

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CAMPUS MEXICALI

Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

**Incorporación de infraestructura verde en la planeación urbana para la mitigación
de zonas vulnerables a la inundación**



Tesis para obtener el grado de:

Doctor en ciencias

Presenta:

M.C José Mizael Ruiz Gibert

Director de Tesis: Dr. Carlos Salazar Briones

Co-Director: Dr. Marcelo Antonio Lomelí Banda

Agradecimientos

A mi familia.

En especial a mis padres Blanca Gibert y José Manuel Ruiz, por él apoyó y amor incondicional que me permitieron llegar hasta aquí.

A mi futura esposa. Colette Durazo.

Por su amor, paciencia y apoyo incondicional que sin duda han sido mi motivación a lo largo de este trayecto. Te estaré agradecido de por vida por el soporte, tu comprensión, tu cariño y todos esos detalles desde el inicio de esta etapa hasta su culminación.

A mis amigos.

Carlos, Marcelo, Alejandro, a quienes sin duda les estaré agradecido infinitamente por su incondicional amistad. Su apoyo, consejos, oportunidades, en el ámbito laboral y personal, y que me han guiado a superar las adversidades que se han presentado a lo largo de todos estos años de amistad.

Y a todos los profesores del programa de ingeniería civil. Alejandro Mungaray, José Manuel Gutiérrez, Leonel García, Alejandro Sánchez, Marco Montoya, Cynthia Martínez, Julio Rodríguez. Quienes de una u otra forma me brindaron su apoyo en el ámbito profesional o académico, así como su valiosa amistad.

Contenido

Glosario de términos	7
Capítulo I. Introducción.....	11
I.2 Justificación	16
I.3 Objetivo.....	20
I.3.1 Objetivo general	20
I.3.2 Objetivos Particulares.....	20
I.4 Hipótesis	21
I.5 Enfoque general de la tesis.....	21
Capítulo II. Marco teórico	23
II.1 Análisis de inundaciones urbanas.....	23
II.2 Reducción de los riesgos de desastres.....	23
II.3 Evolución de los análisis de inundaciones y soluciones	27
Capítulo III Metodología	31
III.1 Análisis para la ciudad de Mexicali	31
III.2 Desarrollo del indicador de vulnerabilidad	32
III.2.1 Componente Social	34
III.2.2 Componente Económico.	35
III.2.3 Componente Físico.	36
III.2.4 Normalización y Correlación de variables.	38
III.2.5 Indicador integrado de vulnerabilidad.....	39
III.3 Caso de estudio el vidrio.....	40
III.4 Esquema de evaluación de infraestructura pluvial de la Colonia el Vidrio	41
III.5 Caracterización Hidrológica de la Colonia el Vidrio.	42
III.5.1 Delimitación de la cuenca.....	43

III.5.3 Análisis de Precipitación.....	43
III.6 Propuesta de red de alcantarillado pluvial y áreas de captación	46
III.7 Evaluación de infraestructura verde.....	47
Capítulo IV Resultados	48
IV.1 Análisis de vulnerabilidad	48
IV.1.1 Componente Social.....	48
IV.1.2 Componente económico	49
IV.1.3 Componente Físico	51
IV.1.4 Indicador Compuesto de Vulnerabilidad	53
IV.2 Caracterización Hidrológica de la Colonia el Vidrio.	56
IV.2.1 Delimitación de la cuenca	56
IV.2.2 Análisis de precipitación.....	59
IV.3 Propuesta de red de alcantarillado pluvial y áreas de captación	65
IV.4 Evaluación de la incorporación de infraestructura verde	69
Capítulo V Conclusiones y recomendaciones.	80
V.1 Conclusiones teóricas.....	80
V.2 Conclusiones metodológicas.	80
V.3 Conclusiones físicas.	82
Referencias.....	83

Figuras.

Figura 1. Metodología para la evaluación de infraestructura verde	42
Figura 2. AGEBS con vulnerabilidad social por encima de la media,	49
Figura 3. AGEBS con vulnerabilidad económica por encima de la media	51
Figura 4 AGEBS con vulnerabilidad física por encima de la media.....	52
Figura 5. Distribución espacial del Indicador de Vulnerabilidad Compuesto de inundaciones.....	54
Figura 6. Distribución espacial de los AGEBS con valores de vulnerabilidad compuesta por encima de la media.....	55
Figura 7. Delimitación de cuencas y escurrimientos principales de El Vidrio	56
Figura 8. Zonas susceptibles a inundaciones y encharcamientos.....	58
Figura 9. Zonas susceptibles a inundaciones y encharcamientos.....	58
Figura 10. Cuenca y escurrimientos para la elaboración de los cálculos hidrológicos e hidráulicos en El Vidrio.....	59
Figura 11. Volúmenes de precipitación a diferentes escalas de tiempo y diferentes periodos de retorno.....	64
Figura 12. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Mexicali DGE.	64
Figura 13. Propuesta de sistema de drenaje pluvial para la Colonia el Vidrio	65
Figura 14. Distribución y zonificación de la infraestructura verde propuesta.....	70

Tablas.

Tabla 1 Variables del componente social	35
Tabla 2 Variables del componente económicos.	36
Tabla 3 Variables del componente físico	38
Tabla 4 Distribución de probabilidad para el ajuste de información hidrológica.	45
Tabla 6 Datos de la estación 2033 Mexicali DGE.	61
Tabla 7 Error estándar de la densidad de probabilidad de los eventos de precipitación.	62
Tabla 8 Precipitaciones de diseño ajustadas a diferentes periodos de tiempo.....	62
Tabla 9 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial sur con un periodo de retorno de 5 años	66
Tabla 10 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial sur con un periodo de retorno de 15 años.	66
Tabla 11 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial sur con un periodo de retorno de 50 años	67

Tabla 12 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial noreste con un periodo de retorno de 5 años	68
Tabla 13 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial noreste con un periodo de retorno de 15 años	68
Tabla 14 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial noreste con un periodo de retorno de 50 años	68
Tabla 14 Coeficiente de escurrimiento para infraestructura verde.	71
Tabla 15 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial sur con infraestructura verde con un periodo de retorno de 5 años	71
Tabla 16 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial sur con infraestructura verde con un periodo de retorno de 15 años	72
Tabla 17 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial sur con infraestructura verde con un periodo de retorno de 50 años	73
Tabla 18 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial noreste con infraestructura verde con un periodo de retorno de 5 años	73
Tabla 19 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial noreste con infraestructura verde con un periodo de retorno de 15 años	74
Tabla 20 Diferentes gastos puntuales del sistema pluvial sur con y sin infraestructura verde	75
Tabla 21 Diferentes gastos puntuales del sistema pluvial noreste con y sin infraestructura verde	76
Tabla 22 Comparación de gastos de diseño para diferentes periodos de retorno del sistema pluvial sur.	77
Tabla 23 Comparación de gastos de diseño para diferentes periodos de retorno del sistema pluvial noreste.	77
Tabla 24 Comparación de los diferentes diámetros nominales del sistema pluvial sur.	78
Tabla 25 Comparación de los diferentes diámetros nominales del sistema pluvial noreste.	79

Glosario de términos

- ♦ **Hidrología.** Ciencia natural que estudia el agua, su origen, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluidos los seres vivos (Béjar, 2004).
- ♦ **Escurrimiento.** Es el proceso superficial por el cual el agua fluye por la superficie del terreno hacia los cauces y el mar (Bateman, 2007).
- ♦ **Escurrimiento Superficial.** Es la porción de la precipitación que no se infiltra ni se acumula en la superficie del suelo, pero que fluye aguas abajo como flujo laminar o concentrado (Chow et al., 1988).
- ♦ **Infiltración.** Es un proceso por el cual el agua se transfiere desde la superficie del terreno hacia las profundidades. Depende de la morfología y composición del terreno (Bateman, 2007).
- ♦ **Uso de suelo.** Corresponden a un conjunto genérico de actividades que el Instrumento de Planificación Territorial admite o restringe en un área predial, para autorizar los destinos de las construcciones o instalaciones
- ♦ **Tipo de Suelo.**
 - I. **Residencial.** Contempla preferentemente el destino vivienda, e incluye hogares de acogida, así como edificaciones y locales destinados al hospedaje, sea éste remunerado o gratuito, siempre que no presten servicios comerciales adjuntos.
 - II. **Actividades Productivas.** Comprende a todo tipo de industrias y aquellas instalaciones de impacto similar al industrial, tales como grandes depósitos, talleres o bodegas industriales.
 - III. **Equipamiento.** Se refiere a las construcciones destinadas a la prestación de servicios necesarios para complementar el resto de las actividades, como son las residenciales y las productivas.

- IV. **Uso para infraestructura.** Se refiere a las edificaciones o instalaciones y a las redes o trazados destinados a: infraestructura del transporte, infraestructura sanitaria e infraestructura energética.
- V. **Espacio Público.** Se refiere al sistema vial, a las plazas, parques y áreas verdes públicas, en su calidad de bienes nacionales de uso público.
- VI. **Área Verde.** Se refiere a los parques, plazas y áreas libres destinadas a área verde, que no son Bienes Nacionales de uso público, cualquiera que sea su propietario, ya sea una persona natural o jurídica, pública o privada.
- ♦ **Cuenca.** Una cuenca hidrográfica es definida como el área geográfica natural o unidad de territorio delimitada por una divisoria topográfica, que capta las precipitaciones y drena el agua de escorrentía hacia un colector común, denominado río principal (Perales, 2016).
- ♦ **Intensidad.** Es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. Lo que interesa particularmente de cada tormenta es la intensidad máxima que se haya presentado; es la altura máxima de agua caída por unidad de tiempo (Béjar, 2004).
- ♦ **Frecuencia.** Es el número de veces que se repite una tormenta, de características, intensidad y duración definida en un periodo más o menos largo, tomado generalmente en años (Béjar, 2004)
- ♦ **Periodo de retorno.** Intervalo de tiempo promedio, dentro del cual un evento de magnitud x puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez en promedio. Representa el inverso de la frecuencia (Béjar, 2004).

$$T = \frac{I}{f}$$

- ♦ **Permeabilidad.** Capacidad de un cuerpo (en términos particulares, un suelo) para permitir en su seno el paso de un fluido. Mientras más fina sea la textura del suelo más lenta será la permeabilidad (Lema, 2015).
- ♦ **Coeficientes de escurrimiento.** El producto de la intensidad de lluvia por el área de la cuenca es el caudal de entrada al sistema, y la relación entre este y el caudal pico se conoce como *coeficiente de escurrimiento*, cuyo valor siempre se encuentra entre 0 y 1 (Chow, 1994).

- ♦ **Tiempo de concentración.** Representa el tiempo de viaje de una gota de lluvia que cae en el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca y escurre superficialmente hasta su salida, es decir, el tiempo a partir del cual toda la cuenca contribuye al caudal en el punto de salida de la cuenca. (Bentancor & García, 2014)
- ♦ **Inundación.** Desastre natural causado por la acumulación de lluvias y agua en un lugar concreto (Cabrera, 2010).
- ♦ **Flash Flood.** Fenómenos hidrológicos que se forman muy rápidamente y son difíciles de predecir. Estas inundaciones son productos de la combinación de la intensidad y duración de la precipitación y el proceso de producción de escorrentía rápida (Cama et al, 2016).

Análisis de Vulnerabilidad

- ♦ **Riesgo.** Contingencia o proximidad de un daño, que puede ocasionar pérdida de vidas humanas, personas damnificadas, daño en propiedades o interrupción de actividades económicas, debido a un fenómeno natural o de origen antrópico no intencional (Koolhaas, 2016).
- ♦ **Vulnerabilidad.** Se expresa como un concepto múltiple en cuanto a su determinación y diagnóstico, aunque estrictamente su cálculo es imposible. A nivel territorial y de áreas prioritarias necesitadas de intervenciones focalizadas, el término vulnerabilidad refiere a una situación aproximada y posible. No posee un valor absoluto, sino que dependerá de los tipos y valores de amenaza existentes, de la escala de estudio y de la profundidad y orientación metodológica del mismo (Foschiatti, 2002).

Componentes (de la vulnerabilidad)

- ♦ **Indicadores.** Es un dato que busca expresar el estado o grado de alteración de los recursos naturales, en un momento y espacio determinado. Se trata de un dato de medida específico, explícito y verificable, dichos datos suelen ser cuantitativos

- ♦ **Sistema de alcantarillado pluvial.** Está constituido por una red de conductos, estructuras de captación y estructuras complementarias. Su objetivo es el manejo, control y conducción de las aguas pluviales que caen sobre las cubiertas de las edificaciones, sobre las calles y avenidas, veredas, jardines, etc. (Doménech, 2014)
- ♦ **Desarrollo urbano de bajo impacto (Low impact development en inglés).** Controla los escurrimientos generados por una tormenta desde su fuente, al ir dejando áreas reservadas que minimicen el impacto hidráulico hacia aguas abajo mediante retenciones temporales (bioretenciones) (Burgos, 2007).
- ♦ **Cunetas verdes.** Son canales naturalizados que permiten la recogida y transporte de las aguas de lluvia, con acabados superficiales muy variados, cantos rodados, vegetación de ribera y césped (Rodríguez, 2013).
- ♦ **Infraestructura Verde (Green Infrastructure).** Red interconectada de espacios verdes que conservan las funciones y valores de los ecosistemas naturales y proveedores beneficios asociados a la población humana (Benedict y McMahon, 2002).
El término GI en la literatura se conoce comúnmente como desarrollo de bajo impacto (LID), mejores prácticas de gestión (BMP), sistemas de drenaje urbano sostenible (SUSD), diseño urbano sensible al agua (WSUD) y diseño y desarrollo urbano de bajo impacto. (LIUDD) en diferentes contextos (Elliott y Trowsdale 2007).
- ♦ **Modelo Hidráulico.**
- ♦ **Sistemas de tratamiento pasivo.** Se consideran sistemas de tratamiento pasivo a aquellos situados al final de la red, aquellos que reciben las aguas prolongando su estancia de manera que se pueda proporcionar un tratamiento adecuado para su depuración (Rodríguez, 2013)

Capítulo I. Introducción

Los eventos climáticos han causado a lo largo de la historia diversos daños, y con el paso de los años, son mayores los daños causados debido al cambio climático. Una de las consecuencias del cambio climático que más afecta al ser humano es el aumento de los desastres naturales, como inundaciones, sequías, olas de frío y calor, ciclones y huracanes, incendios, etc. En particular, las inundaciones, a lo largo de los años ha ido cobrando más protagonismo debido a que la pobreza ha llevado a muchas personas alrededor del mundo a vivir en áreas vulnerables a sufrir inundaciones.

Diversos autores coinciden con que las inundaciones son los desastres naturales con mayor recurrencia, generando impactos físicos y económicos no solo a la infraestructura si no a la sociedad y sus habitantes. Debido al incremento en los efectos causados por el cambio climático, los riesgos y vulnerabilidad a la inundación se verán en aumento de frecuencia e intensidad.

En zonas urbanas, las precipitaciones con alta intensidad resultan en un incremento exponencial del gasto en poco tiempo que satura el rendimiento del sistema pluvia. A estos eventos se les conoce como inundaciones repentinas (*flash floods en inglés*).

El acelerado crecimiento poblacional en zonas urbanas y los cambios de uso de suelo sin una correcta planeación integral aumentan la vulnerabilidad a eventos de inundación y sus impactos subsecuentes. Existe una estrecha relación entre el aumento en zonas impermeables y los cambios en las características fisiográficas e hidrológicas de una cuenca urbana, como lo son; Aumento en la velocidad de flujo, Disminución de tiempos de retención, Disminución de infiltración, etc. Por lo que las cuencas urbanas resultan más vulnerables a estos fenómenos principalmente por procesos de origen antropogénico propios de su dinámica (Salazar-Briones, 2018).

Las inundaciones urbanas representan un gran desafío al desarrollo, particularmente, a la gente que vive en países en desarrollo (Abbas K. Jha, et al 2012).

Es necesario analizar la integración de los procesos planeación urbana y el manejo de la vulnerabilidad a la inundación y sus efectos. Esta integración permite a los planeadores urbano la identificación y toma de decisiones en cuenta a los aspectos prioritarios para reducir estos efectos provocados por la inundación.

De la mano del desarrollo urbano descontrolado y sin planeación integral, aumenta el porcentaje de superficies impermeables. El alto porcentaje de superficie impermeable aumenta el volumen de escorrentía superficial, creando un desbordamiento combinado del sistema de alcantarillado y eventos de inundación especialmente durante las lluvias intensas (Arnold & Gibbons, 1996).

El enfoque tradicional para el manejo de inundaciones en zonas urbanas que ha acompañado al desarrollo urbano incluye el uso de infraestructura gris. La infraestructura gris es el término que comúnmente se utiliza para designar a los elementos del sistema pluvial como lo son; cunetas, bocas de tormenta; alcantarillas, y en general al sistema pluvial que funciona de manera que las superficies impermeables capten y conduzcan el agua a las tuberías conductoras. En este sentido, diversos investigadores (Walsh et al., 2005; Tang et al., 2005; White and Greer, 2006; Fletcher et al., 2013; Walsh et al., 2015; Askarizadeh et al., 2015; Schubert et al., 2017) han encontrado, que estas prácticas aumentan los niveles de flujo aguas debajo de la red, incrementan los contaminantes, y degradan la ecología de los escurrimientos naturales. Además, las dependencias de servicios públicos están lidiando con infraestructuras envejecidas cuyo mantenimiento y operación son muy caras (Li et al., 2020). Hasta hace poco, el enfoque predeterminado de infraestructura gris para controlar las aguas pluviales ha sido el construir sistemas de infraestructura pluvial de mayor capacidad e instalaciones de almacenamiento subterráneas. Fenómenos como el ya mencionado crecimiento y urbanización desmedida, el cambio climático y el aumento del nivel del mar en ciudades costeras, disminuyen el rendimiento de este enfoque tradicional para la gestión de las aguas pluviales, por lo que los administradores de aguas urbanas están explorando enfoques más sostenibles que involucren el control de la fuente de aguas pluviales (Eaton, 2017).

Estas tendencias han generado que a pesar de que estos elementos pretenden disminuir el riesgo causado por la inundación, provocan un aumento en la vulnerabilidad

a la sociedad y su infraestructura. Es necesario el desarrollo de enfoques innovadores que permitan la solución de manera sustentable y aplicable en todas las regiones.

Estos enfoques más ambientales, conocidos colectivamente como gestión sostenible del agua urbana (Marlow et al., 2013), incluyen técnicas como el desarrollo de bajo impacto (LID por sus siglas en inglés), las mejores prácticas de gestión, el diseño urbano sensible al agua o SUDS (Sistemas de Diseño Urbano Sostenible) en diferentes partes del mundo (Fletcher et al., 2014). Para este término manejaremos los conceptos de Infraestructura Verde (IV) y Desarrollo de Bajo Impacto (GI / LID) en este estudio.

Desde la década de los 90s las prácticas orientadas a la IV ha emergido como un enfoque suplementario a la infraestructura gris. La IV para sistemas pluviales se refiere a prácticas que tienen como intención disminuir la escorrentía superficial imitando los procesos hidrológicos que ocurren en la naturaleza.

Cuando el condado de Prince George introdujo su IV en Maryland en 1999, fue un enfoque radicalmente diferente para la gestión de aguas pluviales. Fue desarrollado para abordar nuevos problemas de desarrollo residencial, comercial e industrial a través de prácticas de implementación y diseño ambiental reinventados. Como se concibió inicialmente, el enfoque del Desarrollo de bajo impacto LID combinó un diseño hidrológicamente efectivo e integrado que incorporó medidas de prevención de la contaminación a escala del sitio para compensar los impactos del desarrollo de la tierra en la hidrología y la calidad del agua (Greater Phoenix Metro green infrastructure & lid handbook, 2019).

Recientemente, ha crecido el reconocimiento de la “infraestructura ecológica”, “infraestructura natural” e “IV” en diversos espacios urbanos, en contraposición o como complemento de la “infraestructura gris” (edificios, carreteras, industrias, sistemas de alcantarillado, canales, sistemas de drenaje, plantas de tratamiento) o “azul” (ríos, lagos, redes de canales, etc.). Todas las ciudades comparten una estructura física similar que comprende las infraestructuras “gris”, “azul” y “verde”. Según la FAO (2017) a fin de construir ciudades capaces de responder a los desafíos urbanos y climáticos, es fundamental optimizar las interacciones entre estos elementos (Zuchetti et al. 2021)

I.1 Planteamiento del problema

El aumento de la vulnerabilidad y los efectos de la inundación han generado un crecimiento drástico en las pérdidas económicas alrededor del mundo en las últimas décadas (Kreibich et al., 2008; MunichRe, 2014; Bouwer, 2013).

La descripción de los llamados desastres naturales ha cambiado en las décadas recientes, de una perspectiva naturalista a una que tiene en cuenta la componente de la vulnerabilidad. Consecuentemente, los desastres no son inevitables pues frecuentemente son asociados con las medidas de escasez de planeación y prevención (Cutter et al. 2007), Por lo tanto, la vulnerabilidad es considerada como la medida del daño que pueda ser previsto bajo ciertas condiciones de exposición, susceptibilidad y resiliencia (Dasgupta et al. 2015).

Las inundaciones están dentro de los desastres naturales con mayor derrama económica en E.E.U.U. (e.g., Pielke Jr. and Downton, 2000), con daños anuales que van desde los cientos de millones a los miles de millones de dólares durante el siglo pasado (Downton et al., 2005; NOAA, 2016). En 2016, las inundaciones ocurridas solamente en Luisiana y Carolina del Norte causaron alrededor de más de 10 mil millones de dólares de daño físico a hogares, negocios y otros bienes (Fortune, 2016; LED, 2016). Esto continua con otros años recientes contando con inundaciones extremas en Michigan (2014) y Colorado (2013) y las inundaciones causadas en medio del Atlántico por la súper tormenta Sandy (Huracan Sandy) en 2012 (NOAA, 2016). Con cada suceso de estos eventos perjudiciales, se renueva un interés en determinar ya sea si el cambio climático puede ser parcialmente responsable por cambios en la magnitud o frecuencia de estos eventos (e.g., IPCC, 2012; Trenberth et al., 2015).

