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$25,025,972.97
9	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$22,750,884.52

Año	C _t	B _t	B _t -C _t	VPN
10	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$20,682,622.29
11	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$18,802,383.90
12	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$17,093,076.27
13	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$15,539,160.25
14	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$14,126,509.31
15	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$12,842,281.19
16	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$11,674,801.09
17	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$10,613,455.53
18	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$9,648,595.94
19	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$8,771,450.85
20	\$6,689,776.96	\$60,335,172.58	\$53,645,395.61	\$7,974,046.23
				\$322,917,954.56

De esta evaluación se obtuvo un VPN positivo, lo que quiere decir que el proyecto es **rentable** y tendría beneficios para la sociedad.

Seguido de esto se evaluó la Tasa Interna de Retorno (TIR), la cual representa la tasa máxima que soportaría el proyecto para ser rentable, para estimar la TIR se utilizó la fórmula de Excel =TIR (valores) usando como parámetro la tabulación de B_t-C_t. En este caso se calculó un valor de 80% para la TIR, por lo que, al ser mayor que la tasa de retorno dada por la SHCP del 10%, justifica el uso de recursos para el proyecto por tener un rendimiento mayor al mínimo marcado por la Secretaría (SHCP, 2020).

Posterior a esto se estimó la Tasa de Retorno Inmediata (TRI), que refleja el momento óptimo para que el proyecto genere beneficios crecientes. Esto se calcula con la fórmula:

$$TRI = \frac{B_{t+1} - C_{t+1}}{I_t}$$

Donde:

B_{t+1}, es el beneficio total en el año t+1

C_{t+1}, es el costo total en el año t+1

t, es el año de evaluación

I_t , es el monto total de inversión valuado al año t

De esta estimación se obtiene que este es el año óptimo para realizar la inversión, y a partir de este punto irá reduciendo su rendimiento de inversión.

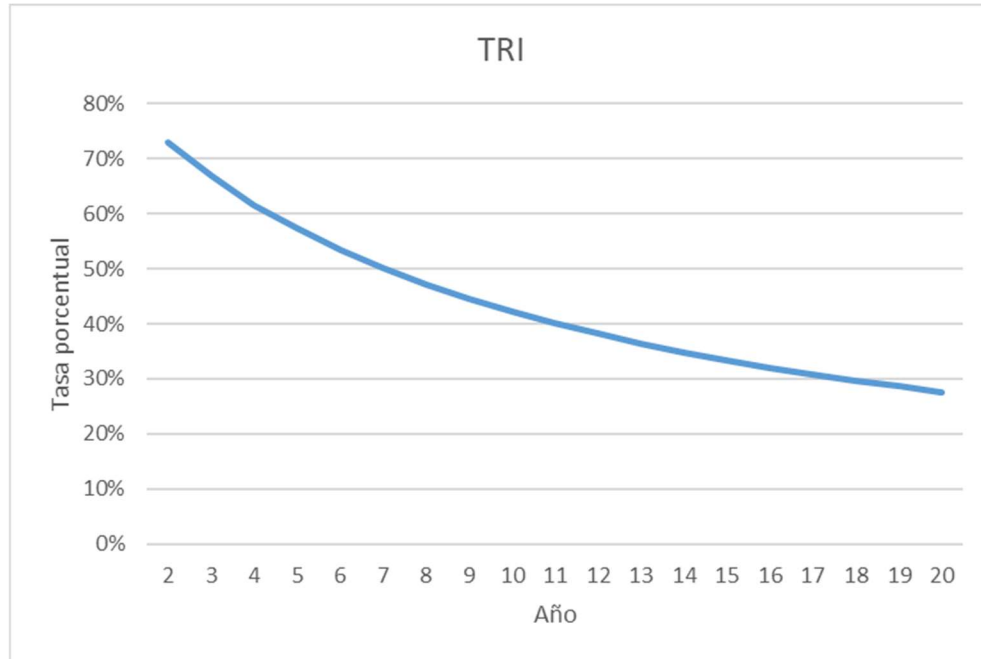


Figura 4-16 - Desarrollo de la TRI

La estimación de estos indicadores económicos es fundamental para la determinación de la ejecución del proyecto y su rentabilidad por parte de la administración municipal, estatal o federal, demostrando el peso social a la hora de decidir sobre los proyectos que se presenten.

Ahondando más en este rubro, es importante dejar en claro que los beneficios evaluados no son en un sentido de remuneración económica directa como una inversión en un instrumento financiero, sino más bien en costos evitados y el incremento de valor de mercado del área de impacto, al contar con infraestructura verde que capte contaminantes y con las instalaciones adecuadas para incentivar el esparcimiento se reducirá el gasto requerido en el tratamiento de enfermedades relacionadas con una mala calidad del aire y la inactividad física, además las renovaciones en espacios verdes reflejan un incremento en el valor económico de los hogares cercanos y propicia el acercamiento de pequeños negocios familiares, que aunque en muchas ocasiones son negocios informales, atraen un ingreso directo a la economía familiar.

Futuros trabajos encaminados a definir el valor monetario de los beneficios de la infraestructura verde serán importantes para contextualizar la metodología a México o Latinoamérica, ya que los valores y criterios utilizados por BEST son establecidos de acuerdo con valores y regulaciones inglesas, las cuales pueden variar respecto a la realidad en nuestro país.

CONCLUSIONES

Se determinó que en los últimos diez años la mancha urbana de la Delegación Villa de Pozos y su población han crecido de forma acelerada (70% más de área urbana de 1994 a 2019 y un aumento del 115% de la población del 2010 al 2020) y en dirección al tanque Tenorio (la zona más baja de la cuenca) en forma de nuevos desarrollos inmobiliarios de interés social en el caso de la Zona Metropolitana y de desarrollos privados como se observa en Villa de Pozos.

Igualmente se constató que en la zona existen grandes escurrimientos (de hasta 17,700 L/s) para los que el sistema de gestión de agua pluvial es insuficiente en las áreas en que se han instalado colectores (ya que estos trabajan al 100% de su capacidad), mientras que en zonas como Laguna de Santa Rita no existe un sistema de colectores que pueda hacer frente a eventos de precipitación lo que deja que el agua corra sobre vialidades causando encharcamientos.

Con la aplicación de los SUDS se encontraron reducciones en la escorrentía superficial de entre un 10 y 40% en 15 de las 27 subcuencas intervenidas, mientras que solo en un 20% de los colectores y calles analizados hubo una reducción del 15% en el caudal conducido.

De entre los SUDS propuestos las cuencas de retención tienen una efectividad de 100% para contener escurrimientos, en segundo lugar, se encuentran las trincheras de infiltración con 94%, en segundo lugar, los sistemas de captación de agua de lluvia con 23% de eficiencia, seguido de los pavimentos permeables con 19%, los techos verdes con 4% y finalmente con canales vegetales con 0% de capacidad de retención lo que no dista de su principal propósito que es la sola conducción de agua.

De la presupuestación de obra del esquema completo de SUDS propuestos se observa que la mayor inversión sería para la construcción de cuencas de retención (31% del total), seguida de la construcción de techos verdes (28%) y los pavimentos permeables ocupando un 23% del total. Con base en los resultados, la mejor relación costo-eficiencia corresponde a las cuencas de retención, mientras que los techos verdes tienen un costo elevado para la eficiencia reportada.

El total de beneficios evaluados rebasa 18 veces el costo de inversión inicial, siendo los beneficios más importantes el incremento del valor de los predios cercanos al proyecto de infraestructura (98% del total), seguido del valor por la reducción de los efectos de

inundaciones (\$11,424,800.00), luego su valor educativo (\$3,081,000.00) y los beneficios recreativos (\$2,713,872.00).

Finalmente, al obtener indicadores de rentabilidad se encuentra que por su Valor Presente Neto positivo es un proyecto socialmente rentable y conveniente en su ejecución, además debido a que su Tasa Interna de Retorno es del 80% mientras que la Tasa Social de Retorno es del 10% se garantiza que el proyecto será rentable. Del mismo modo, al determinar la Tasa de Rendimiento Inmediata al ser esta igual a la Tasa Interna de Retorno y por tanto mayor que la Tasa Social de Retorno este es el momento óptimo para realizar el proyecto de inversión.

RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos se recomendaría en primer lugar una reforma completa del sistema de drenaje pluvial existente que incluya incrementar la capacidad de transporte aumentando los diámetros, e incrementando la cobertura de la red, y más importante aun integrando elementos de infraestructura verde – azul como los mostrados en este trabajo. Aunque más importante aún es un estricto programa de mantenimiento y su correspondiente financiamiento que mantenga en buen estado la red.

Otro aspecto a mejorar es en la normatividad relacionada con infraestructura verde y soluciones basadas en la naturaleza, ya que aunque existen pautas como las presentadas en el Manual de Calles de la SEDATU, el alcance de la regulación relacionada con este tema es limitado sino inexistente en algunos estados, la incorporación de áreas de reserva hidrológicas o de sistemas de manejo de agua pluvial sustentables en forma de un porcentaje del área total de un proyecto inmobiliario, vial o industrial traerían beneficios sustanciales a la población y a la misma administración pública.

Bajo este mismo concepto, se podría trabajar en una propuesta que mitigue los efectos de los futuros desarrollos inmobiliarios e industriales que surgirán en las zonas agrícolas dentro de la Delegación Villa de Pozos y en particular en una propuesta que pueda dar un mejor desempeño al Área de Crecimiento Controlado – Hídrico.

Del mismo modo, aunque los métodos aquí mostrados pueden funcionar como indicativos del impacto y beneficios de SbN y SUDS es necesario realizar una contextualización de los parámetros considerados para que estos beneficios reflejen a las condiciones ambientales, sociales y normativas existentes en no solo en México si no en el tipo de clima que impera en regiones tropicales, áridas y semiáridas.

Además, para acentuar los efectos del esquema de SUDS propuesto en este trabajo se podría generar un proyecto que contemple la interconexión de diferentes sistemas que atenúen el escurrimiento y mejoren el tratamiento del agua pluvial.

Finalmente existe un campo de acción para involucrar a la población beneficiada por un esquema de infraestructura verde en las diferentes etapas del proyecto (planeación, ejecución y mantenimiento) para de esta forma potenciar sus beneficios y aumentar la vida útil de la infraestructura.

REFERENCIAS

- AD Colima. (2021). Por contingencia sanitaria, jardín principal de Comala permanecerá cerrado [Web de periódico local]. *Archivo Digital Colima*. <https://www.adcolima.com/2021/02/03/por-contingencia-sanitaria-jardin-principal-de-comala-permanecera-cerrado/>
- Ágora. (2022, marzo 17). Un nuevo parque inundable para aumentar la resiliencia de Alicante. *El Ágora*. <https://www.elagoradiario.com/agua/agua-y-ciudades/parque-inundable-resiliencia-alicante/>
- Andenæs, E., Time, B., Torp, O., Kvande, T., & Lohne, J. (2021). Risk Management in Procurement of Blue-Green Roofs—Supplier Perspective. En S. M. Ahmed, P. Hampton, S. Azhar, & A. D. Saul (Eds.), *Collaboration and Integration in Construction, Engineering, Management and Technology* (pp. 111-115). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48465-1_19
- Baeza, C. (2007). *Estimación regional de factores de convectividad para el cálculo de las relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/63943>
- Candia, M. A. (2015). *Análisis de riesgo por inundación en la zona metropolitana de San Luis Potosí* [Tesis de Maestría]. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada* (1a ed.). McGraw Hill.
- Comisión Europea. (2015). *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities* (Nature-based solutions and re-naturing cities) [Reporte final]. Directorate-General for Research and Innovation—Climate Action, Environment, Resource Efficiency and Raw Materials. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fb117980-d5aa-46df-8edc-af367cddc202/language-en>

- CONAGUA. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Drenaje pluvial urbano* (2a ed.). Comisión Nacional del Agua: SEMARNAT.
<https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>
- CONAGUA. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San Luis Potosí (2411), estado de San Luis Potosí* (Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en Acuíferos). Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2022a). *Geovisor de Monitoreo de Redes Piezométricas* (Versión 2018). Comisión Nacional del Agua. <https://sigagis.conagua.gob.mx/rp20/>
- CONAGUA. (2022b). *Titulos y permisos de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes* (Registro Público de Derechos de Agua (REPGA)). CONAGUA.
<https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx>
- CONAGUA. (s.f.). *Información estadística climatológica. Estaciones San Luis Potosí*. Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional.
<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- CONEVAL. (2020). *Informe de pobreza y evaluación 2020. San Luis Potosí*. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social.
- ContentLab. (2019, septiembre 11). Techos verdes: ¿Cuáles son sus características constructivas? *El Comercio*.
<https://elcomercio.pe/especial/construyebien/noticias/techos-verdes-cuales-son-sus-caracteristicas-constructivas-noticia-1994613>
- Contreras, C., & Galindo, Ma. G. (2008). Abasto futuro de agua potable, análisis espacial y vulnerabilidad de la ciudad de San Luis Potosí—México al abasto futuro de agua potable. *Cuadernos de geografía*, 17(2008), 127-137.