Así mismo en Europa, particularmente en Inglaterra se vio afectada repetidamente por graves inundaciones. Más tarde, dos tercios de los daños podrían estar relacionados con inundaciones pluviales (Pitt, 2008). Las fuertes lluvias también provocaron inundaciones récord en Europa Central en 2013 y 2016 con daños sustanciales a la propiedad (MunichRe, 2014; Floodlist Europe, 2016). Bouwer (Bouwer, 2013) informa que se espera que los Países Bajos sufran un aumento de las pérdidas debido a las fuertes lluvias de hasta un 47% para el año 2040, lo que indica desafíos futuros. Sin

embargo, independientemente de los escenarios climáticos futuros, los eventos de lluvias intensas deben analizarse adecuadamente, ya que estos eventos también tienen consecuencias muy importantes en el momento actual. Suecia históricamente ha experimentado consecuencias sustanciales causadas por inundaciones (Swedish Government Official Reports, 2007). Por ejemplo, la ciudad de Malmö experimentó una tormenta en agosto de 2014 que provocó más de 4500 reclamaciones de seguros y se estimó que provocó más de 250 millones de SEK (corona sueca) en pagos, contando solo las pérdidas aseguradas (Mortensson, 2015).

El desarrollo de las ciudades latinoamericanas ha tenido consecuencias socio-económicas, demográficas y ambientales importantes. Sólo en la década pasada, los peligros naturales relacionados con el clima causaron 90% de los desastres, 60% de las muertes y 98% de los impactos, la mayoría en áreas de países en desarrollo. Las estadísticas del CRED estiman que tan solo en el 2013, 23,538 personas fallecieron a causa de desastres debido a la ocurrencia de 362 de estos eventos.

En las ciudades del mundo en desarrollo, generalmente las personas de escasos recursos habitan en zonas con deficiente infraestructura de drenaje, expuestas con frecuencia a inundaciones, o en pendientes con laderas propensas a deslizamientos de tierra. Las consecuencias de las inundaciones pueden a veces ser devastadoras, especialmente para comunidades pobres que carecen de recursos económicos para reconstruir sus hogares. Sin embargo, las inundaciones tienden a aceptarse como un hecho de vida para estas comunidades, sin desarrollar estrategias para afrontar las consecuencias de la inundación (Parkinson, 2002.).

Según Silveira en los países en desarrollo, los factores socioeconómicos hacen que sea más complejo resolver los problemas de drenaje urbano que en los países desarrollados. Los factores que inhiben la adopción de soluciones modernas incluyen: (1) en materia de drenaje urbano, la filosofía del siglo XIX en la planeación del saneamiento que aún domina; (2) los asentamientos de tierras tanto legales como clandestinos que limitan el espacio que requieren las soluciones modernas; (3) la contaminación de la escorrentía de las tormentas por aguas residuales contaminadas, sedimentos y basura que impide la adopción de prácticas de los países desarrollados;

(4) los factores climáticos y socioeconómicos que favorecen el crecimiento de epidemias donde la escorrentía se retiene para evitar inundaciones y aumentar la infiltración; (5) falta de una base tecnológica para la gestión y el diseño adecuados del drenaje; (6) falta de la interacción entre la comunidad y la administración de la ciudad que se necesita para obtener soluciones modernas a los problemas de drenaje urbano. La conciencia de estas dificultades es fundamental para la búsqueda de soluciones modernas y viables apropiadas para los países en desarrollo (Silveira, 2002.).

I.2 Justificación

Tradicionalmente para afrontar los problemas relacionados con la inundación se sobredimensionan las tuberías y obras de drenaje, sin embargo, esta solución a largo plazo no se considera viable. (Jato-Espino, et al, 2016). Diseñar correctamente un sistema de drenaje pluvial sirve para brindar una mayor seguridad a los vehículos y a los peatones, al igual que salvaguardar la infraestructura urbana. Para que esto sea posible es necesario llevar a cabo un análisis desde el inicio de la planeación urbana, de esta forma el diseño puede maximizar sus alcances (Abdelrahman, et al, 2018). Diversos profesionales en el área de gestión del agua urbana han estado trabajando en conjunto para trazar una ruta y soluciones hacia un futuro urbano resiliente a inundaciones (Potter, K., & Vilcan, T. 2020).

Idealmente estas soluciones suelen dar prioridad a zonas altamente vulnerables a la inundación. Sin embargo, el enfoque tradición de la vulnerabilidad tomando en cuenta únicamente el entorno físico/urbano no describe correctamente la exposición generada por la inundación (Salazar et al. 2020). A pesar de que la vulnerabilidad física puede caracterizar la susceptibilidad en daños específicos derivados de inundaciones, no contempla que tan vulnerable pueden llegar a ser los habitantes de una zona en particular y su entorno social.

Por lo tanto, otros autores han analizado zonas vulnerables desde un punto de vista integral, utilizando componentes Físicos, Económicos y Sociales, combinando características cuantitativas como cualitativas (Fernandez et al. 2016).

Investigadores como Balica y otros (Balica et al. 2009, Balica et al. 2012), han desarrollado metodologías para el cálculo del índice de vulnerabilidad a las inundaciones (FVI) basadas en componentes sociales, económicos y físicos utilizando 71 indicadores. Sin embargo, algunos de estos indicadores pueden ser redundantes o no influir en los resultados, por lo que es posible realizar un análisis para establecer los indicadores más relevantes con el fin de establecer un uso parsimonioso del FVI [(Balica & Wright, 2010). Estos índices se procesan para diferentes escalas geográficas y son tan válidos como la calidad de los datos obtenidos para sus cálculos, y esto representa un problema en los países en desarrollo que estamos monitoreando. Las operaciones de desbordamiento se descartan a menudo por su elevado coste. Además, la falta de recursos financieros para prepararse y prevenir las inundaciones puede suponer una limitación crucial para los esfuerzos de los países en desarrollo por aumentar su resistencia al clima. A ello se unen las carencias de conocimientos técnicos, competencias y datos, que influyen en la forma en que un país responde a los riesgos de catástrofes naturales (Surminski & Oramas-Dorta, 2013). El desarrollo de un índice de vulnerabilidad a las inundaciones basado en la comunidad para las inundaciones urbanas mediante el uso de componentes e indicadores locales es esencial para generar una vulnerabilidad a las inundaciones localizada que represente un escenario más realista de los índices de vulnerabilidad y resiliencia en un entorno local, nacional e internacional (Villordon & Gourbesville, 2016).

Desde la década de los sesentas se viene utilizando el concepto de los sistemas de información geográfica como herramientas digitales. No fue hasta los noventas con el desarrollo de interfaces más visuales donde realmente se comenzó a utilizar de manera comercial (Yeh, 1999).

El incremento en las aplicaciones de estos sistemas ha sido tal que hoy en día, la mayoría de las bases de datos urbanos espaciales de toda índole, están relacionados de una u otra manera con los GIS. El creciente uso de los GIS en la planificación y el diseño urbanos promete permitir un análisis de datos cuantitativos y cualitativos de mayor calidad, mejorando así la base de pruebas para la toma de decisiones, así como la base de conocimientos del propio proceso de toma de decisiones, factores todos ellos de los

que depende, en última instancia, la consecución de un objetivo político tan ambicioso, pero tan complejo, como el Objetivo de Desarrollo Sostenible.

La correcta gestión de herramientas de planeación mediante análisis de vulnerabilidad y el uso de SIG, pueden co-adyudar a identificar zonas prioritarias donde implementar soluciones sustentables puede mitigar no solo los efectos a la inundación, sino que a su vez, aumentar las áreas verdes, disminuir el efecto de las islas de calor, etc.

En el contexto de la mitigación de las inundaciones urbanas, los controles tradicionales de las aguas pluviales urbanas comprenden principalmente la infraestructura gris, basada en la estrategia de eliminar la escorrentía de un sitio tan rápidamente como sea posible y luego almacenarla en instalaciones aguas abajo. (Cembrano et al., 2004; USEPA, 2000). Es innegable que las infraestructuras grises son necesarias para hacer frente a las temporadas de lluvia extrema (Kamil et al., 2017); Sin embargo, se considera insostenible seguir aumentando la capacidad de las infraestructuras grises debido a las presiones asociadas al cambio climático y a la urbanización. (Hanak and Lund, 2012; Rosenberg et al., 2010).

En los últimos años, las estrategias de gestión de aguas pluviales han consistido en reducir la impermeabilidad de las superficies urbanas, aumentando la infiltración y la retención, así mismo aprovechando el recurso hídrico (Lund et al., 2019; Qin et al., 2013).

El concepto de “infraestructura ecológica”, definido como la estructura constituida por el paisaje natural y las áreas naturales para organizar espacialmente las ciudades, fue considerado como uno de los cinco principios para guiar la planificación de ciudades ecológicas (UNESCO, 1984). El término “infraestructura verde” fue usado por primera vez en 2004 por la Comisión de Corredores Verdes de Florida y fue definido como “(...) una red interconectada de áreas naturales y otros espacios que conservan los valores y funciones de ecosistemas naturales, mantienen el aire y agua limpios y provee un amplio abanico de beneficios a la vida silvestre y humana” (Benedict y Mahón, 2006).

Existen variadas definiciones para la IV; todas ellas concuerdan en los beneficios ambientales que pueda aportar este tipo de infraestructuras dentro de una ciudad, incluso algunos autores mencionan beneficios más allá de lo ambiental y que

puede favorecer el desarrollo urbano y económico, “las infraestructuras verdes mitigan la contaminación, generan recreación, valor económico, estructura urbana, estructura paisajística y otros beneficios más para el hombre” (Austin, 2017, p.16-17) es por ello que esta infraestructura resulta atractiva para los planificadores urbanos y para quienes se encargan de la gestión territorial.

La IV funciona como un sistema pasivo de captación y aprovechamiento de agua de lluvia que no requiere de tuberías ni bombas y ayuda a reducir los costos económicos de la infraestructura artificial. Al diseñar con la naturaleza y llevar a cabo acciones de conservación y regeneración ecosistémica en diversas escalas y zonas de una ciudad, le regresaremos al territorio la capacidad de realizar las funciones que la infraestructura artificial es incapaz de lograr (Balmaseda, 2014).

La incorporación de la IV dentro de las herramientas de modelado de cuencas ha surgido para tener una idea del comportamiento de las diferentes prácticas de IV en la gestión de las aguas pluviales. Las herramientas de modelado de la gestión de las aguas pluviales han sido ampliamente utilizadas por los investigadores y los profesionales para comprender diversos aspectos relacionados con las aguas pluviales (Jayasooriya, 2014).

Se han desarrollado muchos modelos con diferentes aplicaciones, desde pequeñas cuencas hasta grandes cuencas. Cada software tiene sus propias características específicas y sus respectivas aplicaciones. Se utilizan varios modelos para modelar la zona de estudio con y sin aforo. Cada modelo tiene varias desventajas, como la falta de características de facilidad de uso, los grandes requisitos de datos y la no aparición de declaraciones claras de sus límites. Para superar estas imperfecciones, es necesario que los modelos incluyan los avances rápidos de tecnologías de teledetección.

Las observaciones espacio-temporales de las variables hidrológicas son esenciales para identificar las características específicas de los riesgos hidrológicos (Mo 2008) y, dado que las observaciones a largo plazo y de resolución fina de las variables hidrológicas son escasas, los modelos hidrológicos se convierten en una herramienta útil para simular y evaluar las características hidrológicas, tanto históricamente como con una perspectiva futura bajo escenarios de cambio climático. (e.g. Andreadis et al. 2005,

Shukla and Wood 2008, Wu et al. 2011, Kang and Sridhar 2017). Los recientes avances en el desarrollo de modelos hidrológicos ofrecen la posibilidad de simular de forma realista variables hidrológicas que pueden reconstruirse y actualizarse continuamente de forma espacial y temporal en grandes áreas. (Shukla and Wood 2008, Wu et al. 2011).

Esto se convierte en una herramienta vital para los países en vías de desarrollo donde la información es dispersa y en algunos casos sin contar con la correcta escala por falta de monitoreos o levantamientos puntuales en el sitio.

Los modelos permiten aportar una perspectiva general de la problemática urbana y los múltiples beneficios que pueden generar acciones específicas como lo son la implementación de IV

I.3 Objetivo

I.3.1 Objetivo general

El objetivo general de esta investigación es desarrollar las estrategias metodológicas y de planeación urbana que permitan aumentar la resiliencia a eventos de inundación. Lo anterior a partir de la implementación de IV.

I.3.2 Objetivos Particulares

- Crear un indicador de vulnerabilidad compuesto para analizar las zonas mas susceptibles a los eventos de inundación en la ciudad de Mexicali,

- Seleccionar un sitio vulnerable para analizar los efectos de la infraestructura verde en la mitigación de inundaciones

- Determinar las condiciones hidrológicas del sitio de estudio bajo las condiciones actuales.

- Analizar el sistema de drenaje pluvial existente en el sitio de estudio, o en el caso de que no se cuente con uno, elaborar una propuesta técnica que permita la evaluación de la infraestructura verde.

-Simular y analizar las características hidrodinámicas de la red de alcantarillado pluvial actual o propuesta, bajo diferentes escenarios de precipitación en condiciones actuales.

-Simular y analizar las características hidrodinámicas de la red de alcantarillado pluvial actual o propuesta, incorporando al modelo los efectos de la implementación de IV.

-Identificar y evaluar los efectos de mitigación de la implementación de infraestructura verde.

I.4 Hipótesis

La implementación de planes sustentables que contemplen componentes de análisis multidisciplinarios permite una mejor identificación de las necesidades y prioridades particulares de cada sitio de estudio.

Por otro lado, la IV representa una solución de bajo impacto que permite la disminución de factores que provocan inundaciones sin el alto costo que tradicionalmente representa la infraestructura gris, trayendo además múltiples beneficios ambientales.

I.5 Enfoque general de la tesis

En el marco de la planeación ante riesgos de fenómenos naturales urbanos como lo son la inundación, Sequias, Islas de calor, etc.; comúnmente las acciones implementadas en programas de desarrollo, o normas técnicas, surgen de manera reactiva a impactos recientes causados por estos fenómenos.

Hablando en específico del tema de inundaciones urbanas, el problema se pretende solucionar mediante la implementación de infraestructura gris, que básicamente pretende aumentar los diámetros en las tuberías y el desalojo de las aguas pluviales a través de bombeo y desviación de los escurrimientos.

El presente estudio presenta un planteamiento sustentable ante los problemas de inundación desde un punto de vista interdisciplinario para identificar la vulnerabilidad de

la ciudad ante estos eventos, utilizando un indicador compuesto que no solo tome en cuenta las condiciones del terreno o la vivienda, si no variables físicas, económicas y sociales que de igual manera pueden repercutir en la vulnerabilidad.

Si bien en zonas áridas los volúmenes de precipitación son menores, la intensidad de ciertos eventos extremos ha dejado claro que utilizar nuevos enfoques para el manejo de inundaciones es necesario, así como nuevas técnicas en el manejo del sistema pluvial urbano.

Este enfoque nos llevó a plantear el objetivo de la presente investigación, la cual pretende generar una metodología que sea replicable en otras zonas de estudio con características similares.

La modelación del sitio de estudio permite analizar los impactos que pueden causar diferentes escenarios de precipitación, cambio climático, cambio en los usos de suelo, implementación de infraestructura, etc. Esto permite dotar de herramientas para la toma de decisiones y elaboración de programas de desarrollo que contemplen los aspectos interdisciplinarios que surgen de esta investigación.

Se espera que este trabajo logre contribuir en los sectores públicos y privado, así como al sector académico. Los resultados obtenidos pueden ser punto de partida para futuras investigaciones que refuercen los planes de desarrollo, así como las normativas vigentes en temas de prevención de riesgos de inundación, sistemas de alcantarillado pluvial y desarrollo urbano.

Capítulo II. Marco teórico

II.1 Análisis de inundaciones urbanas

- ♦ El riesgo de inundaciones está aumentando en todo el mundo debido a la urbanización y los efectos del cambio climático. Los planificadores urbanos y los organismos administradores del agua intentan hacer frente al riesgo de inundaciones mejorando la resiliencia a las inundaciones urbanas. Las tres vías principales para el aumento de la resiliencia son soluciones de ingeniería, ecológicas y socioecológicas. Mientras que el concepto de la resiliencia de la ingeniería enfatiza el uso de infraestructuras de protección contra inundaciones, los discursos de resiliencia ecológica y socioecológica abogan por la restauración de ríos y estrategias espaciales para reducir el riesgo de inundaciones (Vitale et al, 2020.).

La gestión integrada de inundaciones es esencial en la planificación urbana para alinear la protección y mitigación de inundaciones con la compleja infraestructura social y física en las ciudades, e implica administrar el agua superficial reteniéndola y transfiriéndola a lo largo de su recorrido a través de múltiples sistemas de infraestructura. Sin embargo, a pesar de muchas posibles soluciones de gestión de inundaciones (naturales y artificiales), la priorización espacial para implementar estas soluciones desde una perspectiva de captación sigue siendo difícil (Vercruysse et al, 2019).

II.2 Reducción de los riesgos de desastres

El concepto de gestión del riesgo según Zilbert (1998) ha evolucionado desde enfoques orientados al control y la reducción del desastre, hasta llegar a una visión sistémica que lo considere parte de un todo integral y armónico, marcado por los conceptos de desarrollo y los avances científicos que ha experimentado la sociedad, especialmente al finalizar la primera mitad del siglo XX, hechos que han caracterizado tanto la forma como el fondo de los distintos enfoques e ideas relacionadas con el riesgo. La presentación clásica, es la que clasifica los riesgos en función del origen de los

fenómenos físicos extremos, la cual distingue esencialmente entre los riesgos de origen natural y los de origen antrópico (Lara San Matín, 2012).

Los responsables de la formulación de políticas pueden elegir entre una amplia gama de intervenciones para reducir el riesgo de desastres, entre ellas los marcos políticos, la infraestructura construida, las soluciones basadas en la conservación, y la gestión o restauración de los ecosistemas. Entre estas opciones, la infraestructura construida ha sido, con gran diferencia, la solución más común. Sin embargo, actualmente existe un mayor reconocimiento del papel que desempeñan los ecosistemas en la provisión de servicios esenciales para reducir y mitigar el riesgo de diferentes tipos de inundaciones.

Los ecosistemas, como los bosques, humedales, páramos y punas (mesetas de alta montaña característica de los Andes) pueden desempeñar un papel crítico en la gestión de las cuencas fluviales. Bajo ciertas condiciones, los ecosistemas pueden ayudar a atenuar los caudales (almacenando agua en el sistema y liberándola gradualmente en el tiempo), reduciendo así la intensidad y la probabilidad de inundaciones destructivas. En el contexto de los riesgos de inundación, los ecosistemas pueden actuar como infraestructura natural, mitigando los impactos de los desastres, produciendo la reducción de la vulnerabilidad física y el fortalecimiento de la resiliencia.

Por lo que para reducir el riesgo de inundación se recomienda aplicar soluciones no estructurales y luego considerar las soluciones estructurales, priorizando la IV, que se pueden combinar con las infraestructuras grises, dando lugar a las soluciones híbridas.

En la mayoría de los casos, el término de riesgo se ha definido en relación con los fines de las diferentes ciencias en las que se requerían métodos de gestión de catástrofes. A pesar de las numerosas definiciones que aparecen en la literatura, el concepto de riesgo con respecto a la "amenaza" y la "vulnerabilidad" parece ser el más aceptado en la gestión del riesgo de inundación, por lo que es importante saber que el "riesgo" es un tema completamente humano. Esto significa que las inundaciones forman parte del ciclo hidrológico, pero debido a la disputa de la función natural de las llanuras de inundación de los ríos en el transporte de agua y sedimentos como resultado del uso humano de la tierra, el riesgo ha aumentado (Schanze 2006).

En relación con la literatura y los estudios anteriores, el marco para el análisis de la vulnerabilidad especial en la Ciencia de la Sostenibilidad representa la vulnerabilidad, con evidente atención al espacio, el tiempo, la escala y el contexto en un marco conceptual que puede aplicarse a la evaluación de la vulnerabilidad (Turner 2003). La vulnerabilidad a las inundaciones es uno de los componentes más importantes de la gestión de riesgos y la evaluación de daños por inundaciones (Connor and Hiroki 2005).

Existe una gran variedad de métodos de evaluación de la vulnerabilidad que difieren en su descripción, marco teórico, variables y metodología. Según trabajos anteriores, los métodos de evaluación de la vulnerabilidad pueden clasificarse en cuatro grupos distintos, que se consideran en este documento (Dapeng Huang 2012):

- Método de indicadores de vulnerabilidad que se adapta a la utilización de los datos disponibles para proporcionar una imagen lógica de la vulnerabilidad del lugar. Este método se utiliza ampliamente en los estudios de vulnerabilidad a las inundaciones y es el preferido por los responsables políticos por su imagen clara de la vulnerabilidad en el espacio, una representación que tiene como objetivo priorizar las medidas y planificar la respuesta al riesgo en una región específica.
- Método de la curva de vulnerabilidad. La relación entre el riesgo de inundación y los elementos en riesgo puede estudiarse mediante curvas empíricas de daños o de fragilidad. Este enfoque se basa esencialmente en datos procedentes de estudios de casos bien documentados, por lo que suele limitarse a las viviendas de una zona específica. Este grupo de método escoge una muestra de artículos en cada clase seleccionada y se organiza una lista de posibles temas.
- Método de datos de pérdidas por catástrofes. Este método se basa en la recopilación de datos de riesgos de inundación reales y su uso como director de los próximos eventos. Este método es un enfoque simple, pero será un poco inexacto debido a los datos registrados de manera desigual, por lo que el resultado de estos métodos debe ser tratado con precaución.
- Métodos de modelización. Los modelos informáticos pueden evaluar la profundidad, la elevación y la velocidad de la inundación utilizando la frecuencia, la magnitud y la forma del hidrograma. Para calcular la inundación, predominan

los modelos unidimensionales (1D) o bidimensionales (2D) que se basan en soluciones de las formas completas o aproximadas de las ecuaciones del agua superficial.

La vulnerabilidad a las inundaciones es una de las causas principales de la devastación humana que crea inseguridad alimentaria, brotes de diversas enfermedades transmitidas por el agua, daños a la productividad de los cultivos y a las infraestructuras. Además, las mujeres y los niños son más vulnerables, ya que el 85% de las muertes de mujeres y niños se producen durante las catástrofes (Neumayer and Plümper 2007). La vulnerabilidad social difiere de un lugar a otro y el nivel de conexión afecta directamente a la implementación de las políticas (Gurney et al. 2017). Por lo tanto, la identificación de la región propensa a las inundaciones es un requisito previo para abordar la vulnerabilidad de las comunidades.

La capacidad de las comunidades para afrontar el impacto de las inundaciones es otro aspecto esencial (Few 2003). Polsky et al. (2007) abordó las distintas dimensiones de la vulnerabilidad y un modelo eficaz para evaluar la vulnerabilidad en términos de estatus socioeconómico. Pelling (1997) examinó la vulnerabilidad a las inundaciones a nivel de los hogares para entender el grado de exposición a las inundaciones entre la comunidad local de Georgetown y cómo se han adaptado los residentes a los daños de las inundaciones. Brouwer et al. (2007) examinó las inundaciones en Bangladesh y observó que contribuyen en gran medida a la vulnerabilidad y a la disparidad de ingresos.

Otros académicos también han realizado importantes intentos para comprender la vulnerabilidad a las inundaciones. (Clark et al. 1998; Balica et al. 2013; Kellens et al. 2013). Walker and Burningham (2011) ha intentado evaluar la vulnerabilidad social a las inundaciones a la luz de estudios de casos anteriores y ha descubierto que la vulnerabilidad social es un resultado de la exposición a las inundaciones. La modelización hidrodinámica y basada en los GIS ha demostrado su eficacia en la evaluación de la vulnerabilidad a las inundaciones. Seenath et al. (2016) destacó que las evaluaciones de la vulnerabilidad a las inundaciones basadas en los GIS son ventajosas para las zonas extensas, mientras que los detalles más finos de las características de las inundaciones pueden examinarse mediante modelos hidrodinámicos. Balica et al.

(2013) identificaron que los enfoques deterministas tienen considerables limitaciones sobre los métodos paramétricos en la evaluación de la vulnerabilidad a las inundaciones. Sin embargo, la integración de estos dos métodos puede interpretar eficazmente el escenario de vulnerabilidad de una región. Estos académicos examinaron el riesgo de inundaciones en una región como un producto de probabilidad y consecuencia.

Diferentes académicos han tratado de cuantificar la vulnerabilidad a las inundaciones en sus trabajos.

Además, varias organizaciones también están desempeñando un papel clave en la cuantificación empírica de la vulnerabilidad a las inundaciones. Por ejemplo, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) ha evaluado la vulnerabilidad a las inundaciones empleando la siguiente ecuación:

Esto implica que la vulnerabilidad a las inundaciones depende directamente de la susceptibilidad de las personas, de los acontecimientos y de su incapacidad para hacer frente a los impactos. Por lo tanto, la vulnerabilidad a las inundaciones se basa en varios elementos, como la gravedad del evento de inundación, el grado de riesgo relacionado con el peligro y los daños asociados al evento. Scheuer et al. (2011) subrayó que, además de los factores socioeconómicos, deben tenerse en cuenta los parámetros ecológicos al abordar la vulnerabilidad a las inundaciones en cualquier región.

II.3 Evolución de los análisis de inundaciones y soluciones

A lo largo de la historia de la humanidad, ha habido un esfuerzo constante por comprender, evaluar y predecir las inundaciones y su impacto. Por lo tanto, los modelos de inundación se desarrollan para cumplir este propósito. Dado que las inundaciones representan una proporción significativa del número total de desastres naturales notificados que ocurren en el mundo y en los últimos 30 años esta proporción ha ido aumentando (Freer et al., 2011), el desarrollo y la aplicación de modelos de inundaciones y la investigación pertinente se han convertido en un esfuerzo global.

Los esfuerzos sistemáticos dentro de la comunidad de investigación desde la década de 1970 han mejorado enormemente la capacidad de modelar inundaciones. Los

modelos se utilizan ampliamente en la cartografía del riesgo de inundaciones (Apel et al., 2006; Dutta et al., 2006), evaluación de daños por inundaciones (Bhuiyanand Dutta, 2012; Merz et al., 2010), previsión de inundaciones en tiempo real (Arduino et al., 2005), ingeniería relacionada con las inundaciones (Gallegos et al., 2009), y planificación de los recursos hídricos (Vaze et al., 2013), además de haber servido como un requisito importante para investigar la erosión de las riberas de los ríos y el transporte de sedimentos en las llanuras aluviales. (Marriott, 1992; Pizzuto, 1987), transporte de contaminantes, ecología de llanuras aluviales (Karim et al., 2015), hidrología del sistema fluvial (Dutta et al., 2013) e hidrología de cuencas (Abbott et al., 1986; Beven, 1989). Combinado con modelos climáticos, modelos hidrológicos y modelos de ríos, la aplicación de modelos de inundaciones se ha extendido a modelos que apuntan a formular estrategias de adaptación climática y mitigación de riesgos. La simulación confiable y robusta de las características de las inundaciones también ha hecho posible planificar de manera efectiva los caudales ambientales para mantener ecosistemas acuáticos saludables.

Hoy en día, las inundaciones se han convertido en la amenaza natural catastrófica suprema con importantes daños económicos y pérdida de vidas, especialmente en las zonas urbanas (Tsubaki and Fujita 2010; Bulti et al. 2019; Natarajan and Radhakrishnan 2019). Las inundaciones en áreas urbanas están asociadas con inundaciones pluviales (Tingsanchali 2012; Bouvier et al. 2017; Rosenzweig et al. 2018; Meng et al. 2019), generalmente ocurre cuando el volumen de esorrentía excede la capacidad de conducción del alcantarillado pluvial. Desde las últimas décadas, las inundaciones pluviales se han considerado cada vez más como una amenaza importante y representan un riesgo sustancial para muchas ciudades. (Fritsch et al. 2016; Rangari et al. 2018).

Se han desarrollado numerosos modelos hidrodinámicos para determinar las condiciones de inundación a través de diversos métodos. Sus aplicaciones también se han realizado a través de herramientas de simulación comercial y de código abierto. (Henonin et al. 2013; Jiang et al. 2015). Desde el punto de vista de la aplicación, las diferentes aplicaciones requieren diversos tipos de información y nivel de precisión.

Los principales procesos explicados en la sección “Precipitación-escorrentía en áreas urbanas” son útiles en el modelado de flujo en entornos urbanos si la descarga es menor que la capacidad de conducción del sistema de alcantarillado pluvial. Sin embargo, cuando se alcanza o se excede la capacidad, se induce el exceso de flujo, se refiere a inundación pluvial. La excedencia puede ocurrir antes de que el agua llegue al sistema de drenaje menor o cuando se produce una salida del sistema, o como una combinación de los dos casos. (Rosenzweig et al. 2018).

Se ha desarrollado la incorporación de la IV dentro de las herramientas de modelado de cuencas con el fin de tener una idea sobre el comportamiento de diferentes prácticas de GI en la gestión de aguas pluviales. Los investigadores y profesionales han utilizado ampliamente las herramientas de modelado de gestión de aguas pluviales para comprender varios aspectos relacionados con las aguas pluviales. Estas herramientas requieren diferentes parámetros específicos del lugar como entradas de captación, el tamaño de la cuenca, la escala, las actividades humanas, el clima y las características naturales. Los resultados de estas herramientas de modelización incluyen la reducción del volumen de escorrentía, la reducción de la tasa de escorrentía y la reducción de la carga contaminante, debido a la aplicación de diferentes prácticas de GI. Algunas de estas herramientas también incluyen módulos para el análisis de los costes de todo el ciclo de vida de la GI. Existen varias herramientas sencillas de hoja de cálculo para el análisis económico de estas prácticas. Sin embargo, en esta revisión, el enfoque principal será tener una discusión sobre las herramientas de modelado que están actualmente en uso para el modelado de la gestión de las aguas pluviales y los aspectos económicos de la GI.

Las herramientas de software se han utilizado para la gestión de los recursos hídricos desde mediados de la década de 1960 y las herramientas de modelado que tienen la capacidad de simular las aguas pluviales 2055, Página 2 de 20 Water Air Soil Pollut (2014) 225:2055 La calidad y la cantidad de la escorrentía empezaron a surgir a partir de La década de 1970 (Zoppou 2001). Después de que se identificaran los controles de GI como un método importante de gestión de las aguas pluviales urbanas, estas herramientas se actualizaron con los componentes que pueden evaluar la eficacia

de las prácticas de GI. El objetivo principal de la mayoría de estas nuevas herramientas era evaluar la capacidad de las prácticas de GI para gestionar la calidad y la cantidad de las aguas pluviales urbanas. Los módulos económicos de estas herramientas incluyen medidas para el análisis de costes y beneficios, costes de funcionamiento, instalación y mantenimiento de las prácticas de GI.

Capítulo III Metodología

Para evaluar el desempeño de la IV para la mitigación de inundaciones, se planteó una metodología que incorpora herramientas de planeación para la toma de decisiones. Por lo tanto, primeramente, se desarrolló un Indicador de Vulnerabilidad Compuesto para la ciudad de Mexicali, Baja California, considerando componentes físicos, sociales y económicos. Con este análisis se logra la identificación de zonas vulnerables a los impactos de inundación, permitiendo a los planeadores urbanos identificar zonas donde la atención a este riesgo es prioritaria.

Este procesamiento permitió la identificación de un caso de estudio donde se evaluará el comportamiento del sistema de drenaje pluvial existente y posteriormente se analizará el impacto que generaría la implementación de IV.

Dicho análisis se elaboró a través del procesamiento de las características hidrológicas en un sistema de información geográfica (SIG) y el análisis de cálculos hidrológicos e hidráulicos del sistema pluvial en el programa HTP de la empresa Termoplus

III.1 Análisis para la ciudad de Mexicali

Para este estudio primeramente se elaboró un análisis de la vulnerabilidad a la inundación dentro de la mancha urbana de la ciudad de Mexicali. El análisis se elaboró utilizando la delimitación oficial de las Áreas Geo-Estadísticas Básicas (AGEB) que se ubiquen dentro del área urbana definida por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Analizar la vulnerabilidad a una escala de AGEB urbano permite asociar estos resultados al ámbito de la planeación urbana dada la información de organismos como INEGI. El resultado del indicador resultante del análisis

Con ese análisis posteriormente se seleccionó un sitio de estudio para el análisis de su sistema pluvial y posteriormente propuestas de solución con IV.

De acuerdo a datos referidos en el Censo de Población y Vivienda de 2010 del INEGI, la población total en Mexicali era de 936,826 habitantes, lo que representa el 29.7% de la población total del Estado de Baja California. La superficie de la subcuenca donde se ubica (Río Nuevo) que desemboca en la frontera con Estados Unidos y tiene una extensión 2066,69 km², y su escurrimiento principal tiene una pendiente promedio de 9.61%. La longitud de su corriente principal es de 47.270 m, y su pendiente es de 3.063%. Cabe mencionar que este estudio considera el tramo del Río Nuevo con una longitud de 14,17 km, ubicado geográficamente en las coordenadas UTM-WGS84-Z11N a 3.608.660,30 m norte y 645.613,80 m oeste (Salazar et al. 2018) .

III.2 Desarrollo del indicador de vulnerabilidad

La metodología compuesta desarrollada por Balica y Wright. 2010, utiliza 71 indicadores en su cálculo. Sin embargo, se reconoce que algunos de estos indicadores pueden ser redundantes o no influir en los resultados (Balica & Wright, 2010). En esta investigación, se procesó un conjunto de variables normalizadas (indicadores) que directa o indirectamente ofrecen una perspectiva hacia la vulnerabilidad contra la inundación.

El indicador fue procesado para representar un valor por cada AGEB dentro de la zona urbana de la ciudad de Mexicali (Figura 1). Los componentes fueron obtenidos en su mayor parte del censo de población 2010 del INEGI, mismo que procesa los datos a escala AGEB. Aquellos componentes físicos que fueron obtenidos de otras fuentes, fueron procesados en SIG para obtener su valor a una escala de AGEB.

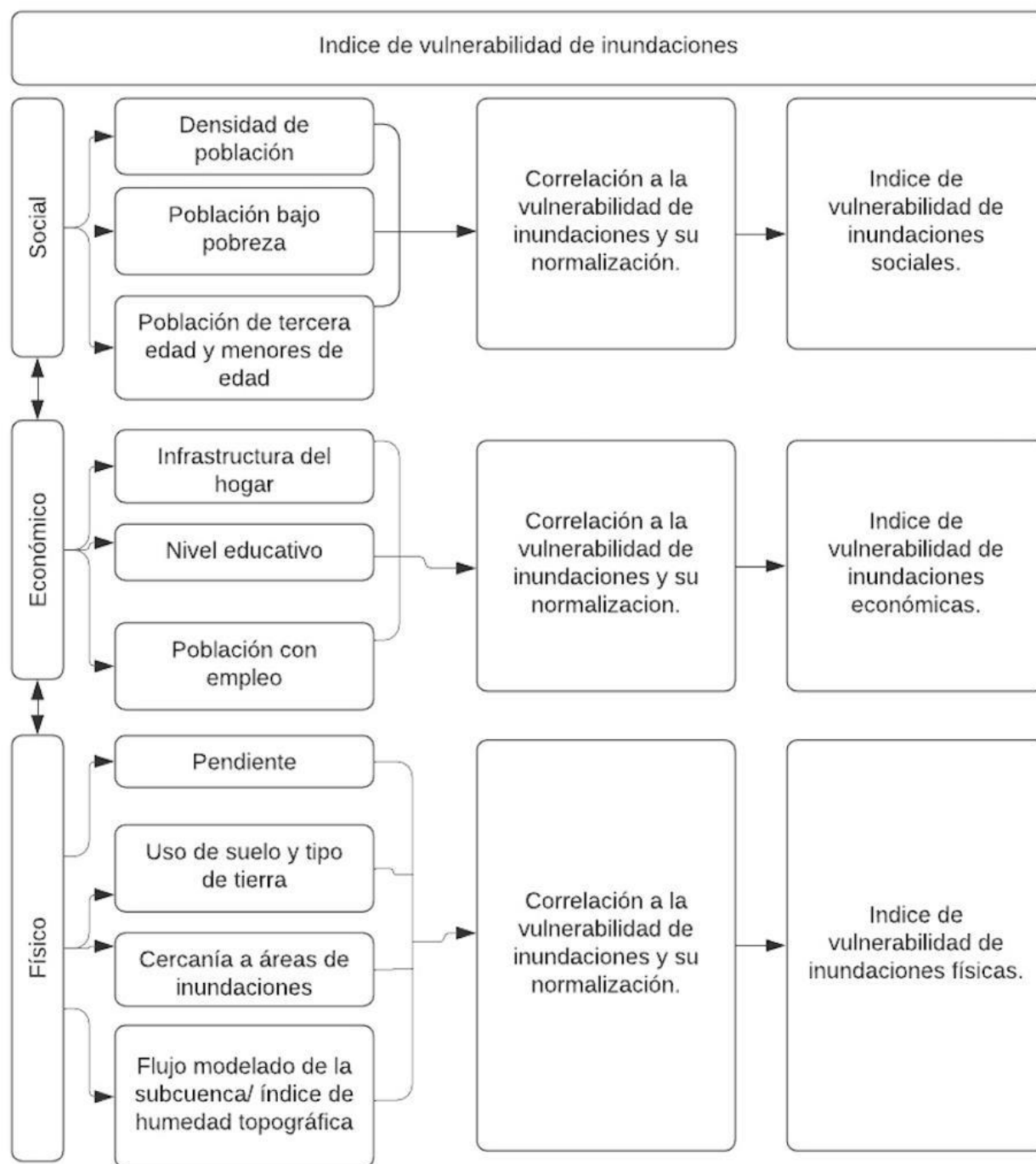


Figura 1 Mapa conceptual de la metodología para calcular el Índice de Vulnerabilidad.

Los componentes y variables generales se seleccionaron teniendo en cuenta investigaciones previas (Balica et al. 2009, Balica et al. 2012). Estas variables se ajustaron de acuerdo con la disponibilidad de datos para la escala AGEB urbana.

III.2.1 Componente Social

El INEGI realiza un censo de población en todo el país, registrando datos principalmente relacionados con la población y sus hogares. Los datos recopilados se clasifican y se puede acceder a ellos públicamente en varias escalas, incluido el AGEB. Dado que la intención de este censo es principalmente información demográfica, es difícil relacionar estos datos con los indicadores de inundaciones más utilizados.

La densidad de población es una de las variables más utilizadas para el índice de vulnerabilidad social. Esta variable se calculó de acuerdo con la población AGEB dentro de su área, y se procesó utilizando la base de datos de población del INEGI junto con herramientas SIG para calcular el área. Las áreas con una alta densidad se correlacionarán positivamente con la vulnerabilidad física.

El censo del INEGI clasifica el número de personas por edad y sexo; esto fue útil para identificar la población de menores y ancianos dentro de cada AGEB. La población considerada en esta clasificación fueron las personas menores de 14 años y las personas mayores de 60 años. Esta variable se correlaciona positivamente con la vulnerabilidad.

La población en situación de pobreza es otra variable comúnmente utilizada para los componentes sociales de la vulnerabilidad (Balica et al. 2009), ya que se supone que las áreas ricas tienen suficientes recursos para hacer frente a los impactos de las inundaciones. Sin embargo, esta variable no se mide directamente en todos los países ya que es relativa a su contexto social; en lugar de a través de esta investigación, se obtuvo mediante el empleo y el acceso a los servicios médicos. Las poblaciones bajo esta condición fueron consideradas para este indicador ya que se correlaciona positivamente con la vulnerabilidad.

Tabla 1 Variables del componente social

<i>Variable</i>	<i>Método de procesamiento</i>	<i>Referencias</i>
<i>Densidad de población</i>	AGEB de población dentro del área	Balica, A. Fekete 2009, Hajar Nasiri and shahram Shahmohammadi-Kalalagh 2013, Schmidtlein et al. 2008, Christoph sebald 2010.
<i>Población de menores de edad y mayores de edad</i>	AGEB de población menor de 14 años y mayor a 60 años	Balica, A. Fekete 2009, Schmidtlein et al. 2008, Christoph sebald 2010, P. Fernandez et al. 2016.
<i>Población bajo la pobreza</i>	AGEB población desempleada y población con acceso a servicios médicos	Balica, A. Fekete 2009, Schmidtlein et al. 2008, Christoph sebald 2010, P. Fernandez et al. 2016.

III.2.2 Componente Económico.

El componente económico representa los ingresos y bienestar de la zona de estudio (Surminski & Oramas-Dorta, 2013). Los datos disponibles para este componente dentro de una escala AGEB son limitados; sin embargo, información como el empleo y el desempleo, las características de la infraestructura del hogar y la educación se pueden obtener como variables económicas.

La población desocupada no es una variable directa que se mide para la unidad AGEB, sin embargo, se mide la población económicamente activa, por lo que se consideró como desocupada la diferencia entre la población total adulta AGEB y la población económicamente activa. Esta variable se relaciona positivamente con el componente económico.

La educación es otra variable disponible para la AGEB; Se ha comprobado que una población con educación superior está más preparada para hacer frente a las inundaciones. Por tanto, esta variable se relaciona negativamente con la vulnerabilidad.

La información sobre infraestructura del hogar es limitada en una escala AGEb; sin embargo, el INEGI considera que las casas con piso de tierra descubierta viven en condiciones de pobreza extrema. Aunque es un caso raro para el área urbana, se consideró como un indicador que se relaciona positivamente con la vulnerabilidad.

Tabla 2 Variables del componente económicos.

<i>Variable</i>	<i>Método de procesamiento</i>	<i>Referencias</i>
<i>Población desempleada</i>	Diferente entre población adulta y población económicamente activa	Balica, Hajar Nasiri and shahram Shahmohammadi-Kalalagh 2013, Najari Naisiri 2016, P. Fernandez et al. 2016, Muhammad Tauhidur rahman Adel S. Aldosary Kh Md Nahiduzzaman Imran Reza 2016
<i>Educación</i>	Población con educación de grado superior	Balica, A. Fekete 2009, Schmidtlein et al. 2008, Christoph sebald 2010, P. Fernandez et al. 2016, Muhammad Tauhidur rahman Adel S. Aldosary Kh Md Nahiduzzaman Imran Reza 2016.
<i>Infraestructura del hogar</i>	Número de hogares con terracería en el AGEb	Balica, A. Fekete 2009, Hajar Nasiri 2016, P. Fernandez et al. 2016, Ismawaty Nur and krishna K. Shrestha 2017.

III.2.3 Componente Físico.

Los países en desarrollo enfrentan una limitación cuando se trata de datos físicos, como series históricas de inundaciones, aforos en caudales, estaciones meteorológicas y otros datos esenciales para el análisis o modelado de inundaciones. Sin embargo, estudios previos como (Salazar et al. 2018) han demostrado que los datos limitados pueden compensarse mediante la implementación de herramientas y métodos especializados. Por lo tanto, los datos hidrológicos e hidráulicos se obtuvieron de investigaciones previas (Salazar et al. 2018) y se procesaron en la escala AGEb (Tabla 3). Este modelo fue desarrollado para obtener un diseño de caudal estimado para

diferentes períodos de retorno, bajo el esquema del análisis de frecuencia regional con el enfoque de L-momentos. Los resultados del modelado hidrológico e hidráulico de la cuenca del Río Nuevo se utilizaron como insumos para identificar las zonas de inundación.

Como se ve en el área de estudio, la cuenca modelada no cubre el área urbana en su totalidad. Para estas áreas, se procesó un índice de humedad topográfica IHT para cada AGEB fuera de la cobertura de la cuenca. El mapa de IHT, elaborado a partir de datos ráster a una escala de 5 x 5 m, fue proporcionado por (Saiz et al. 2019). Luego se calculó un valor medio para cada AGEB como indicador físico. La Tabla 3 muestra las variables utilizadas para este componente.