- Contreras, O. (2016). *Diseño de prototipo de techo verde como solución a problemas de inundación, caso de estudio: Chapinero, Colombia* [Tesis de licenciatura]. Universidad Católica de Colombia.
- Croci, E., & Lucchitta, B. (Eds.). (2022). *Nature-Based Solutions for more sustainable cities—A framework approach for planning and evaluation* (1.^a ed.). Emerald Publishing Limited.
- Data México. (2022). San Luis Potosí: Economía, empleo, equidad, calidad de vida, educación, salud y seguridad pública. *Data México*. <https://datamexico.org/es/profile/geo/san-luis-potosi>
- Ellingsworth, D., Binkley, M., & Maco, S. (2017). *I-Tree Canopy* (7.1) [Windows]. The Davey Tree Expert Company. <https://canopy.itreetools.org/>
- Fewkes, A., & Wam, P. (2000). Method of modelling the performance of rainwater collection systems in the United Kingdom. *Building Services Engineering Research and Technology*, 21(257), 10. <https://doi.org/10.1177/014362440002100408>
- Ghani, A. AB., Zakaria, N. A., Chang, C. K., & Ainan, A. (2008). *Sustainable Urban Drainage System (SUDS)—Malaysian Experiences*. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgo, Escocia.
- Gob. SLP. (2012). *Monografías de los municipios de México. San Luis Potosí*. Coordinación Estatal para el Fortalecimiento Institucional de los Municipios. Gobierno del estado de San Luis Potosí.
- Grinspan, D., Pool, J., Trivedi, A., Anderson, J., & Bouyé, M. (2020). Green Space: An Underestimated Tool to Create More Equal Cities. *World Resources Institute*.
- Honey, J., Anguelovski, I., Chireh, V., Daher, C., Konijnendijk van den Bosch, C., Litt, J., Mawani, V., McCall, M., Orellana, A., Oscilowicz, E., Sánchez, U., Senbel, M., Tan, X., Villagomez, E., Zapata, O., & Nieuwenhuijsen, M. (2020). The impact of COVID-19 on

- public space: An early review of the emerging questions – design, perceptions and inequities. *Cities & Health*, 1-17.
- Horton, B., Digman, C. J., Ashley, R. M., & McMullan, J. (2019). *BEST Guidance – Guidance to assess the benefits of blue and green infrastructure using BEST* (1.ª ed.). CIRIA.
- Hübner-Lee. (2022). TTE® — Ecological surface reinforcement with near-natural stormwater management [Página oficial]. *Hübner-Lee*. <https://www.huebner-lee.de/en/outdoorinstallations-tte-system.html>
- iagua. (2016, enero 12). Dos hospitales del estado indio de Andhra Pradesh tratan sus aguas con humedales artificiales [Página oficial]. *iagua*. <https://www.iagua.es/noticias/india/fundacion-vicente-ferrer/16/01/12/dos-hospitales-estado-indio-andhra-pradesh-tartan>
- IMPLAN. (2021). *Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de San Luis Potosí, SLP*. Gobierno Municipal de San Luis Potosí.
- INEGI. (1994). *Ortofoto Digital F14A84 Escala 1:20 000 (SAN LUIS POTOSÍ) con Resolución de 2 Metros* (1994.ª ed.) [Ortoimagen]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/>
- INEGI. (2002). *Síntesis de información geográfica del estado de San Luis Potosí (Clima)* [Síntesis de información geográfica]. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- INEGI. (2004). *Ortofoto Digital F14A84 Escala 1:10 000 con Resolución de 1 Metro (Blanco y Negro)* (2004.ª ed.) [Ortoimagen]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463243403>