Los datos de elevación de los rasters del INEGI se descargaron con una resolución de 5 x 5 m; Se procesaron imágenes LIDAR para obtener un modelo de elevación digital completo del área urbana. Usando herramientas SIG, este ráster fue luego procesado para obtener la pendiente media dentro de cada AGEB. Esta variable está directamente correlacionada con las inundaciones, ya que las pendientes más significativas dan como resultado niveles de flujo y velocidad más altos.

El estudio de (Salazar et al. 2018) mostró que el Río Nuevo era un área propensa a inundaciones; por lo tanto, la distancia más cercana de cada AGEB al área de inundación delimitada se consideró como otro indicador físico.

El uso de la tierra y el tipo de suelo son características hidrológicas fisiográficas que impulsan la cantidad de flujo generado dentro de un área; esto se puede considerar cualitativamente utilizando el número curvo NRSC. Este valor se extrajo en cada AGEB del modelo abordado anteriormente.

Finalmente, se extrajo al AGEB el valor de flujo pico de cada una de las subcuencas delimitadas por Salazar et al. (2018). Sin embargo, dado que el área de cobertura de la cuenca no cubre el área urbana completa, se utilizó un mapa de índice de humedad topográfico (Saiz et al. 2019) para evaluar las posibles áreas de inundación. Todas las variables físicas utilizadas impactan positivamente en la vulnerabilidad del componente.

Tabla 3 Variables del componente físico

<i>Variable</i>	<i>Método de procesamiento</i>	<i>Referencias</i>
<i>Pendiente</i>	Modelo de elevación digital LIDAR de alta resolución de 5x5 m, pendiente media dentro de cada unidad AGEB se procesó como un indicador	Balica, Muhammad Tauhidur Rahman Adel S. Aldosary Kh Md Nahiduzzaman Imran Reza 2016
<i>Cercanía al área de inundación</i>	Salazar et al. 2018 identifica el área de inundación dentro de la nueva rivera, Los datos se obtuvieron como la distancia más cercana para cada unidad AGEB.	Balica, Hajar Nasiri y Shahram Shahmohammadi-Kalagh, 2013, Hajar nasiri 2016
<i>Índice de humedad topográfica</i>	Saiz et al. 2019 los datos se procesaron en cada unidad AGEB	Pourali et al. 2014 Aksoy et al., 2016
<i>Uso del suelo y tipo de suelo</i>	Salazar et al. 2019 identificar el número de curvas del uso de tierra y las capas de suelo dentro del área urbana, Luego, el valor se procesó en la unidad AGEB.	Balica, Muhammad Tauhidur Rahman Adel S. Aldosary Kh Md Nahiduzzaman Imran Reza 2016.
<i>Caudal de la subcuenca</i>	Salazar et al. 2015 flujo máximo calculado para cada subbase. estos valores luego se procesaron en la unidad ACEB	Sarchani and Tsanjs, 2019; Patel 2009

III.2.4 Normalización y Correlación de variables.

Para analizar cada variable como indicador comparable en un rango de 0 a 1, se realizó una normalización considerando la correlación de cada variable hacia la inundación. Con esta idea en mente, aquellas variables que proporcionen un grado de resiliencia hacia la vulnerabilidad son consideradas con una correlación positiva.

Las variables de vulnerabilidad normalizadas que tienen en cuenta esta correlación positiva o negativa se calcularon mediante una transformación lineal general.

La fórmula utilizada para aquellas variables positivas relacionadas con la vulnerabilidad fue la siguiente.

$$Z_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

donde Zi representa el valor normalizado de un indicador dentro de su respectivo AGEB i, Xi es el valor sin normalizar de esa variable para el mismo AGEB i, y Xmax y Xmin el valor máximo y mínimo sin normalizar en todos los AGEB para esa variable.

Para aquellas variables con una relación inversa a la vulnerabilidad, la normalización se realizó utilizando

$$Z_i = 1 - \left(\frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \right)$$

III.2.5 Indicador integrado de vulnerabilidad.

Una vez normalizados todos los indicadores en rangos comparables de 0 a 1, para cada AGEB se calculó la vulnerabilidad por componentes social, económico y físico (Vs., Ve, Vf), utilizando una media aritmética de los variables que definen a cada uno (Zi).

$$V_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i$$

$$V_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i$$

$$V_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i$$

Para la combinación de cada uno de los componentes y variables, estas pueden ser combinadas utilizando una media geométrica o una media ponderada otorgando un factor de peso inversamente proporcionales al nivel de incertidumbre del impacto.

La evaluación de la vulnerabilidad ha sido expresada de manera diferente por muchos autores. (Balica et al. 2009, Balica et al. 2012) clasifican las diferentes variables de cada componente en una expresión igualmente ponderada en términos de exposición, susceptibilidad y resiliencia. Otros estudios de vulnerabilidad, como Neumann et al. (Neumann et al. 2014), exploran el uso de diferentes esquemas para el cálculo del FVI, como ponderaciones iguales y un esquema de ponderación según el número de variables en cada componente y ponderaciones aleatorias, los resultados mostraron que existe una buena correlación entre los resultados obtenidos con ambos métodos.

Sin embargo, en un estudio más reciente de (Carrao et al. 2016), se analizaron diferentes esquemas de integración, lo que resultó en utilizar un promedio no ponderado resulta en un mejor desempeño, sus resultados sugieren que el esquema no ponderado es más estable y robusto que otros modelos, y representa de manera eficiente la vulnerabilidad donde no existen estudios previos

Como no existe un estudio previo para la evaluación de la vulnerabilidad en la zona de estudio, el FVI compuesto se calculó como una media aritmética de los tres componentes, de la siguiente manera.

$$IV = \frac{V_s + V_e + V_f}{3}$$

III.3 Caso de estudio el vidrio

De acuerdo al análisis de vulnerabilidad realizado, uno de los sitios con mayor vulnerabilidad en Mexicali es la Colonia El Vidrio ubicada a las orillas de la vialidad Río nuevo, sobre la cual fluye el río embovedado con el mismo nombre. Este Río funciona como el principal colector de escurrimiento pluvial y aguas residuales de la ciudad de Mexicali.

En El Vidrio habitan alrededor de 618 personas en 157 casas. Se contabilizan 100 habitantes por km², con una edad promedio de 25 años y una escolaridad promedio de 9 años cursados. De las 700 personas que habitan en El Vidrio, 200 son menores de 14 años y 200 tienen entre 15 y 29 años de edad. Cuando se analizan los rangos etarios

más altos, se contabilizan 300 personas con edades de entre 30 y 59 años, y 55 individuos de más de 60 años.

Existen documentación de constantes eventos de inundación en esta zona derivado principalmente de la falta de infraestructura pluvial y pavimentación adecuada.

La falta de infraestructura pluvial aunado a las bajas elevaciones que se presentan en la zona ha transformado en el vidrio a una zona altamente vulnerable a eventos de precipitación donde además la falta de pavimentación no permite el correcto flujo superficial, generando inundaciones constantes.

Es importante resaltar que los niveles de elevación den el vidrio se encuentran por debajo incluso del embovedado colector del Río Nuevo.

III.4 Esquema de evaluación de infraestructura pluvial de la Colonia el Vidrio

Para la evaluación de la hipótesis y el cumplimiento con el objetivo principal de esta investigación, se elaboró un análisis de la escorrentía superficial de la Colonia el vidrio con el cual se plantearán 2 propuestas. La primera con el diseño de un sistema pluvial utilizando únicamente infraestructura gris. Para la segunda propuesta, se seleccionaron sitios dentro del vidrio donde es viable técnicamente la instalación de IV. Con la modificación en el uso de suelo por la IV se compararon los resultados de ambas propuestas.

El procesamiento se elaboro mediante la integración de Sistemas de información geográfica (SIG) y el programa de diseño de sistemas de drenaje sustentable HTP de la empresa Termoplus. Primeramente, se caracterizaron las condiciones hidrológicas superficiales de el vidrio. Se obtuvo un Modelo Digital de Elevación (MDE) derivado de un levantamiento con dron, con lo que se procesó y delimito la superficie de la cuenca, así como, los escurrimientos con sus cálculos correspondientes. Esta información se exporto al programa HTP con el que se planteo la red de alcantarillado pluvial diseñada a partir de esta caracterización hidrológica. Se analizo primeramente una propuesta tomando en cuenta los usos de suelo actuales de la zona y sus respectivos coeficientes

de escurrimiento bajo 3 diferentes esquemas de precipitación. Posteriormente se designaron áreas potenciales para la implementación de IV. Dado que el programa HTP no maneja un modulo de IV, se modifico los coeficientes de escurrimiento para simular las acciones de infiltración y aumento en los tiempos de concentración que genera la IV. Finalmente, ambos esquemas fueron comparados y evaluados

En el siguiente esquema se describe la secuencia metodológica para la elaboración de los diseños de ambas propuestas.

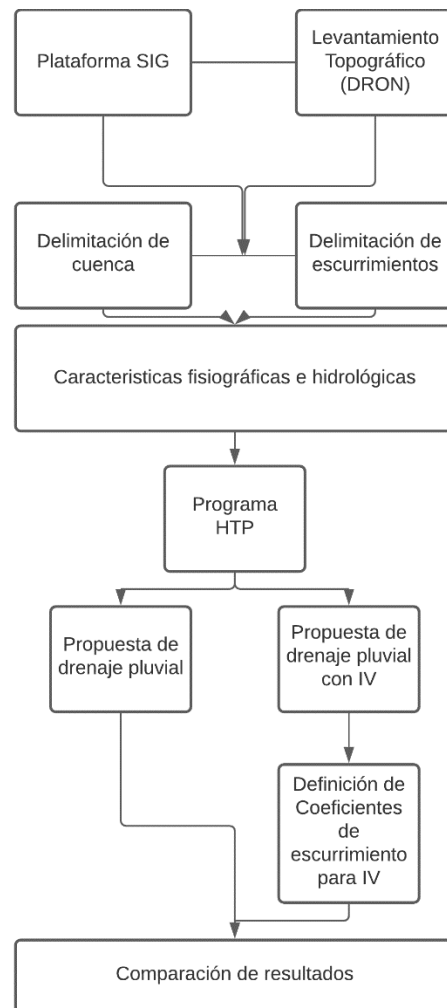


Figura 1. Metodología para la evaluación de infraestructura verde

III.5 Caracterización Hidrológica de la Colonia el Vidrio.

Para el correcto dimensionamiento de los sistemas pluviales propuestos, es necesario primeramente analizar las características hidrológicas del vidrio.

III.5.1 Delimitación de la cuenca

Se analizó primeramente la topografía de la zona mediante el procesamiento de fotogrametría obtenida con un dron marca DJI modelo mavic pro y la toma de puntos de control. Esta información permitió la obtención de un Modelo Digital de Elevación de alta precisión cuya resolución fue de 0.13x0.13 m.

Utilizando herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG) se delimito el área de captación y sus correspondientes escurrimientos. En este mismo sistema se calcularon características fisiográficas de la cuenca como lo son el Área, Tipo de suelo, Usos de Suelo.

El MDE permitió además la identificación de la red de escurrimientos de incidencia en el área de estudio. Se identifico su escurrimiento principal y se calculó su longitud.

Para el cálculo de la pendiente del escurrimiento principal, se seleccionó el método de Taylor-Schwarz con la fórmula utilizada para tramos equidistantes; que se expresa como:

$$S = \left(\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \frac{1}{\sqrt{S_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right)^2$$

Donde m = al número de tramos en los que se dividió el escurrimiento principal y
S = la pendiente de cada tramo.

III.5.3 Análisis de Precipitación

Comúnmente el análisis de la precipitación de estaciones climatológicas es una de las fuentes de información más rescatable en la hidrología. Sin embargo, en regiones áridas como baja california, la información suele estar dispersa e incompleta.

Comúnmente el análisis de la precipitación de estaciones climatológicas es una de las fuentes de información más rescatable en la hidrología. Sin embargo, en regiones áridas como baja california, la información suele estar dispersa e incompleta.

Procesos Como el análisis de frecuencia permiten el correcto cálculo de precipitaciones a diversos periodos de retorno.

Aunado a esta problemática la falta de estaciones con registro continuo (Pluviógrafos) dificulta la caracterización del comportamiento horario de eventos de precipitación y por ende el cálculo de la intensidad se dificulta.

Para el presente proyecto se elaboró primeramente un análisis de frecuencias de la precipitación histórica de la estación 2033 Mexicali (DGE) operada por CONGUA.

Se analizaron diferentes funciones de distribución y se evaluó el comportamiento de las probabilidades para la selección de la función que mejor represente la base de datos utilizada.

En la siguiente tabla se muestran las funciones de densidad de probabilidad que analiza la herramienta HTP.

Tabla 4 Distribución de probabilidad para el ajuste de información hidrológica.

Distribucion	funcion de densidad de probabilidad	Rango	Ecuaciones de parametros en terminos de los momentos de la muestra
normal	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}$	$-\infty \leq x \leq \infty$	$\mu = \bar{x}, \sigma = S_x$
Log-normal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right)}$	$x > 0$	$\mu_y = \bar{y}, \sigma_y = S_y$
Exponencial	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$	$x \geq 0$	$\lambda = \frac{1}{\bar{x}}$
Gamma	$f(x) = \frac{\lambda^\beta x^{(\beta-1)} e^{-\lambda x}}{\Gamma(\beta)}$	$x > 0$	$\lambda = \frac{\bar{x}}{S_x^2}$ $\beta = \frac{\bar{x}^2}{S_x^2} = \frac{1}{CV^2}$
Pearson tipo III (Gamma de tres Parametros)	$f(x) = \frac{\lambda^\beta (x-\epsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(x-\epsilon)}}{\Gamma(\beta)}$	$x > \epsilon$	$\lambda = \frac{S_x}{\sqrt{\beta}}, \beta = \left(\frac{2}{C_s}\right)^2$ $\epsilon = \bar{x} - S_x \sqrt{\beta}$
Log-Pearson tipo III	$f(x) = \frac{\lambda^\beta (x-\epsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(x-\epsilon)}}{\Gamma(\beta)}$ Donde $y = \log x$	$\log x > \epsilon$	$\lambda = \frac{S_y}{\sqrt{\beta}}, \beta = \left(\frac{2}{C_s(y)}\right)^2$ $\epsilon = \bar{y} - S_y \sqrt{\beta}$ suponiendo que $c, (y)$ es positivo
Valor extremo tipo I	$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{\left[-\frac{x-u}{\alpha}\right]} e^{\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)}$	$-\infty < x < \infty$	$\alpha = \frac{\sqrt{6S_x}}{\pi}$ $u = \bar{x} - 0.5772 \alpha$

El análisis de frecuencia, así como cálculos hidrológicos e hidráulicos del proyecto se realizaron utilizando la herramienta HTP. El software HTP 2021, cuenta con una lista de rutinas que ayudan a realizar de una forma rápida los diseños y la preparación de planos para Sistemas de Alcantarillado Sanitario y Pluvial. En sus versiones actualizadas permiten además la interacción con datos provenientes de SIG.

Una vez calculadas las precipitaciones es necesario el cálculo de la intensidad de estos eventos de precipitación. Como se comentó, las estaciones climatológicas no permiten el cálculo de esta variable por lo que se optó por aplicar el método Chen (1983)

III.6 Propuesta de red de alcantarillado pluvial y áreas de captación

Una vez identificada la cuenca superficial e identificados los escurrimientos, se planteó un diseño de red de alcantarillado pluvial, tomando en cuenta elementos como la elevación, la distribución de las vialidades y manzanas, cambios de dirección e intersecciones.

Para el cálculo hidráulico dentro de la red propuesta primeramente se delimitaron áreas de captación para cada tramo del sistema, asignando a cada una un coeficiente de escurrimiento compuesto por las diferentes configuraciones de cobertura dentro de la zona.

Se obtuvieron gastos para cada una de las áreas de captación utilizando el método racional americano para periodos de retorno de 5, 15 y 50 años.

Actualmente es el método más empleado y de mayor aplicación para diseño de sistemas de drenaje urbano además de ser adecuado para analizar sistemas urbanos que drenen áreas relativamente pequeñas (Gómez,2007).

En el presente proyecto la ecuación del método racional se describe como:

$$Q = 0.278 CIA$$

Donde:

Q = Al gasto en m³/s de cada tramo

C= Al coeficiente de escurrimiento compuesto para cada área (adimensional)

A= El área de captación de cada tramo en km²

I= La intensidad en mm/h asociada a los diferentes periodos de retorno y al tiempo de concentración de la cuenca del escurrimiento principal de la zona.

Los cálculos de los parámetros hidráulicos, así como el dimensionamiento de los diámetros de tubería se realizaron siguiendo la ecuación propuesta por Manning (1889) donde:

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

Donde:

V=Velocidad m/s

n =Coeficiente de rugosidad o de Manning (adim)

R =Radio hidráulico m

S = Pendiente

La ecuación de Manning es la más conocida y utilizada por su simplicidad de aplicación, cabe señalar que su aplicación se restringe a flujo turbulento.

III.7 Evaluación de infraestructura verde

Dentro del paquete de herramientas digitales utilizadas para la evaluación y diseño de alcantarillado pluvial, son pocas las que integran algún módulo de elementos de IV nativo. La IV en conjunto con un sistema pluvial tradicional aumenta los tiempos de concentración y fomenta la infiltración en los suelos permeables. Por lo tanto, incrementan las pérdidas que experimenta en el escurrimiento, dichas perdidas se pueden ver reflejadas en el coeficiente de escurrimiento (Fiori & Volpi, 2020).

Para el presente estudio se incorporara el análisis la infraestructura verde, a través de la determinación de áreas viables para su implementación y la modificación de sus coeficientes de escurrimiento seleccionados a partir de referencias literarias donde se han implementado previamente.

Capítulo IV Resultados

IV.1 Análisis de vulnerabilidad

Para solucionar los problemas asociados a la de la optimización de la planeación urbana, los tomadores de decisiones buscan diversas formas de buscar las soluciones en función de las previsiones del resultado de cada alternativa analizada, modelándola como una herramienta de vital importancia entre el desarrollo urbano, gestión de riesgos, servicios ecosistémicos, medio ambiente y bienestar social. Esto es necesario para pasar de un enfoque disciplinario, ya sea de las ciencias sociales o de las ciencias naturales, como se ha venido realizando tradicionalmente, a un enfoque holístico, que resuelva de manera integral los procesos de planificación urbana, logrando una mejora en la calidad de vida de la población, reduciendo el riesgo de inundaciones y contribuyendo a la protección del medio ambiente. Es por ello que en esta investigación se le dio el mismo peso a las variables económicas, físicas y sociales, para actuar como puente entre los diferentes enfoques y posibilitar la toma de decisiones sobre los diferentes actores y la comunidad.

Se evaluaron los resultados para cada uno de los componentes, identificando las áreas más vulnerables para cada uno y para el Índice de Vulnerabilidad Compuesto. Se utilizó un total de 329 unidades AGEB correspondientes al área urbana como unidad de escala para calcular el IVC.

IV.1.1 Componente Social

El INEGI realiza un censo de población en todo el país, registrando datos mayoritariamente relacionados con la población y sus hogares. Los datos recopilados se clasifican y se puede acceder a ellos públicamente en varias escalas, incluida la AGEB. La información de estos indicadores permitió conformar un componente que refleje el estado social al que se expone cada uno de los AGEBS.

El valor promedio de vulnerabilidad social sobre todas las unidades AGEB resulto en 0.41. Evaluando los datos correspondientes a la Figura 3, se encontró que 167 de las unidades AGEB presentan una vulnerabilidad que se encuentra por encima del valor medio. Estas unidades AGEB presentan la mayor concentración poblacional, y el valor más vulnerable encontrado fue 0,75.

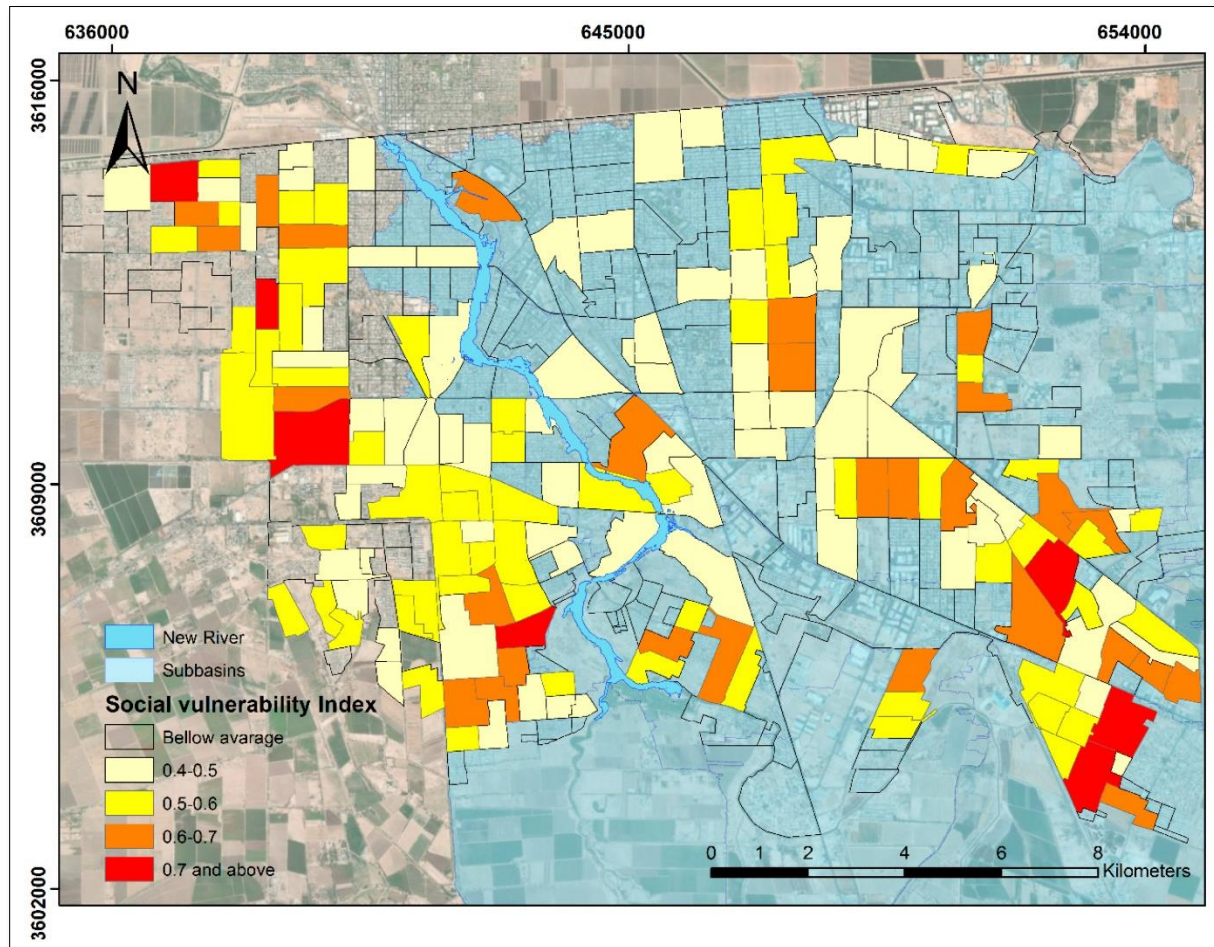


Figura 2. AGEBs con vulnerabilidad social por encima de la media,

IV.1.2 Componente económico

Las variables del componente económico en una escala unitaria AGEB son limitadas. Sin embargo, el componente se abordó con éxito con los datos disponibles, aunque un estudio futuro podría implementar encuestas para dar cuenta de la falta de

datos a esta escala. Los resultados mostraron que la vulnerabilidad económica promedio es 0.39; esto significa que 46% de las unidades AGEB se ven afectadas por una vulnerabilidad por encima del promedio (Figura 5).

Esta área de afectada por una mayor vulnerabilidad se relaciona principalmente con la variable población ocupada. Sin embargo, esto no significa necesariamente que toda la población esté desempleada, ya que los datos de la AGEB corresponden solo a actividades formales que incluyen la seguridad social. Este hecho significaría que no todas las actividades informales se consideran en la variable como trabajo fijo. En cuanto a la variable de infraestructura domiciliaria, los resultados mostraron una menor vulnerabilidad, ya que la mayoría de las áreas urbanas de la ciudad cuentan con servicios básicos, calles pavimentadas y edificación a base de concreto. El patrón de distribución espacial de este componente se aborda en la Figura 6.

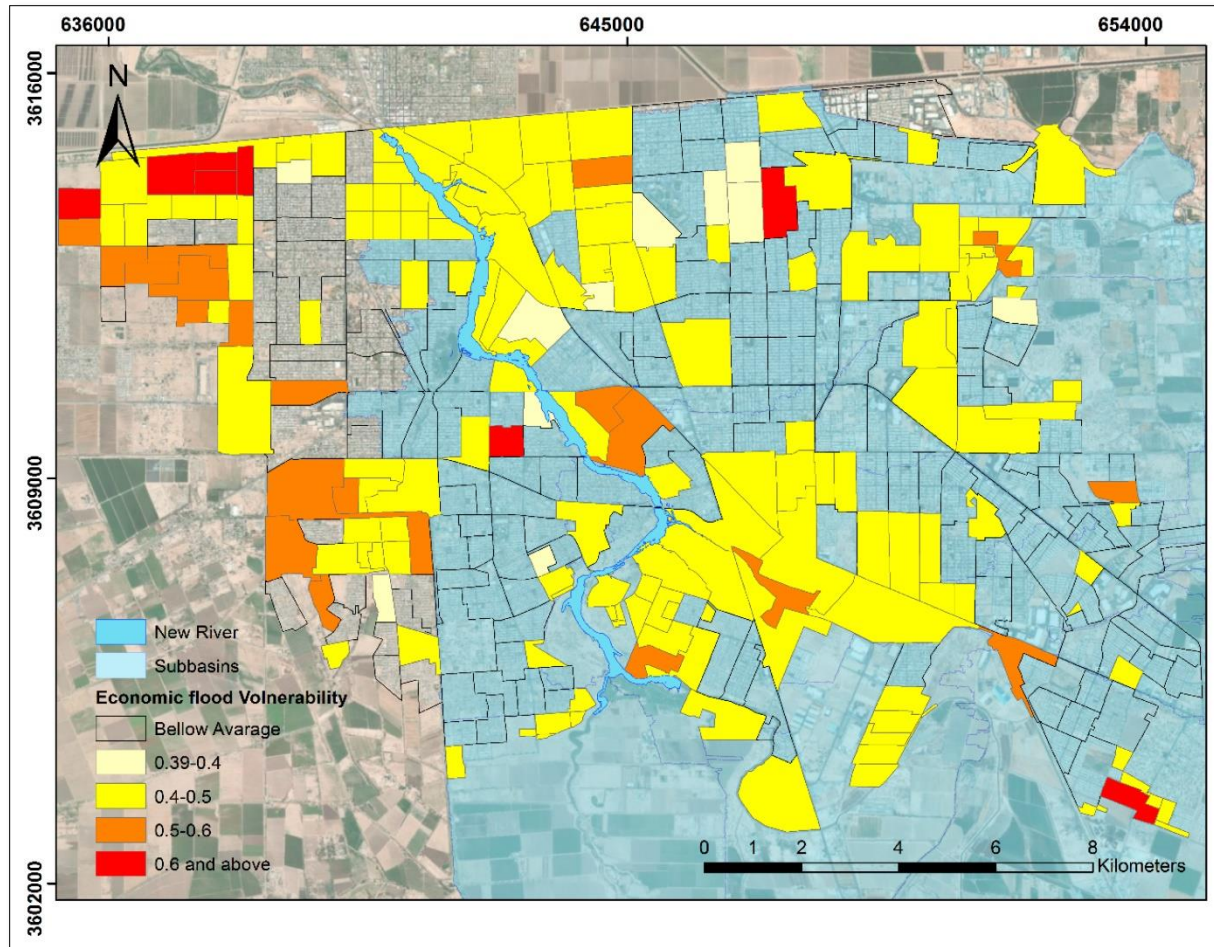


Figura 3. AGEBS con vulnerabilidad económica por encima de la media

IV.1.3 Componente Físico

Como se esperaba para un área urbana dentro de una cuenca hidrográfica, el componente de vulnerabilidad física, compuesto principalmente por variables hidrológicas e hidráulicas, afecta a un área significativa del área urbana. Un total de 65% de las unidades AGEB (Figura 7) o un total de 213 presenta valores de vulnerabilidad física que están por encima del valor promedio de 0.64. El área urbana se ve afectada por la corriente principal del Río Nuevo, que crea un entorno susceptible para la vulnerabilidad física dentro de su cauce. Es fundamental señalar que el nuevo río es la principal salida del sistema de drenaje urbano. Este factor hace que el uso de datos modelados sea esencial, especialmente en áreas con características similares.

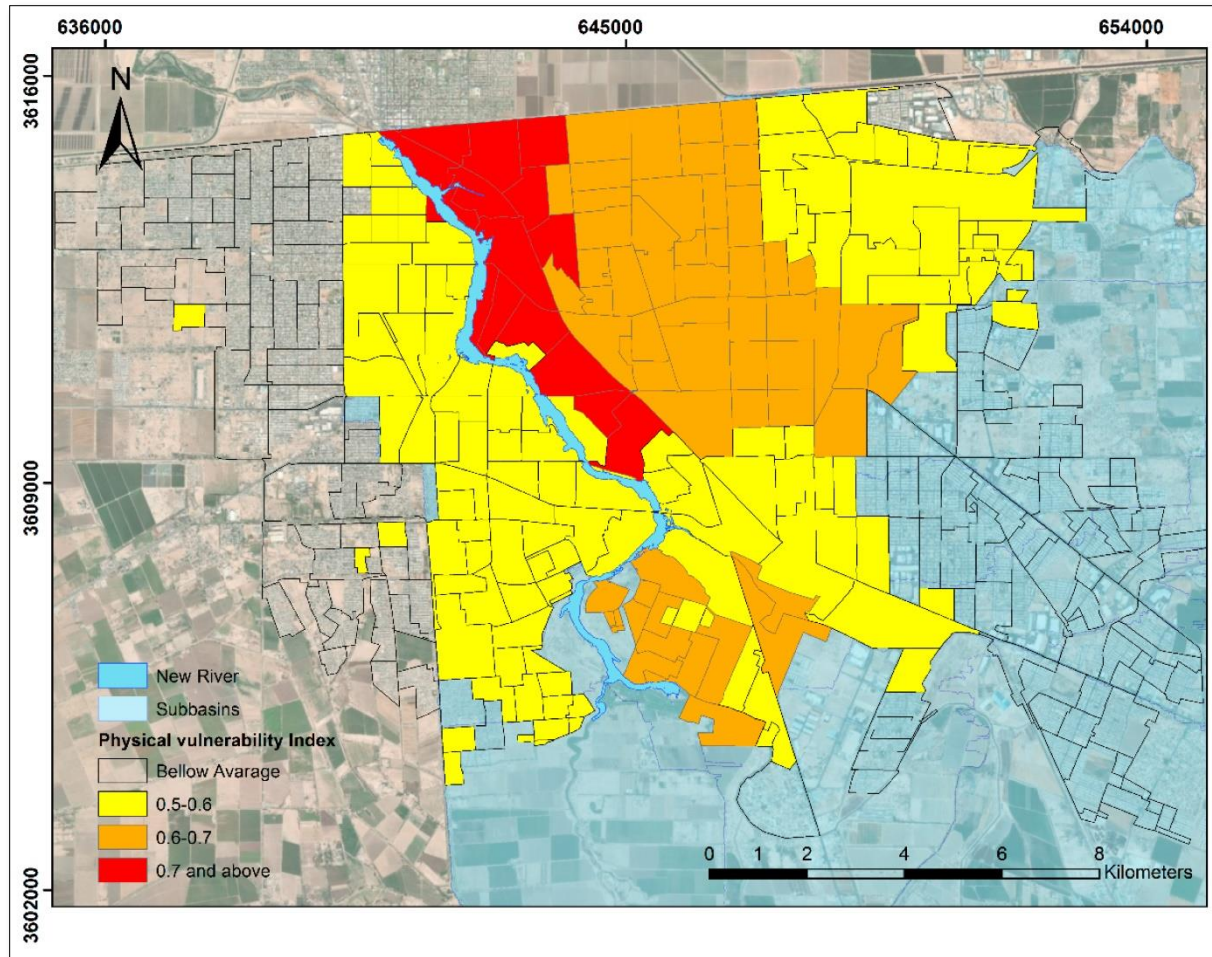


Figura 4 AGEBS con vulnerabilidad física por encima de la media.

Analizando las variables, la variable uso de suelo y tipo de suelo fueron las más vulnerables. Dado que esta variable se abordó con la CN, se puede apreciar que la falta de vegetación y la alta concentración de áreas impermeables es la razón de esta alta vulnerabilidad. Los resultados generales de la vulnerabilidad física ser tomados en cuenta para definir áreas donde se debe considerar la implementación de proyectos que promuevan áreas de vegetación como parques o IV para mejorar la resiliencia.

Como se observa en la distribución espacial de este componente (Figura 8), la influencia de las subcuencas afecta a las unidades AGEBS que son más vulnerables. Las unidades AGEBS cercanas al río son las más vulnerables físicamente.

Las áreas fuera de la influencia de la subcuenca se analizaron utilizando el TWI. Esta herramienta se ha utilizado antes para identificar áreas propensas a inundaciones. Aunque es un producto del procesamiento de datos ráster de elevación, se puede implementar en áreas donde los datos de modelado hidrológico no están disponibles, o donde es difícil desarrollar uno nuevo debido a la falta de información de monitoreo.

IV.1.4 Indicador Compuesto de Vulnerabilidad

Los resultados de indicador compuesto a inundaciones se analizan espacialmente en la Figura 9. Las unidades AGEB con valores de vulnerabilidad más altos se ubican dentro de los límites de la subcuenca, delimitados por el modelo hidrológico. Sin embargo, algunas unidades AGEB con valores altos también se pueden encontrar fuera de esta subcuenca, lo que denota la importancia de utilizar un índice de vulnerabilidad compuesto. Si bien algunas unidades AGEB dentro de los tramos de la subcuenca presentan alta vulnerabilidad física, como las cercanas al cauce principal del Río Nuevo, al analizar el mapa compuesto del FVI, no muestran la mayor vulnerabilidad, principalmente debido a la situación económica y social. componentes. Además de esto, algunos altamente vulnerables de la corriente principal.

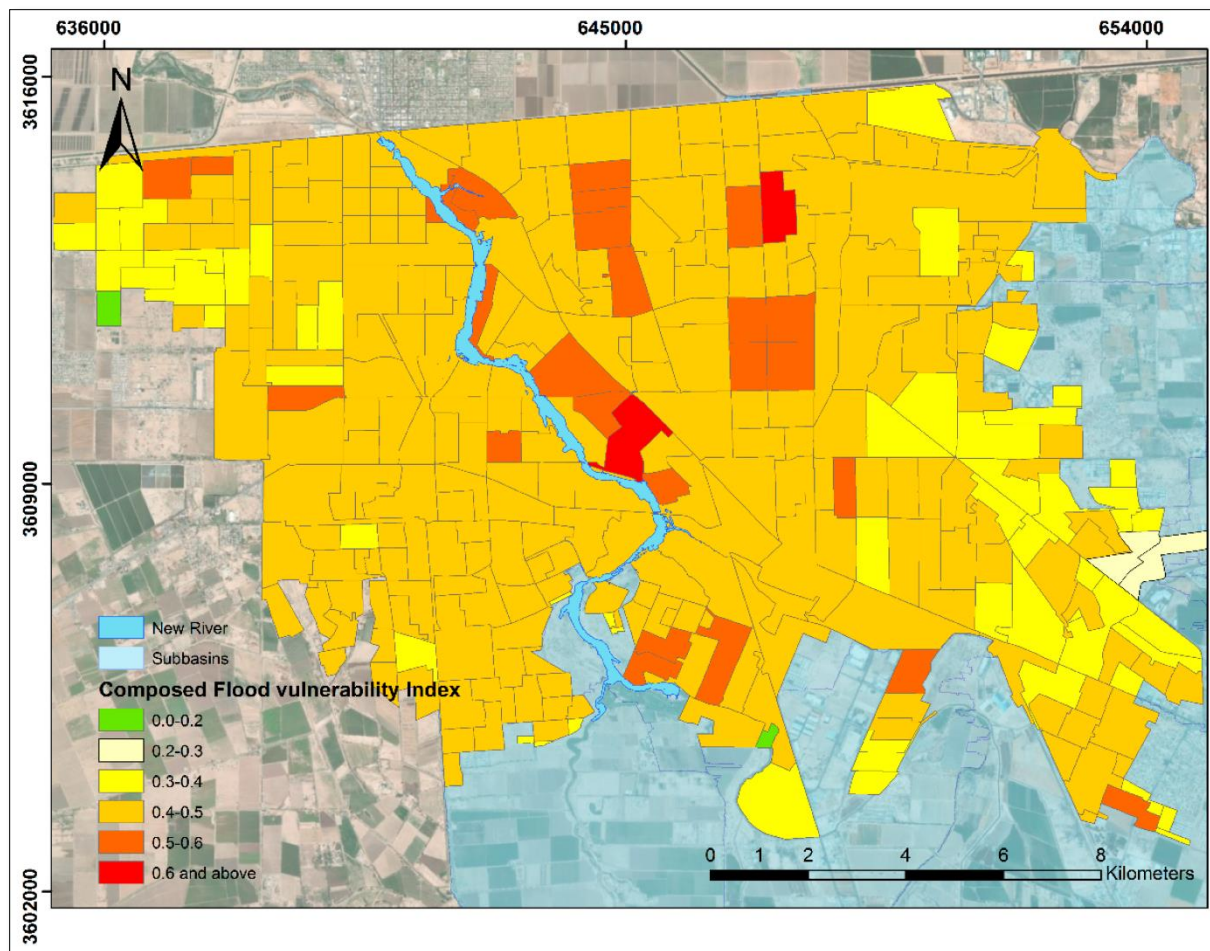


Figura 5. Distribución espacial del Indicador de Vulnerabilidad Compuesto de inundaciones.

Estadísticamente hablando, la vulnerabilidad promedio para el FVI compuesto fue 0.42. Un 55% de las unidades AGEB presentan vulnerabilidad superior al promedio, con un total de 182 unidades AGEB y 476,331 habitantes expuestos a impactos de inundaciones. Estos AGEBS se muestran en la Figura 11.

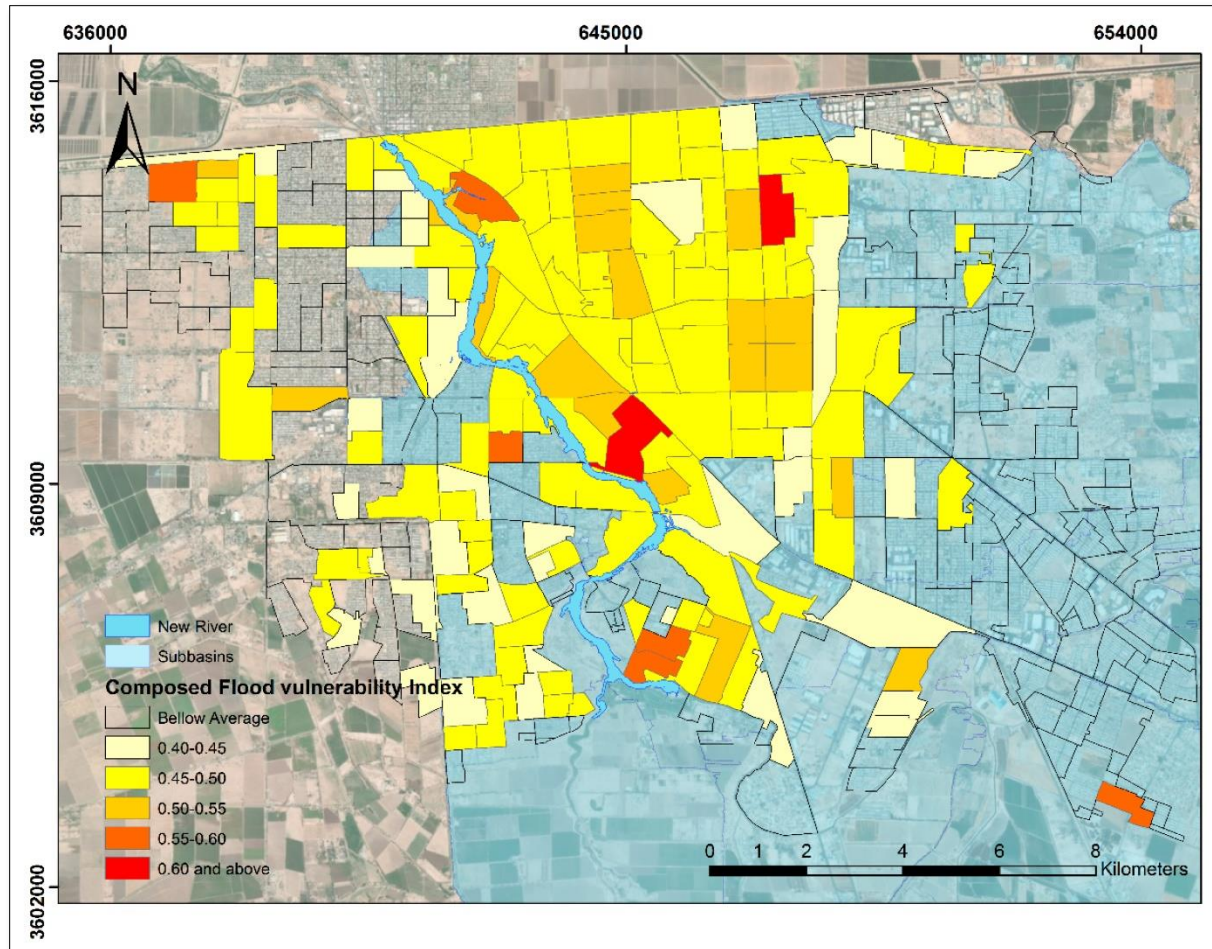


Figura 6. Distribución espacial de los AGEBS con valores de vulnerabilidad compuesta por encima de la media.

Como se mencionó anteriormente, la delimitación de las subcuencas no necesariamente compone las zonas de mayor vulnerabilidad y los resultados muestran áreas altamente vulnerables fuera de las subcuencas.

Por lo general, en los países en desarrollo, los responsables de la toma de decisiones basan sus planes urbanos en desarrollo analizando principalmente en componentes demográficos y socioeconómicos. Como lo demuestran los resultados, estos componentes socioeconómicos impactan drásticamente en la vulnerabilidad a las inundaciones dentro de un área. Sin embargo, los resultados compuestos muestran que la mejor manera de abordar la vulnerabilidad es mediante el uso de componentes multidisciplinarios que incluyen datos de modelado de componentes físicos.

IV.2 Caracterización Hidrológica de la Colonia el Vidrio.

Utilizando el modelo digital de elevación de resolución 10x10 cm generado del levantamiento con dron, se delimitaron 2 áreas de captación con influencia superficial en la Colonia El Vidrio.

IV.2.1 Delimitación de la cuenca

En la figura 7 se observan los principales escurrimientos delimitados, así como el perímetro de ambas áreas de captación.