- INEGI. (2007). *Conjunto de datos vectorial edafológico, escala 1:250,000, Serie II (Conjunto Nacional)*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- INEGI. (2015). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250,000, Serie V (Conjunto Nacional)*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>
- INEGI. (2019). *Censos Económicos 2019. San Luis Potosí*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- INEGI. (2020a). *Marco Geostadístico, Censo de población y vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).
- INEGI. (2020b). *Panorama Sociodemográfico de México 2020. San Luis Potosí (N.º 2020; Panorama Sociodemográfico de México 2020, p. 141)*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197971.pdf
- Jiménez, S. L., Martínez, J. A., Muñoz, A. F., Quijano, J. P., Rodríguez, J. P., Camacho, L. A., & Díaz, M. (2019). A multicriteria planning framework to locate and select Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Consolidated Urban Areas. *Sustainability*, 11(2312), 33. <https://doi.org/10.3390/su11082312>
- Juárez, V. (2022, julio 3). Tromba provoca inundaciones y daños en localidades de SLP [Página oficial de medio nacional]. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/07/03/estados/tromba-provoca-inundaciones-y-danos-en-localidades-de-slp/>

- Licensed to Plumb. (2009). Groundwork. *Licensed to Plumb.*
https://emedia.rmit.edu.au/dlsweb/Toolbox/plumbing/toolbox12_01/units/cpcpdr4002a_stormwater/00_groundwork/page_000.htm
- McPherson, E. G., Maco, S. E., Simpson, J. R., Peper, P. J., Xiao, Q., VanDerZanden, A. M., & Bell, N. (2002). *Western Washington and Oregon Community Tree Guide: Benefits, Costs and Strategic Planting*. (Centre for Forest Research, USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station).
- Merk, O., Saussier, S., Staropoli, C., Slack, E., & Kim, J.-H. (2012). *Financing Green Urban Infrastructure* (OECD Regional Development Working Papers N.º 2012/10; OECD Regional Development Working Papers, Vol. 2012/10).
<https://doi.org/10.1787/5k92p0c6j6r0-en>
- Milman, O., Witherspoon, A., Liu, R., & Chang, A. (2021). The climate disaster is here [Sitio oficial de periodico internacional]. *The Guardian*.
<https://www.theguardian.com/environment/ng-interactive/2021/oct/14/climate-change-happening-now-stats-graphs-maps-cop26>
- ONU. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* [Página oficial].
- Pérez, N. (2021). *Análisis de factibilidad de sistemas urbanos de drenaje sostenible para su implementación en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Powell, E., Devlin, S., & Narkar, N. (2019). *Air quality: Economic analysis*. Department for Environment, Food & Rural Affairs. <https://www.gov.uk/guidance/air-quality-economic-analysis>
- Propiedades.com. (2022). Valores de casas en venta San Luis Potosí [Propiedades.com].
Propiedades.com. <https://propiedades.com/valores/san-luis-potosi/casas-venta>

- Qianqian, Z. (2014). A review of Sustainable Urban Drainage Systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water*, 2014(6), 977-992.
<https://doi.org/10.3390/w6040976>
- Rodríguez, A. (2017). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Hacia una gestión integral del ciclo urbano del agua*. [Trabajo de fin de grado]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Romano, M. (2021). *Aálisis geoespacial de la interacción entre el uso de suelo y agua en la zona peri-urbana del valle de San Luis Potosí* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Rosales, L. (2021). Abren el jardín principal de Tecomán [Página oficial de medio local]. *Colima Noticias*. <https://www.colimanoticias.com/abren-el-jardin-principal-de-tecoman/>
- Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1* (5.1). U.S. Enviromental Protection Agency.
- Sánchez, Fco. J. (2008). *Distribuciones Estadísticas*. Universidad de Salamanca.
https://hidrologia.usal.es/Complementos/estadistica/distr_esta.pdf
- SHCP. (2012). *Lineamientos para la elbaoración y presentación de los análisis costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión*. Diario Oficial de la Federación.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5328458
- SHCP. (2022). *Oficio No. 400.1.410.22.234* (Oficio 400.1.410.22.234). Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/748091/OFICIO_234_25_JULIO_2022_act_TSD_.pdf
- Stevens, G. S. (2012). La vulnerabilidad hídrica de la ciudad de San Luis Potosí. Un análisis espacial. *Revista de El Colegio de San Luis, año II(4)*, 30.

theagritect. (2012, marzo). One man's waste is another man's landscaping material [Blog personal]. *the agritect*. <https://theagritect.wordpress.com/2012/03/21/one-mans-empty-is-another-mans-landscaping-material/>

US EPA. (2014). *The Economic Benefits of Green Infrastructure: A Case Study of Lancaster, PA*.