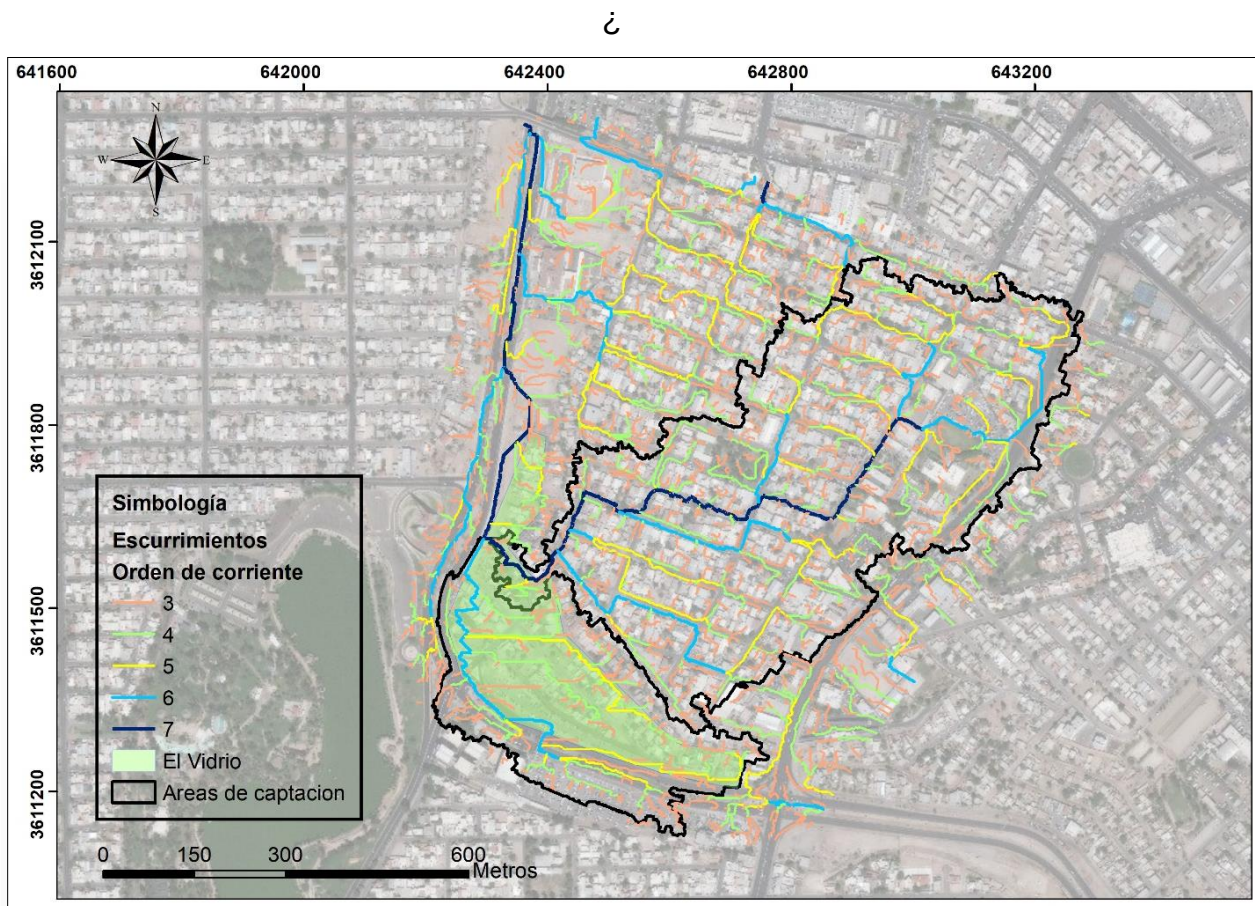


Figura 7. Delimitación de cuencas y escurrimientos principales de El Vidrio

Podemos observar que el área del vidrio se ubica en la cuenca que se ubica al sur de la **figura 7**. El parte aguas que divide ambas cuencas entre las calles Diamante y Mar Tirreno está conformado por un claro desnivel generado por el mismo perfil del cauce del Río nuevo. Para el presente estudio nos referiremos a estas cuencas como cuenca alta y cuenca baja respectivamente.

La cuenca baja es la más susceptible a eventos debido a la distribución de elevaciones, las cuales en algunos puntos son incluso más bajas que las rasantes en el eje del Río Nuevo, impidiendo así el saluda natural de los escurrimientos.

Aunado a esto, la falta de infraestructura pluvial en la cuenca baja, no permite el comportamiento de las pendientes de las vialidades que deberían transportar los escurrimientos fuera de la cuenca.

En la figura XX y xx se identifican las zonas que por sus elevaciones son susceptibles a inundaciones y encharcamientos.

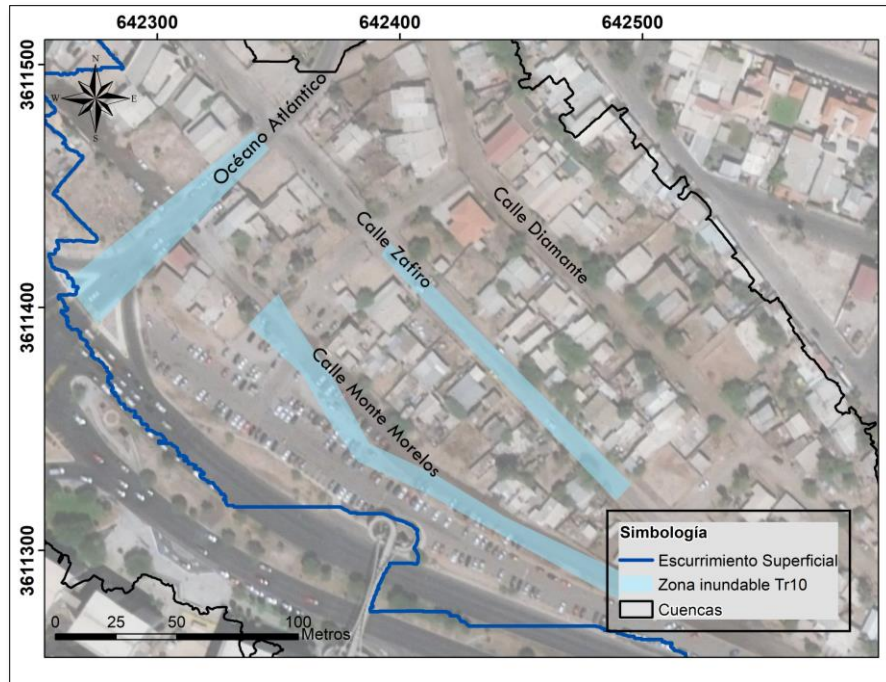


Figura 8. Zonas susceptibles a inundaciones y encharcamientos.

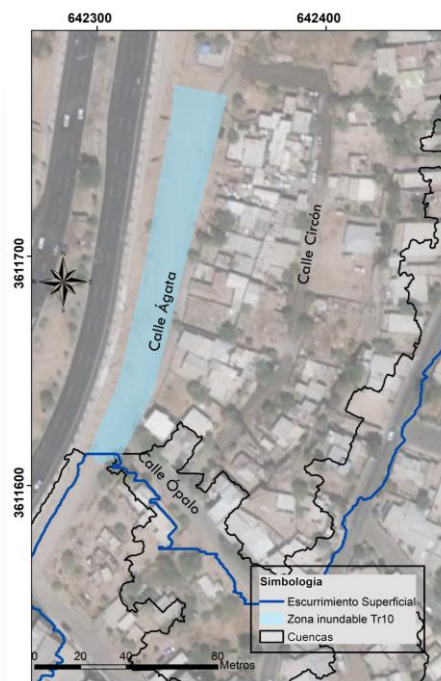


Figura 9. Zonas susceptibles a inundaciones y encharcamientos.

La cuenca alta presenta un contraste en cuanto a sus elevaciones así como a la infraestructura. Esta zona a diferencia del vidrio en su cuenca baja, si cuenta con sistema pluvia,

Por lo anterior, la propuesta se ubicará en la zona de la cuenca alta como se muestra en la figura XX

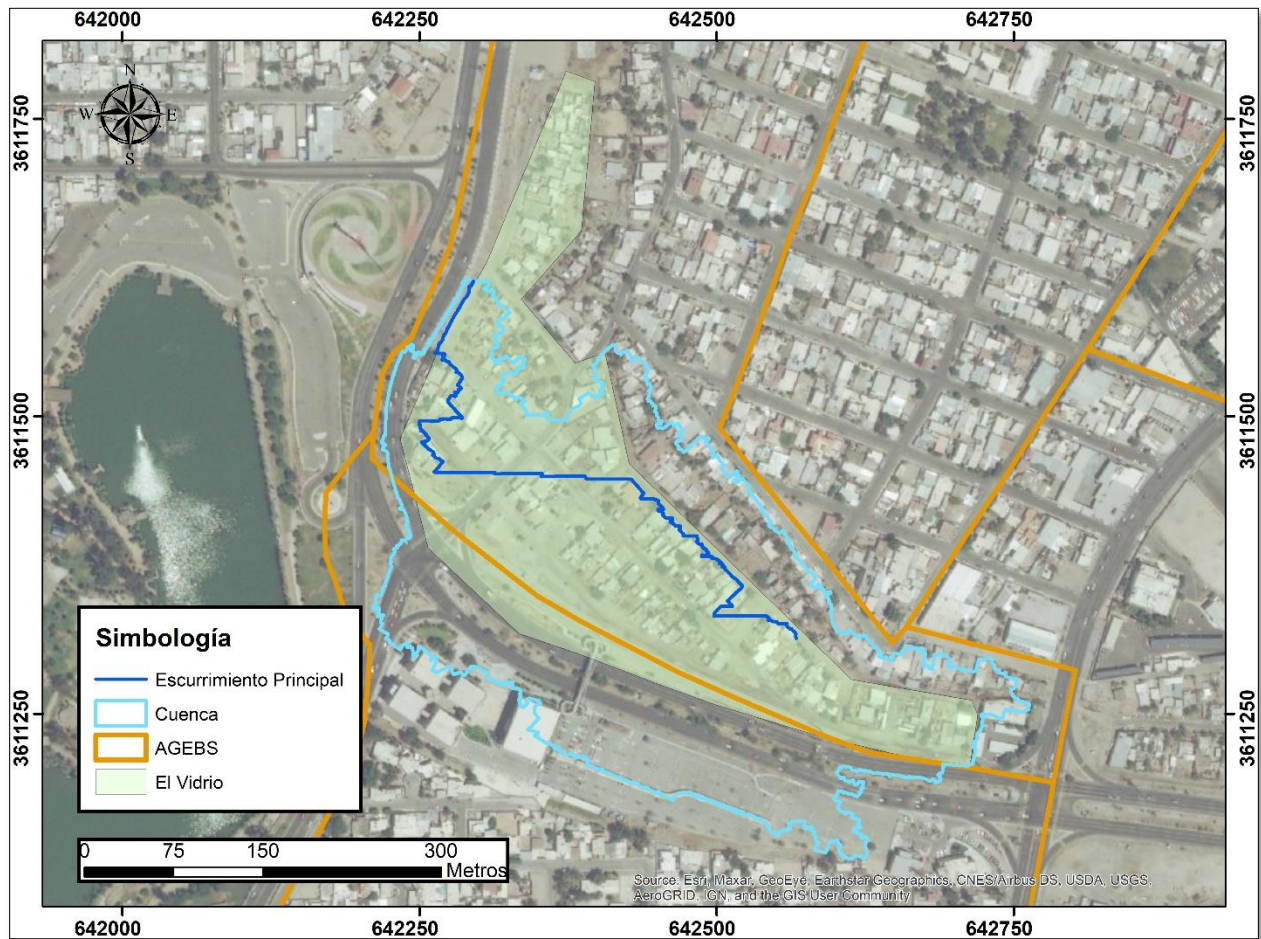


Figura 10. Cuenca y escurrimientos para la elaboración de los cálculos hidrológicos e hidráulicos en El Vidrio

IV.2.2 Análisis de precipitación.

El análisis de precipitación se elaboró a partir de estaciones climatológicas operadas por CONAGUA cercanas el sitio. Un análisis de polígonos de Thiessen permitió la identificación de aquellas estaciones con influencia en la zona de estudio.

Con este análisis se idéntico la estación 2033 Mexicali DGE. Se procesaron los datos máximos diarios anuales para la generación de una base de datos con la que se calcularan las precipitaciones e intensidades asociadas a diversos periodos de retorno.

La estación cuenta con datos de 1944 a 2012, un total de 67 datos que fueron utilizados para el análisis de frecuencia.

Tabla 5 Datos de la estación 2033
Mexicali DGE.

DATOS DE LA ESTACIÓN	
<i>Año</i>	<i>Precipitation en mm</i>
1944	20.3
1945	16.90
1948	24.30
1949	6.70
1950	6.20
1951	17.80
1952	8.00
1953	7.00
1954	8.00
1955	29.80
1956	3.60
1957	37.00
1958	22.00
1959	13.50
1960	18.00
1961	34.50
1962	31.00
1963	29.00
1964	8.60
1965	19.50
1966	10.50
1967	36.50
1968	15.00
1969	17.60
1970	16.80
1971	10.50
1972	55.50
1973	11.00
1974	15.30
1975	17.90
1976	37.30
1977	62.00
1978	29.50

DATOS DE LA ESTACIÓN	
<i>Año</i>	<i>Precipitation en mm</i>
1979	26.90
1980	16.70
1981	16.20
1982	50.20
1983	32.90
1984	14.80
1985	18.40
1986	48.00
1987	11.10
1988	30.80
1989	14.00
1990	17.10
1991	17.20
1992	73.80
1993	28.00
1994	17.30
1995	17.30
1996	7.30
1997	45.60
1998	11.40
1999	22.70
2000	6.60
2001	8.00
2002	2.30
2003	11.40
2004	22.00
2005	35.70
2006	2.80
2007	35.00
2008	22.10
2009	4.60
2010	31.00
2011	44.90
2012	23.50

La siguiente tabla muestra el error estándar de las diferentes funciones de densidad de probabilidad de los eventos de precipitación. Esto permite identificar la función que representa de mejor manera las probabilidades asociadas a la estación de análisis.

Tabla 6 Error estándar de la densidad de probabilidad de los eventos de precipitación.

Error Estandar	
<i>Método</i>	Error Estandar
<i>Nash</i>	2.46
<i>Gumbel</i>	2.10
<i>Exponencial con b y x0</i>	2.88
<i>Log Normal 2</i>	2.37
<i>Gamma 2</i>	1.96
<i>Normal</i>	5.22
<i>Exponencial con b</i>	6.49

Tomando en cuenta lo anterior se utilizó la función de distribución Gamma tipo 2, con las que se calcularon las diferentes precipitaciones de diseño ajustadas a diferentes periodos de tiempo de acuerdo a la ecuación de Chen.

Tabla 7 Precipitaciones de diseño ajustadas a diferentes periodos de tiempo.

Precipitación												
<i>Tr/Minutos</i>	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	2.362	3.602	4.471	5.153	5.722	6.215	6.653	7.048	7.41	7.745	8.057	8.35
5	3.566	5.438	6.749	7.779	8.638	9.382	10.043	10.639	11.186	11.691	12.162	12.605
10	4.477	6.826	8.472	9.765	10.844	11.778	12.607	13.356	14.042	14.676	15.268	15.823
20	5.387	8.215	10.196	11.752	13.05	14.174	15.172	16.073	16.898	17.662	18.374	19.042
25	5.681	8.662	10.751	12.391	13.76	14.945	15.997	16.948	17.818	18.623	19.373	20.078
50	6.591	10.05	12.474	14.378	15.966	17.341	18.562	19.664	20.674	21.608	22.479	23.297
100	7.502	11.439	14.197	16.364	18.172	19.737	21.126	22.381	23.53	24.593	25.585	26.516
200	8.413	12.827	15.921	18.351	20.378	22.133	23.691	25.098	26.387	27.579	28.69	29.734
500	9.616	14.663	18.199	20.976	23.294	25.3	27.081	28.689	30.162	31.525	32.796	33.989
1000	10.527	16.051	19.922	22.963	25.499	27.696	29.645	31.406	33.019	34.51	35.902	37.208
2000	11.438	17.44	21.646	24.949	27.705	30.092	32.209	34.123	35.875	37.496	39.007	40.426
5000	12.641	19.275	23.924	27.575	30.621	33.259	35.599	37.714	39.651	41.442	43.113	44.681

<i>Intensidad</i>												
<i>Tr/Minutos</i>	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	28.349	21.612	17.883	15.459	13.734	12.431	11.405	10.572	9.88	9.294	8.789	8.35
5	42.794	32.625	26.996	23.337	20.732	18.765	17.216	15.959	14.914	14.029	13.268	12.605
10	53.722	40.956	33.89	29.296	26.026	23.556	21.612	20.034	18.723	17.612	16.656	15.823
20	64.65	49.287	40.783	35.256	31.32	28.348	26.009	24.109	22.531	21.194	20.044	19.042
25	68.168	51.969	43.002	37.174	33.024	29.891	27.424	25.421	23.757	22.347	21.135	20.078
50	79.095	60.3	49.896	43.133	38.318	34.682	31.82	29.497	27.565	25.93	24.523	23.297
100	90.023	68.631	56.789	49.092	43.612	39.474	36.216	33.572	31.374	29.512	27.911	26.516
200	100.951	76.962	63.683	55.052	48.906	44.266	40.612	37.647	35.182	33.094	31.299	29.734
500	115.396	87.975	72.796	62.929	55.905	50.6	46.424	43.034	40.217	37.83	35.777	33.989
1000	126.324	96.306	79.689	68.888	61.199	55.391	50.82	47.109	44.025	41.412	39.165	37.208
2000	137.251	104.637	86.583	74.848	66.493	60.183	55.216	51.185	47.833	44.995	42.553	40.426
5000	151.697	115.65	95.695	82.725	73.491	66.517	61.028	56.572	52.868	49.731	47.032	44.681

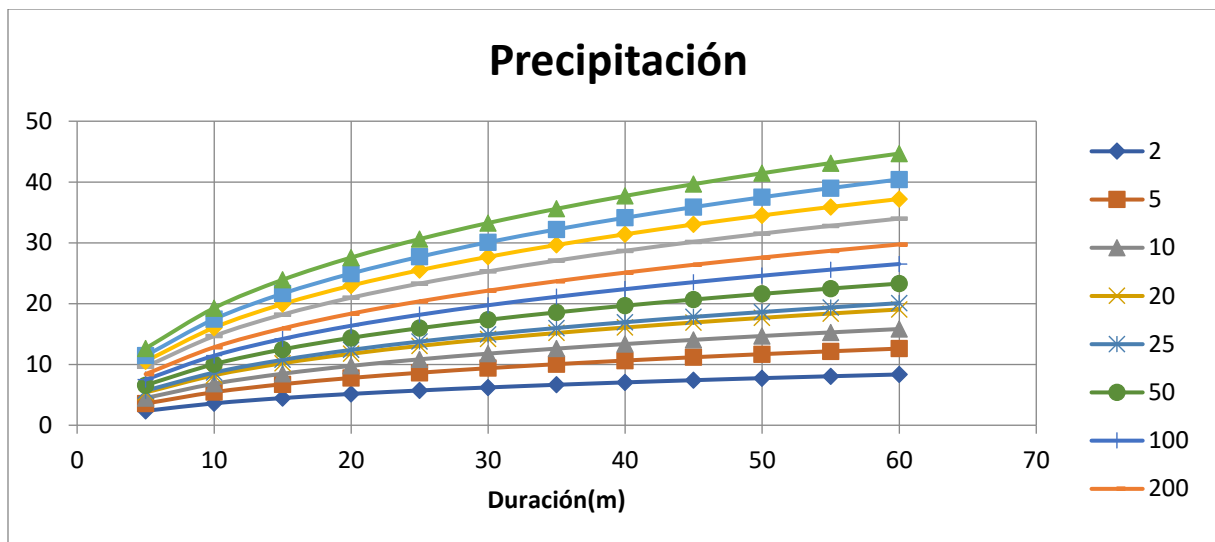


Figura 11. Volúmenes de precipitación a diferentes escalas de tiempo y diferentes periodos de retorno.

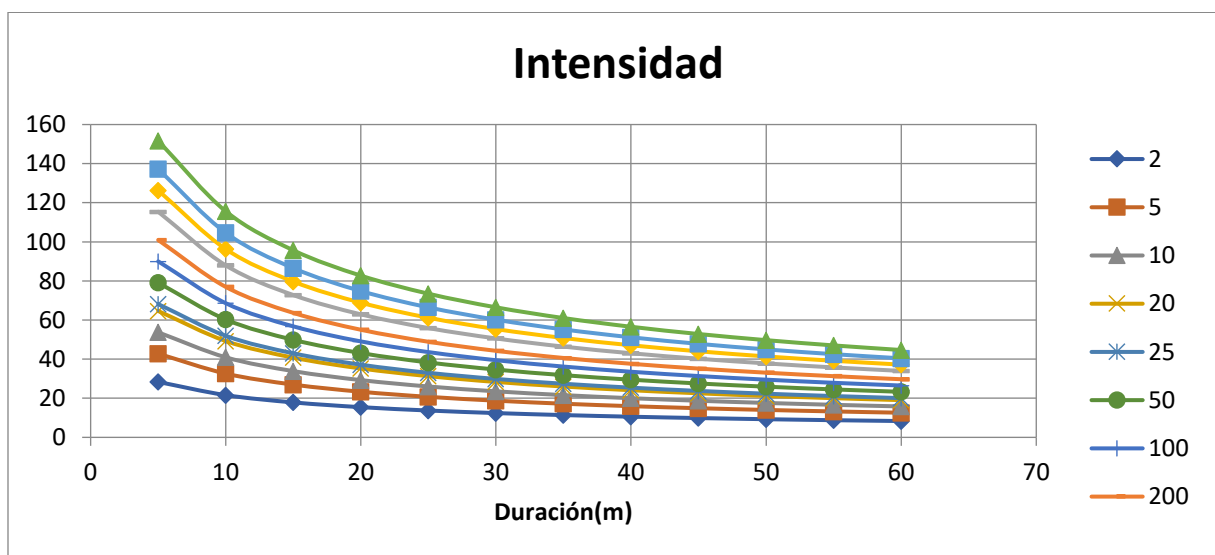


Figura 12. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Mexicali DGE

IV.3 Propuesta de red de alcantarillado pluvial y áreas de captación

Analizando las condiciones topográficas, así como la distribución urbana de la Colonia el vidrio se identificaron dos zonas bajas importantes que en conjunto con la configuración actual de las manzanas impiden el flujo natural de la cuenca y hacen necesario la implementación de 2 redes independientes que drenaran a estas zonas. Para cada uno de los tramos de la red se delimito su área de captación.



Figura 13. Propuesta de sistema de drenaje pluvial para la Colonia el Vidrio

Posteriormente se calculó un gasto asociado a cada una de las áreas de captación delimitadas para los tramos. Se generaron tres escenarios de diferentes periodos de retorno, 5, 15 y 50 años.

En las siguientes tablas se muestran los resultados de los gastos asociados, velocidades y diámetros diseñados para cada uno de los tramos de las ambas redes en sus diferentes escenarios de precipitación

Tabla 8 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial sur con un periodo de retorno de 5 años

Red Pluvial Sur Tr5

TRAMO	Gasto Puntual l/s	GASTOS DE DISEÑO		Nominal	Vmáx/VII	LLENADO DE TUBERÍA
		Mínimo				
		l/s	l/s			
11 - 10	21.69	1	22.59	8	1.120	0.70
10 - 9	0.00	1	23.28	8	1.037	0.55
8 - 9	30.68	1	32.07	10	1.064	0.59
8 - 7	2.67	1	3.06	8	0.542	0.16
7 - 14	16.57	1	102.77	15	1.086	0.62
14 - 15	36.58	1	139.80	15	1.139	0.79
15 - 16	0.00	1	229.02	18	1.135	0.76
9 - 12	2.85	1	58.59	10	1.139	0.78
7 - 6	2.95	1	3.39	8	0.683	0.24
13 - 7	0.00	1	82.63	12	1.139	0.79
6 - 15	14.11	1	89.14	15	1.052	0.57
12 - 13	22.62	1	82.03	12	1.139	0.79
5 - 6	15.84	1	71.16	12	1.119	0.70
4 - 5	6.93	1	54.84	12	1.062	0.58
3 - 4	26.86	1	47.57	10	1.126	0.72
2 - 3	8.06	1	19.34	8	1.015	0.52
1 - 2	10.05	1	10.67	8	0.913	0.41

Tabla 9 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial sur con un periodo de retorno de 15 años.

Red Pluvial Sur Tr15

TRAMO	Gasto Puntual l/s	GASTOS DE DISEÑO		Nominal in	Vmax (m/s)	Llenado de tubería %
		Maximo l/s	Mínimo l/s			
11 - 10	30.47	1.00	31.37	10	1.057	57.8%
10 - 9	0.00	1.00	32.06	8	1.374	69.5%
8 - 9	43.10	1.00	44.48	10	1.170	71.7%
8 - 7	3.75	1.00	4.15	8	1.005	18.8%
7 - 14	23.28	1.00	142.06	18	1.545	54.3%

14 - 15	51.39	1.00	193.89	18	1.653	66.7%
15 - 16	0.00	1.00	317.43	24	1.888	55.6%
9 - 12	4.00	1.00	80.93	12	1.696	61.1%
7 - 6	4.14	1.00	4.59	8	0.640	27.9%
13 - 7	0.00	1.00	114.13	15	1.447	67.1%
6 - 15	19.83	1.00	123.46	15	1.467	71.2%
12 - 13	31.77	1.00	113.53	15	1.445	66.8%
5 - 6	22.25	1.00	98.58	15	1.405	60.7%
4 - 5	9.74	1.00	75.85	12	1.293	73.4%
3 - 4	37.73	1.00	65.77	12	1.332	62.9%
2 - 3	11.33	1.00	26.67	8	1.316	61.4%
1 - 2	14.11	1.00	14.74	8	0.955	49.3%

Tabla 10 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial sur con un periodo de retorno de 50 años

TRAMO	Red pluvial sur Tr50					
	Gasto Puntual l/s	GASTOS DE DISEÑO		Nominal in	Vmax (m/s)	Llenado de tuberia %
		Maximo l/s	Mínimo l/s			
11 - 10	40.08	1.00	40.99	10	1.168	66.7%
10 - 9	0.00	1.00	41.68	10	1.488	55.2%
8 - 9	56.71	1.00	58.09	12	1.231	60.5%
8 - 7	4.94	1.00	5.33	8	1.051	21.7%
7 - 14	30.63	1.00	185.12	18	1.638	64.5%
14 - 15	67.62	1.00	253.18	24	1.786	48.5%
15 - 16	0.00	1.00	414.33	24	2.000	66.3%
9 - 12	5.26	1.00	105.42	12	1.835	71.9%
7 - 6	5.45	1.00	5.90	8	0.687	31.7%
13 - 7	0.00	1.00	148.65	18	1.562	55.9%
6 - 15	26.09	1.00	161.07	18	1.591	58.8%
12 - 13	41.80	1.00	148.05	18	1.560	55.7%
5 - 6	29.27	1.00	128.62	15	1.475	73.6%
4 - 5	12.81	1.00	98.87	15	1.406	60.8%
3 - 4	49.64	1.00	85.71	12	1.444	74.2%
2 - 3	14.90	1.00	34.71	10	1.366	51.0%
1 - 2	18.57	1.00	19.19	8	1.067	55.6%

Tabla 11 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial noreste con un periodo de retorno de 5 años

Red pluvial noreste Tr5

TRAMO	Gasto Puntual l/s	GASTOS DE DISEÑO		Nominal in	Vmáx/VII	LLENADO DE TUBERÍA %
		Mínimo	Máximo			
		l/s	l/s			
5 - 4	21.73	1.00	21.73	8.00	1.040	55.10%
4 - 3	12.31	1.00	44.04	10.00	1.130	73.50%
3 - 6	2.34	1.00	70.31	12.00	1.117	69.10%
7 - 6	4.35	1.00	4.35	8.00	0.610	19.70%
2 - 3	16.68	1.00	23.93	8.00	0.971	46.70%
6 - 8	20.43	1.00	95.09	15.00	1.068	59.20%
1 - 2	7.25	1.00	7.25	8.00	0.529	15.60%

Tabla 12 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial noreste con un periodo de retorno de 15 años

TRAMO

Red pluvial noreste Tr15

	Gasto Puntual l/s	Maximo l/s	Mínimo l/s	Nominal in	Vmax (m/s)	Llenado de tubería %
5 - 4	30.52	1.00	30.52	8	1.355	67.3%
4 - 3	17.29	1.00	57.81	12	1.325	56.7%
3 - 6	3.29	1.00	94.73	15	1.393	59.1%
7 - 6	6.11	1.00	6.11	8	1.089	23.4%
2 - 3	23.44	1.00	33.62	8	1.803	57.3%
6 - 8	28.70	1.00	129.53	15	1.477	74.0%
1 - 2	10.18	1.00	10.18	8	2.548	18.4%

Tabla 13 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial noreste con un periodo de retorno de 50 años

TRAMO

Red pluvial noroeste Tr50

	Gasto Puntual l/s	Maximo l/s	Mínimo l/s	Nominal in	Vmax (m/s)	Llenado de tubería %
5 - 4	40.16	1.00	40.16	10	1.430	55.2%
4 - 3	22.75	1.00	72.91	12	1.286	71.1%

3 - 6	4.33	1.00	121.48	15	1.463	70.3%
7 - 6	8.03	1.00	8.03	8	1.179	26.9%
2 - 3	30.84	1.00	44.24	8	1.908	69.1%
6 - 8	37.76	1.00	167.28	18	1.603	60.2%
1 - 2	13.40	1.00	13.40	8	2.765	21.1%

IV.4 Evaluación de la incorporación de infraestructura verde

Para analizar el efecto de la implementación de IV en la red pluvial algunas herramientas digitales comerciales integran módulos que simulan el efecto que tienen dichos elementos en las diferentes variables hidrológicas e hidráulicas. Sin embargo, se ha comprobado que el modificar factores como el coeficiente de escurrimiento, es posible determinar la variación del gasto debido a las pérdidas y aumento en los tiempos de concentración.

Analizando los espacios y usos de suelo en el vidrio, se puede apreciar que en su mayoría esta se encuentra compuesta por manzanas y sus correspondientes casas habitación. Sin embargo, existen algunas vialidades con espacios disponibles para implementar IV.

En el área donde se propone la implementación de la red pluvial sur, se ubica un estacionamiento propiedad de la UABC, en el que se podría evaluar la implementación de IV. Diversos análisis han demostrado la efectividad de estos elementos para infiltrar escurrimientos superficiales disminuyendo considerablemente el coeficiente de escorrentía en valores que rondan los .40 dependiendo de la profundidad. Para zonas donde la infiltración no es viable es posible colocar una capa impermeable y un drenaje por debajo de la carpeta asfáltica que conduzca los flujos hacia la red pluvial con un mayor tiempo de retención.

Adicionalmente, sobre las vialidades Agata, Zafiro y esmeralda existen espacios para la implementación de zanjas de infiltración o cunetas verdes. Estos elementos pueden ser diseñados con vegetación nativa y un medio filtrante que capte los flujos hacia un subdrenaje que se conecte a la red pluvial.

En la figura xx se observa la distribución de los espacios mencionados.

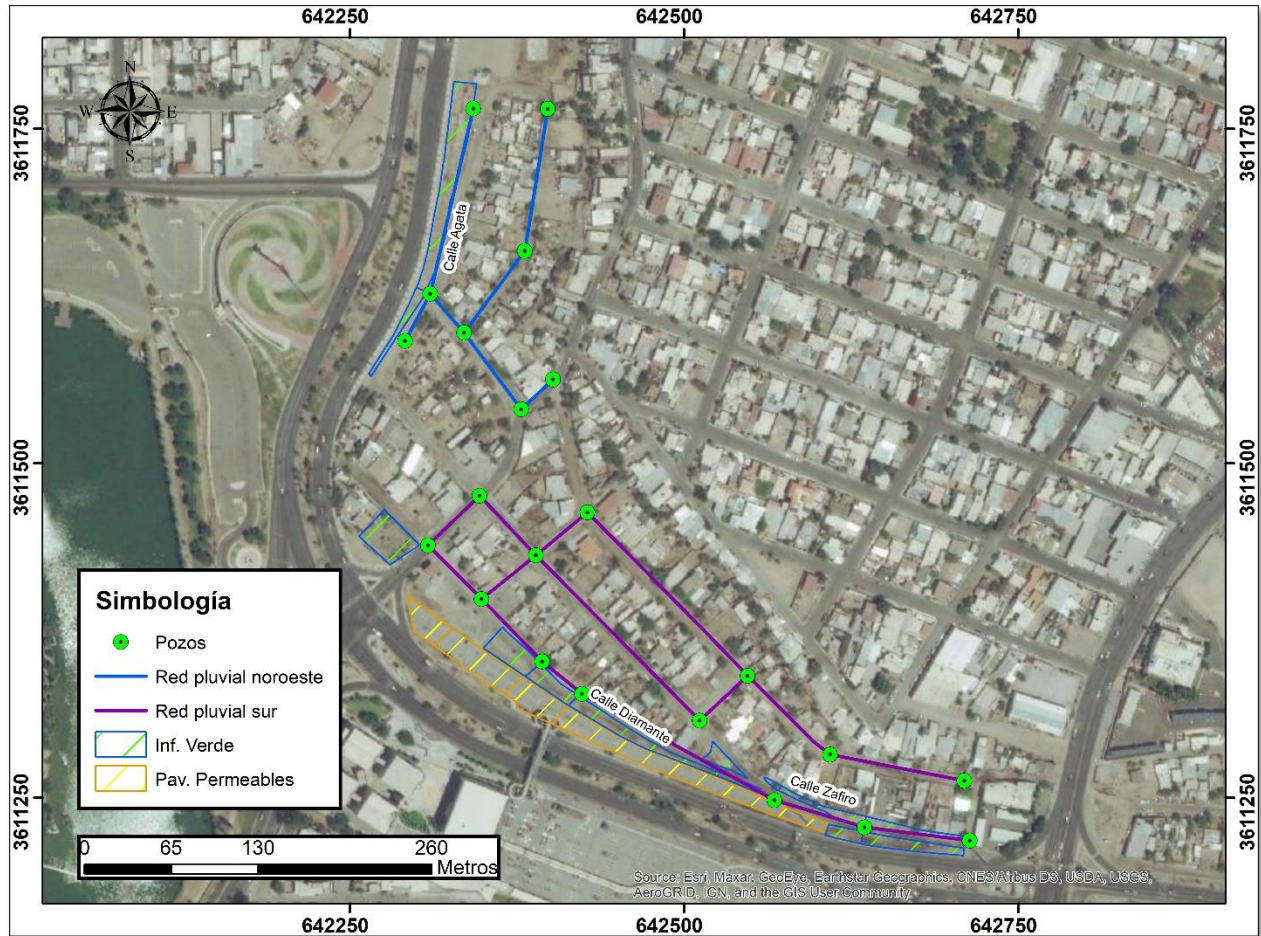


Figura 14. Distribución y zonificación de la infraestructura verde propuesta

A continuación, se describen los gastos asociados a los 3 escenarios de ambas redes, con la implementación de IV a través de la modificación de los coeficientes de escurrimiento las áreas donde es viable su instalación.

Analizando diferentes investigaciones se seleccionaron coeficientes de escurrimiento para modelar las abstracciones al escurrimiento generadas por IV como zanjas verdes, así como elementos como pavimentos permeables. Estos coeficientes fueron integrados al modelo para analizar los cambios hidráulicos dentro de la red.

Tabla 14 Coeficiente de escurrimiento para infraestructura verde.

ESTUDIOS DE COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO	ZANJAS DE INFILTRACION U OTRA INFRAESTRUCTURA VERDE	PAVIMENTO PERMEABLE
SOHN, W., KIM, J. H., & NEWMAN, G. (2014). A BLUEPRINT FOR STORMWATER INFRASTRUCTURE DESIGN: IMPLEMENTATION AND EFFICACY OF LID. <i>LANDSCAPE RESEARCH RECORD</i> , 2(1), 50-61.	0.36	-
ZHU, H., YU, M., ZHU, J., LU, H., & CAO, R. (2019). SIMULATION STUDY ON EFFECT OF PERMEABLE PAVEMENT ON REDUCING FLOOD RISK OF URBAN RUNOFF. <i>INTERNATIONAL JOURNAL OF TRANSPORTATION SCIENCE AND TECHNOLOGY</i> , 8(4), 373-382.	-	0.40
HARRIS, C., WEBB IV, ALEXANDER., & DUBOIS, N. (2014). MORPHOGENESIS IN THE LANDSCAPE: ALGAEIC INFRASTRUCTURE AND RECYCLED CARDBOARD. <i>RESEARCH RECORD</i> , 62.	0.25	0.45
WILSON, C. E., HUNT, W. F., WINSTON, R. J., & SMITH, P. (2015). COMPARISON OF RUNOFF QUALITY AND QUANTITY FROM A COMMERCIAL LOW-IMPACT AND CONVENTIONAL DEVELOPMENT IN RALEIGH, NORTH CAROLINA. <i>JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING</i> , 141(2), 05014005.	0.20	-
BATTIATA, J., COLLINS, K., HIRSCHMAN, D., & HOFFMANN, G. (2010). THE RUNOFF REDUCTION METHOD. <i>JOURNAL OF CONTEMPORARY WATER RESEARCH & EDUCATION</i> , 146(1), 11-21.	0.25	-
FASSMAN, E. A., & BLACKBOURN, S. (2010). URBAN RUNOFF MITIGATION BY A PERMEABLE PAVEMENT SYSTEM OVER IMPERMEABLE SOILS. <i>JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING</i> , 15(6), 475-485.	-	0.46
PROMEDIO	0.27	0.44

Tabla 15 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial sur con infraestructura verde con un periodo de retorno de 5 años

Red pluvial sur IV Tr5

TRAMO	Gasto Puntual l/s	GASTOS DE DISEÑO		Nominal	Vmáx/VII	LLENADO DE TUBERÍA %
		Mínimo l/s	Máximo l/s			
11 - 10	21.69	1	22.59	8	1.120	70.00%
10 - 9	0.00	1	23.28	8	1.037	54.70%
8 - 9	30.68	1	32.07	10	1.064	58.60%
8 - 7	2.67	1	3.06	8	0.542	16.20%
7 - 14	16.57	1	102.77	15	1.086	62.40%
14 - 15	34.52	1	137.73	15	1.138	78.20%
15 - 16	0.00	1	212.42	18	1.124	71.40%
9 - 12	2.85	1	58.59	10	1.139	78.40%
7 - 6	2.95	1	3.39	8	0.683	23.90%
13 - 7	0.00	1	82.63	12	1.139	79.20%
6 - 15	13.16	1	74.60	12	1.127	72.40%
12 - 13	22.62	1	82.03	12	1.139	78.70%
5 - 6	12.26	1	57.58	12	1.073	60.10%
4 - 5	5.02	1	44.83	10	1.133	74.60%
3 - 4	21.56	1	39.47	10	1.096	64.40%
2 - 3	6.62	1	16.54	8	0.976	47.30%
1 - 2	8.69	1	9.31	8	0.881	38.10%

Tabla 16 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial sur con infraestructura verde con un periodo de retorno de 15 años

TRAMO	Red pluvial sur IV Tr15					
	Gasto Puntual l/s	GASTOS DE DISEÑO		Nominal in	Vmáx (m/s)	Llenado de tubería %
		Mínimo l/s	Maximo l/s			
11 - 10	30.47	1.00	31.37	10	1.057	57.8%
10 - 9	0.00	1.00	32.06	8	1.374	69.5%
8 - 9	43.10	1.00	44.48	10	1.170	71.7%
8 - 7	3.75	1.00	4.15	8	1.005	18.8%
7 - 14	23.28	1.00	142.06	18	1.545	54.3%
14 - 15	48.49	1.00	190.99	18	1.648	65.9%
15 - 16	0.00	1.00	294.11	24	1.853	53.0%
9 - 12	4.00	1.00	80.93	12	1.696	61.1%
7 - 6	4.14	1.00	4.59	8	0.640	27.9%
13 - 7	0.00	1.00	114.13	15	1.447	67.1%
6 - 15	18.49	1.00	103.04	15	1.418	62.5%
12 - 13	31.77	1.00	113.53	15	1.445	66.8%
5 - 6	17.23	1.00	79.49	12	1.300	76.4%
4 - 5	7.05	1.00	61.78	12	1.247	63.0%

3 - 4	30.29	1.00	54.39	12	1.277	55.6%
2 - 3	9.30	1.00	22.74	8	1.269	55.4%
1 - 2	12.20	1.00	12.83	8	0.921	45.5%

Tabla 17 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial sur con infraestructura verde con un periodo de retorno de 50 años

TRAMO

Red pluvial sur IV Tr50

	Gasto Puntual l/s	GASTOS DE DISEÑO		Nominal in	Vmáx (m/s)	Llenado de tubería %
		Mínimo l/s	Máximo l/s			
11 - 10	40.08	1.00	40.99	10	1.168	66.7%
10 - 9	0.00	1.00	41.68	10	1.488	55.2%
8 - 9	56.71	1.00	58.09	12	1.231	60.5%
8 - 7	4.94	1.00	5.33	8	1.051	21.7%
7 - 14	30.63	1.00	185.12	18	1.638	64.5%
14 - 15	63.80	1.00	249.36	24	1.779	48.1%
15 - 16	0.00	1.00	383.65	24	1.969	62.8%
9 - 12	5.26	1.00	105.42	12	1.835	71.9%
7 - 6	5.45	1.00	5.90	8	0.687	31.7%
13 - 7	0.00	1.00	148.65	18	1.562	55.9%
6 - 15	24.33	1.00	134.20	15	1.483	76.3%
12 - 13	41.80	1.00	148.05	18	1.560	55.7%
5 - 6	22.67	1.00	103.51	15	1.420	62.7%
4 - 5	9.27	1.00	80.36	12	1.302	77.2%
3 - 4	39.85	1.00	70.74	12	1.351	66.1%
2 - 3	12.24	1.00	29.53	8	1.344	65.9%
1 - 2	16.06	1.00	16.68	8	0.984	53.0%

Tabla 18 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial noreste con infraestructura verde con un periodo de retorno de 5 años

Red pluvial noroeste IV Tr5

TRAMO	Gastos puntuales l/s	GASTOS DE DISEÑO		Nominal in	Vmáx/VII	LLENADO DE TUBERÍA %
		Mínimo l/s	Máximo l/s			
5 - 4	21.73	1	21.73	8.00	1.04	55.10%
4 - 3	12.31	1	44.04	10.00	1.13	73.50%
3 - 6	2.34	1	70.31	12.00	1.12	69.10%
7 - 6	3.77	1	3.77	8.00	0.59	18.40%
2 - 3	16.68	1	23.93	8.00	0.97	46.70%

6 - 8	17.54	1	91.62	15.00	1.06	57.80%
1 - 2	7.25	1	7.25	8.00	0.53	15.60%

Tabla 19 Gastos asociados, velocidades y diámetros para la red pluvial noreste con infraestructura verde con un periodo de retorno de 15 años

TRAMO	Red pluvial noroeste IV Tr15					
	Gastos Puntuales l/s	GASTOS DE DISEÑO		Nominal in	Vmax (m/s)	Llenado de tubería %
		Maximo l/s	Mínimo l/s			
5 - 4	30.52	1.00	30.52	8	1.355	67.3%
4 - 3	17.29	1.00	57.81	12	1.325	56.7%
3 - 6	3.29	1.00	94.73	15	1.393	59.1%
7 - 6	5.30	1.00	5.30	8	1.045	21.8%
2 - 3	23.44	1.00	33.62	8	1.803	57.3%
6 - 8	24.63	1.00	124.65	15	1.469	71.7%
1 - 2	10.18	1.00	10.18	8	2.548	18.4%

TRAMO	ALTA CON INFRAESTRUCTURA VERDE					
	Gastos Puntuales l/s	GASTOS DE DISEÑO		Nominal in	Vmax (m/s)	Llenado de tubería %
		Maximo l/s	Mínimo l/s			
5 - 4	40.16	1.00	40.16	10	1.430	55.2%
4 - 3	22.75	1.00	72.91	12	1.286	71.1%
3 - 6	4.33	1.00	121.48	15	1.463	70.3%
7 - 6	6.97	1.00	6.97	8	1.131	25.0%
2 - 3	30.84	1.00	44.24	8	1.908	69.1%
6 - 8	32.41	1.00	160.86	18	1.590	58.7%
1 - 2	13.40	1.00	13.40	8	2.765	21.1%

Comparación de resultados y discusión

El impacto de la IV es relativo a la superficie que puede ser utilizada para su instalación. Aquellas cuencas con mayor porcentaje de IV redujeron los niveles de gasto.

En la tabla 20 y la tabla 21 se analizaron las diferencias entre los gastos puntuales (Qp) de cada uno de los escenarios de precipitación con y sin la implementación de IV en el sistema sur.