Ward, S., Memon, F. A., & Butler, D. (2010). Rainwater harvesting: Model-based design evaluation. *Water Science & Technology - WST*, 61(1), 12. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.783>

Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R. M., & Kellagher, R. (2015). *The SuDS manual* (6a ed., Vol. C753). CIRIA. www.ciria.org

Anexos



7 de enero de 2021

MEMORANDUM DG/UP/001/21

PARA: L.E.A. LAURA GAMA BAZARTE
TITULAR DE LA UNIDAD DE TRANSPARENCIA

DE: ING. EZEQUIEL DURAN DE ANDA,
TITULAR DE LA UNIDAD DE PROYECTOS.



En relación con su memorándum INDG/UT/688/2020 de fecha 28 de diciembre de 2020 con el cual solicita la colaboración de la Unidad de Proyectos a mi cargo a fin de atender la solicitud con número de Folio 01420320 presentada por el C. Carlos Ponce de León en la Plataforma Nacional de Transparencia en la cual requiere: "Deseo conocer de la red de drenaje pluvial de Villa de Pozos, en S.L.P. En específico, los diámetros, materiales de tubería y trazo de la red que colecta el agua pluvial del área." en apego a la dispuesto en el numeral 114 del párrafo tercero de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública vigente en el Estado.

Al respecto, me permito informarle que en la Delegación de Villa de Pozos actualmente existen 3 colectores pluviales denominados:

1. Mexinox con una longitud de 1.695 km, con tubería de 1.52 m de diámetro.
2. Revolución con una longitud de 1.51 km, con tubería de 1.22 m de diámetro.
3. D' Rada una red pluvial distribuida en sus diferentes etapas captadas en rejillas y conducidas por tubería en diámetros desde 38 cm hasta 1.52 m.

En los tres casos la tubería utilizada fue polietileno de alta densidad (PEAD) corrugado para alcantarillado pluvial, la ubicación y trazo general de los 3 colectores se muestra en el mapa anexo al presente.

Adicionalmente le informo que esta Unidad de Proyectos recientemente llevó a cabo el estudio denominado: "PLANEACIÓN PLUVIAL DE LA ZONA DE VILLA DE POZOS, ESPECÍFICAMENTE EN SU PORCIÓN MÁS BAJA DENOMINADA LAGUNA DE SANTA RITA, MUNICIPIO DE SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P." misma que deriva en una propuesta técnica de obras de control de los escurrimientos pluviales de la cuenca hidrológica que incide en dicha localidad, que de manera general se resume en los siguientes puntos:

1. Proyecto ejecutivo de 6 estanques de regulación e infiltración, los cuales cada uno incluirá la red de drenaje pluvial necesaria para drenar su zona de influencia, así como sus obras de protección.
2. Proyecto ejecutivo de una zona de restricción con una superficie de inicial de 30 hectáreas y 50 cm de profundidad, debiendo señalar que uno de los seis estanques mencionados en el punto anterior se deberá construir dentro de esta zona con el propósito de darle cabida a los escurrimientos pluviales que excedan el periodo de retorno de 50 años.
3. Un colector pluvial sobre la calle Bosque de Las Flores y que funcionará como interceptor de los escurrimientos generados por la cuenca libre formada por la Carretera Federal No. 57 San Luis Potosí – México, el Libramiento Oriente y la calle mencionada.
4. La rehabilitación de la presa Varela como presa de control y almacenamiento

El cual fue entregado al Arq. Fernando Torre Silva, Director General del Instituto Municipal de Planeación del H. Ayuntamiento de San Luis Potosí, S. L. P., mediante oficio IN/DG/UP/083/20/F1361 de fecha 10 de agosto de 2020 para su consideración,

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo,

ATENTAMENTE.



Copias: Ing. Ricardo Ferrín Purata Espinoza, Director General.
Archivo