Tabla 20 Diferentes gastos puntuales del sistema pluvial sur con y sin infraestructura verde

Tramo	TR 5				Tr15				Tr50			
	Qp sin IV (l/s)	Qpl con IV (l/s)	Dif	% Dif	Qp sin IV (l/s)	Qpl con IV (l/s)	Dif	% Dif	Qp sin IV (l/s)	Qpl con IV (l/s)	Dif	% Dif
11 - 10	21.69	21.69	NA	NA	30.47	30.47	NA	NA	40.08	40.08	NA	NA
10 - 9	0	0	NA	NA	0	0	NA	NA	0	0	NA	NA
8 - 9	30.68	30.68	NA	NA	43.1	43.1	NA	NA	56.71	56.71	NA	NA
8 - 7	2.67	2.67	NA	NA	3.75	3.75	NA	NA	4.94	4.94	NA	NA
7 - 14	16.57	16.57	NA	NA	23.28	23.28	NA	NA	30.63	30.63	NA	NA
14 - 15	36.58	34.52	2.06	5.63	51.39	48.49	2.9	5.64	67.62	63.8	3.82	5.65
15 - 16	0	0	NA	NA	0	0	NA	NA	0	0	NA	NA
9 - 12	2.85	2.85	NA	NA	4	4	NA	NA	5.26	5.26	NA	NA
7 - 6	2.95	2.95	NA	NA	4.14	4.14	NA	NA	5.45	5.45	NA	NA
13 - 7	0	0	NA	NA	0	0	NA	NA	0	0	NA	NA
6 - 15	14.11	13.16	0.95	6.73	19.83	18.49	1.34	6.76	26.09	24.33	1.76	6.75
12 - 13	22.62	22.62	NA	NA	31.77	31.77	NA	NA	41.8	41.8	NA	NA
5 - 6	15.84	12.26	3.58	22.60	22.25	17.23	5.02	22.56	29.27	22.67	6.6	22.55
4 - 5	6.93	5.02	1.91	27.56	9.74	7.05	2.69	27.62	12.81	9.27	3.54	27.63
3 - 4	26.86	21.56	5.3	19.73	37.73	30.29	7.44	19.72	49.64	39.85	9.79	19.72
2 - 3	8.06	6.62	1.44	17.87	11.33	9.3	2.03	17.92	14.9	12.24	2.66	17.85
1 - 2	10.05	8.69	1.36	13.53	14.11	12.2	1.91	13.54	18.57	16.06	2.51	13.52

El gasto puntual representa la cantidad de escurrimiento generada en cada una de las subcuencas e incorporada al tramo correspondiente. Se puede apreciar en los tramos donde es viable la implementación de IV la **disminución en el gasto puntual puede ser de hasta el 27.56%**, a medida que aumenta el periodo de retorno la diferencia entre el los gastos puntuales con y sin IV aumentan, los que nos permitiría implementar obras de retención para la precipitación durante eventos extremos.

Así mismo, para misma variable de gasto puntual en el sistema pluvial noreste los resultados fueron los siguientes.

Tabla 21 Diferentes gastos puntuales del sistema pluvial noreste con y sin infraestructura verde

Tramo	TR 5				Tr15				Tr50			
	Qp sin IV (l/s)	Qp con IV (l/s)	Dif	% Dif	Qp sin IV (l/s)	Qp con IV (l/s)	Dif	% Dif	Qp sin IV (l/s)	Qp con IV (l/s)	Dif	% Dif
5 - 4	21.73	21.73	NA	NA	30.52	30.52	NA	NA	40.16	40.16	NA	NA
4 - 3	12.31	12.31	NA	NA	17.29	17.29	NA	NA	22.75	22.75	NA	NA
3 - 6	2.34	2.34	NA	NA	3.29	3.29	NA	NA	4.33	4.33	NA	NA
7 - 6	4.35	3.77	0.58	13.33	6.11	5.3	0.81	13.26	8.03	6.97	1.06	13.20
2 - 3	16.68	16.68	NA	NA	23.44	23.44	NA	NA	30.84	30.84	NA	NA
6 - 8	20.43	17.54	2.89	14.15	28.7	24.63	4.07	14.18	37.76	32.41	5.35	14.17
1 - 2	7.25	7.25	NA	NA	10.18	10.18	NA	NA	13.4	13.4	NA	NA

En la red noreste, las disminuciones del gasto puntual fueron menores, y únicamente 2 de los tramos cuentan con espacio para la implementación de IV.

Derivado de estos resultados en zonas como las del tramo 6-8 se podría plantear la implementación de obras de almacenamiento subterráneo que retengan los volúmenes de precipitación durante evento extremos para su posterior aprovechamiento o bombeo hacia el colector del Río Nuevo.

Al procesar los diferentes gastos puntuales se calcularon los gastos máximos de diseño dentro de la red de alcantarillado considerando la dirección de cada uno de los flujos y su acumulación hasta llegar al punto de salida.

De igual manera se presentan la comparación de dichos gastos de diseño (Qd) para los diferentes periodos de retorno y ambos sistemas de alcantarillado.

Tabla 22 Comparación de gastos de diseño para diferentes periodos de retorno del sistema pluvial sur.

Tramo	TR 5				Tr15				Tr50			
	Qp sin IV (l/s)	Qp con IV (l/s)	Dif	% Dif	Qp sin IV (l/s)	Qp con IV (l/s)	Dif	% Dif	Qp sin IV (l/s)	Qp con IV (l/s)	Dif	% Dif
11 - 10	22.59	22.59	NA	NA	31.37	31.37	NA	NA	40.99	40.99	NA	NA
10 - 9	23.28	23.28	NA	NA	32.06	32.06	NA	NA	41.68	41.68	NA	NA
8 - 9	32.07	32.07	NA	NA	44.48	44.48	NA	NA	58.09	58.09	NA	NA
8 - 7	3.06	3.06	NA	NA	4.15	4.15	NA	NA	5.33	5.33	NA	NA
7 - 14	102.77	102.77	NA	NA	142.06	142.06	NA	NA	185.12	185.12	NA	NA
14 - 15	139.80	137.73	2.07	1.48	193.89	190.99	2.90	1.50	253.18	249.36	3.82	1.51
15 - 16	229.02	212.42	16.60	7.25	317.43	294.11	23.32	7.35	414.33	383.65	30.68	7.40
9 - 12	58.59	58.59	NA	NA	80.93	80.93	NA	NA	105.42	105.42	NA	NA
7 - 6	3.39	3.39	NA	NA	4.59	4.59	NA	NA	5.90	5.90	NA	NA
13 - 7	82.63	82.63	NA	NA	114.13	114.13	NA	NA	148.65	148.65	NA	NA
6 - 15	89.14	74.60	14.54	16.31	123.46	103.04	20.42	16.54	161.07	134.20	26.87	16.68
12 - 13	82.03	82.03	NA	NA	113.53	113.53	NA	NA	148.05	148.05	NA	NA
5 - 6	71.16	57.58	13.58	19.08	98.58	79.49	19.09	19.36	128.62	103.51	25.11	19.52
4 - 5	54.84	44.83	10.01	18.25	75.85	61.78	14.07	18.55	98.87	80.36	18.51	18.72
3 - 4	47.57	39.47	8.10	17.03	65.77	54.39	11.38	17.30	85.71	70.74	14.97	17.47
2 - 3	19.34	16.54	2.80	14.48	26.67	22.74	3.93	14.74	34.71	29.53	5.18	14.92
1 - 2	10.67	9.31	1.36	12.75	14.74	12.83	1.91	12.96	19.19	16.68	2.51	13.08

Tabla 23 Comparación de gastos de diseño para diferentes periodos de retorno del sistema pluvial noreste.

Tramo	TR 5				Tr15				Tr50			
	Qp sin IV (l/s)	Qp con IV (l/s)	Dif	% Dif	Qp sin IV (l/s)	Qp con IV (l/s)	Dif	% Dif	Qp sin IV (l/s)	Qp con IV (l/s)	Dif	% Dif
5 - 4	21.73	21.73	NA	NA	30.52	30.52	NA	NA	40.16	40.16	NA	NA
4 - 3	44.04	44.04	NA	NA	57.81	57.81	NA	NA	72.91	72.91	NA	NA
3 - 6	70.31	70.31	NA	NA	94.73	94.73	NA	NA	121.48	121.48	NA	NA
7 - 6	4.35	3.77	0.58	13.33	6.11	5.30	0.81	13.26	8.03	6.97	1.06	13.20
2 - 3	23.93	23.93	NA	NA	33.62	33.62	NA	NA	44.24	44.24	NA	NA
6 - 8	95.09	91.62	3.47	3.65	129.53	124.65	4.88	3.77	167.28	160.86	6.42	3.84
1 - 2	7.25	7.25	NA	NA	10.18	10.18	NA	NA	13.40	13.40	NA	NA

Analizando los gastos de diseño desde la perspectiva general de la red, se aprecia una mayor cantidad de tramos donde el gasto se vio disminuido. Se aprecia como tramos que no se vieron afectados de manera puntual por la IV, si tienen un beneficio consecuencia de la disminución del gasto puntual en los tramos anteriores. Al disminuir el flujo en los tramos periferias o aquellos ubicados aguas arriba, los tramos subsecuentes irán acumulando un gasto menor.

Esto nos indica que aquellas subcuencas o áreas de captación de mayor elevación donde inicia la red, son de vital importancia para la disminución del flujo aguas abajo, se debe considerar a estas como las primeras en donde se plantee la instalación de IV.

Finalmente se comparan los diferentes diámetros nominales para cada tramo. Para la selección de cada diámetro se evalúan los parámetros mínimos y máximo de velocidad, así como el porcentaje de llenado que deber permanecer por debajo del 80%.

Tabla 24 Comparación de los diferentes diámetros nominales del sistema pluvial sur.

Tramo	TR 5		Tr15		Tr50	
	Diametro nominal sin IV	Diametro Nominal con IV	Diametro nominal sin IV	Diametro Nominal con IV	Diametro nominal sin IV	Diametro Nominal con IV
11 - 10	8	8	10	10	10	10
10 - 9	8	8	8	8	10	10
8 - 9	10	10	10	10	12	12
8 - 7	8	8	8	8	8	8
7 - 14	15	15	18	18	18	18
14 - 15	15	15	18	18	24	24
15 - 16	18	18	24	24	24	24
9 - 12	10	10	12	12	12	12
7 - 6	8	8	8	8	8	8
13 - 7	12	12	15	15	18	18
6 - 15	15	12	15	15	18	15
12 - 13	12	12	15	15	18	18
5 - 6	12	12	15	12	15	15
4 - 5	12	10	12	12	15	12
3 - 4	10	10	12	12	12	12
2 - 3	8	8	8	8	10	8
1 - 2	8	8	8	8	8	8

Tabla 25 Comparación de los diferentes diámetros nominales del sistema pluvial noreste.

<i>Tramo</i>	<i>TR 5</i>		<i>Tr15</i>		<i>Tr50</i>	
	Diametro nominal sin IV	Diametro Nominal con IV	Diametro nominal sin IV	Diametro Nominal con IV	Diametro nominal sin IV	Diametro Nominal con IV
5 - 4	8	8	8	8	10	10
4 - 3	10	10	12	12	12	12
3 - 6	12	12	15	15	15	15
7 - 6	8	8	8	8	8	8
2 - 3	8	8	8	8	8	8
6 - 8	15	15	15	15	18	18
1 - 2	8	8	8	8	8	8

Para el sistema de drenaje pluvial sur se pueden observar en aquellos tramos con la implementación de IV y la consecuente reducción de gastos de diseño permiten la implementación de diámetros menores. Esto se traduce en un exponencial ahorro no solo en material si no en los procesos constructivos.

Si bien tanto en algunos escenarios de precipitación como en algunos tramos no fue viable el disminuir el diámetro de tubería, el diámetro calculado si se vio reducido, sin embargo, con la finalidad de cumplir con los niveles máximos de velocidad de flujo así como porcentaje de llenado, estos no fueron modificados. La implementación de una mayor superficie de IV para reducir en mayor medida do los coeficientes de escurrimiento.

Capítulo V Conclusiones y recomendaciones.

V.1 Conclusiones teóricas.

La resolución de problemas derivados del desarrollo urbano y sus impactos consecuentes y externos, se debe dirigir a la búsqueda de soluciones basadas en una perspectiva holística que permita atender el problema desde un enfoque sustentable y además de bajo impacto.

Los avances tecnológicos de herramientas como los SIG y otras herramientas digitales de modelación, son esenciales en temas de planeación urbana sustentable, ya que permiten la integración y procesamiento de datos espaciales cualitativos y cuantitativos, lo que permite plantear escenarios de desarrollo bajo condiciones adversas o ideales, según se necesite.

Los planteamientos teóricos de esta tesis están dirigidos a este enfoque desde el procesamiento de indicador para la toma de decisiones en zonas vulnerables a los impactos de la inundación. Este elemento otorga una perspectiva espacial de aquellos puntos que deben considerarse como de atención prioritaria, ya que a medida que la vulnerabilidad en un AGEB sea mayor, los impactos de la inundación afectan de igual manera la zona, no únicamente en los aspectos físicos, si no sociales y económicos.

La IV es una solución viable y de bajo impacto para la mitigación de inundaciones. En zonas donde existe infraestructura gris tradicional, genera múltiples beneficios que en resumidas cuentas aumentan la resiliencia de dicho sistema, mitigando los impactos que pueden ocasionar las precipitaciones extremas. La efectividad de estos sistemas estará directamente ligada a la superficie que se les sea asignada, ya que a mayor superficie los coeficientes de escurrimientos se verán disminuidos, reduciendo los gastos de diseño a lo largo de la red.

V.2 Conclusiones metodológicas.

El planteamiento metodológico del indicador de vulnerabilidad esta pensado en ser un primer modelo que caracterice la distribución espacial de la vulnerabilidad. Al

considerar cada uno de sus componentes como iguales, refleja la situación global y actual del estado de la vulnerabilidad. Esto abre un área de investigación para la implementación de más variables, así como el definir las prioridades hacia los componentes, definiendo que aspecto es más importante abordar.

Este indicador además muestra las áreas de atención que deben tomarse en cuenta en mayor medida en cada AGEB. Si un AGEB en específico no es vulnerable desde el punto de vista social o económico, pero sus afectaciones son mayormente físicas, ese es el rubro que debe atenderse. Esto permite que esta herramienta pueda ser utilizada no solo para la mitigación de inundaciones si no como un elemento importante en los planes de desarrollo.

En zonas áridas de países desarrollados, es común la falta de información necesaria para la correcta caracterización de las variables fisiográficas de una cuenca para análisis hidrológicos. Es por esto que este trabajo remarca la importancia de la integración de datos espaciales, así como observaciones en campo. Tal es el caso del levantamiento con dron, que permitió generar un modelo digital de elevación que refleja el comportamiento hidrográfico de la cuenca y su interacción con los elementos superficiales característicos de una zona urbana.

Herramientas como el software HTP facilitan el procesamiento de la información climatológico a través de utilizar múltiples métodos tanto para el análisis de frecuencia, como para el calculo de intensidades, variable que se menosprecia en zonas áridas por los bajos niveles anuales de precipitación y la falta de datos a escalas menores a 24hrs.

La implementación de IV claramente permite la disminución de flujo en la red del sistema de drenaje pluvial, lo que se refleja en el aumento de la resiliencia del sistema, disminución en los diámetros y el posible aprovechamiento de agua de lluvia.

Los resultados de la implementación de dicha infraestructura como modificaciones al coeficiente de escurrimiento, abren la puerta a futuro líneas de investigación donde se evalúen a fondo los impactos de cada tipo de infraestructura en particular, así como detalles de su composición como lo son el tipo de vegetación seleccionada, el tipo de suelo nativo, el tipo de suelo añadido y sus dimensiones.

V.3 Conclusiones físicas.

La zonificación de vulnerabilidad a la inundación permitió analizar aquellas zonas de mayor susceptibilidad a los impactos generados por inundación. Tal es el caso de la Colonia el Vidrio donde si bien el componente social no mostro una anomalía por encima de la media los aspectos económicos y las condiciones físicas, si lo vuelven un punto vulnerable dentro de la mancha urbana.

Aunado a esto, la falta de infraestructura pluvial, deficiencias en la infraestructura vial y las bajas elevaciones del vidrio, conforman un área donde el volumen de precipitación no fluye de manera natural al punto de salida del Río Nuevo.

El planteamiento del diseño del drenaje pluvial en 2 secciones (noreste y sur) responde a la actual configuración urbana del vidrio, donde el trazo de la red en el sentido del escurrimiento principal se dificultaría por la ubicación de las manzanas.

La efectividad de la IV para mitigar la inundación depende en gran medida de la superficie disponible para su implementación, la instalación de infraestructura pluvial para conducir los volúmenes a un punto para su bombeo, y finalmente la rehabilitación general de las vialidades para permitir el correcto flujo superficial hacia el drenaje.

Gran parte del área en el Vidrio está compuesta por casas habitación, comúnmente diseñadas para drenar los volúmenes de precipitación hacia las vialidades. La implementación de IV en cada casa habitación a través de sistemas de recolección lluvia crearía una desconexión de estas áreas con el sistema pluvial, lo que incrementaría en gran medida la resiliencia del sistema.

Referencias

Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of hydrology*, 87(1-2), 45-59.

Abhas J. Kha, Bloch Robin, Lamond Jessica (2012). Cities and flooding. A guide to integrated urban flood risk management for 21st Century.

Apel, H., Thielen, A. H., Merz, B., & Blöschl, G. (2006). A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Natural hazards*, 38(1), 79-100.

Arduino, G., Reggiani, P., & Todini, E. (2005). Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(4), 280-284.

Arnold Jr, C. L., & Gibbons, C. J. (1996). Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American planning Association*, 62(2), 243-258.

Askarizadeh, A., Rippey, M. A., Fletcher, T. D., Feldman, D. L., Peng, J., Bowler, P., ... & Grant, S. B. (2015). From rain tanks to catchments: use of low-impact development to address hydrologic symptoms of the urban stream syndrome. *Environmental science & technology*, 49(19), 11264-11280.

Austin, G. (2017). *Infraestructura Verde para la planeación del Paisaje*. Mexico: Trillas.

Balica, S.F., Popescu, I., Beevers, L., & Wright, N. G. (2013). Applying the flood vulnerability index as a knowledge base for flood risk assessment. *Environmental Modelling & Software*, 41, 84–92

Balmaseda, R. (2014). La infraestructura verde como sistema de captación de agua de lluvia. *IMPLUVIUM Periódico digital de divulgación de la Red del Agua UNAM*.

Bateman, Allen (2007). Hidrología básica y aplicada. Grupo de investigación en transporte de sedimentos.

Béjar, M. V. (2004). Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Benedict, M.A., McMahon, E.T. 2006. Green Infrastructure. Linking Landscapes and Communities. Island Press, Washington, DC.

Bentancor, L., Silveira, L., & García Petillo, M. (2014). Incidencia de la intensidad de lluvia en el tiempo de concentración de microcuencas del Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 18(2), 106-116.

Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology—the case of physically-based models. *Journal of hydrology*, 105(1-2), 157-172.

Bhuiyan, M. J. A. N., & Dutta, D. (2012). Analysis of flood vulnerability and assessment of the impacts in coastal zones of Bangladesh due to potential sea-level rise. *Natural hazards*, 61(2), 729-743.

Bulti, D. T., Girma, B., & Megento, T. L. (2019). Community flood resilience assessment frameworks: a review. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1-17.

Burgos, V. (2007). Desarrollo Urbano de Bajo Impacto Hidrológico (DUBI): Una alternativa para una adecuada hidrología urbana del Gran Mendoza. In *Congreso Nacional del Agua*.

Bouvier, C., Chahinian, N., Adamovic, M., Cassé, C., Crespy, A., Crès, A., & Alcoba, M. (2018). Large-scale GIS-based urban flood modelling: a case study On the City of Ouagadougou. In *Advances in Hydroinformatics* (pp. 703-717). Springer, Singapore.

Bouwer, L. M. (2013). Projections of future extreme weather losses under changes in climate and exposure. *Risk Analysis*, 33(5), 915-930.

Cama-Pinto, A., Piñeres-Espitia, G., Zamora-Musa, R., Acosta-Coll, M., Caicedo-Ortiz, J., & Sepúlveda-Ojeda, J. (2016). Design of a wireless sensor network for

monitoring of flash floods in the city of Barranquilla Colombia. *Rev. Chil. Ingeniare*, 24, 581-599.

Clark, G. E., Moser, S. C., Ratick, S. J., Dow, K., Meyer, W. B., Emani, S., ... & Schwarz, H. E. (1998). Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms: the case of Revere, MA., USA. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 3(1), 59-82.

Cembrano, G., Quevedo, J., Salamero, M., Puig, V., Figueras, J., & Martí, J. (2004). Optimal control of urban drainage systems. A case study. *Control engineering practice*, 12(1), 1-9.

Connor RF, Hiroki K (2005) Development of a method for assessing flood vulnerability. *Water Sci Technol* 51:61–67.

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos* (No. 627.13 C552h). Bogotá, CO: McGraw-Hill.

Chow, V. T., D. R. Maidment y L W. Mays (1988), *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York.

Dapeng Huang RZ (2012) An assessment of multidimensional flood vulnerability at the provincial scale in China based on the DEA method. *Nat Hazards* 64:1575–1586

DOMÉNECH, I. (2014). *Criterios y Lineamientos Técnicos para Factibilidades. Alcantarillado Pluvial. Manual de Alcantarillado Pluvial CNA.*

Dutta, D., Herath, S., & Musiake, K. (2006). An application of a flood risk analysis system for impact analysis of a flood control plan in a river basin. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(6), 1365-1384.

Dutta, D., Teng, J., Vaze, J., Lerat, J., Hughes, J., & Marvanek, S. (2013). Storage-based approaches to build floodplain inundation modelling capability in river system models for water resources planning and accounting. *Journal of hydrology*, 504, 12-28.

Eaton, T. T. (2018). Approach and case-study of green infrastructure screening analysis for urban stormwater control. *Journal of environmental management*, 209, 495-504.

Elliott, A. H., & Trowsdale, S. A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, 22, 394–405.

EPA, U. (2000). Low impact development (LID): A literature review. Washington, DC, US Environmental Protection Agency, Office of Water and Low Impact Development Center.

Few, R. (2003). Flooding, vulnerability and coping strategies: local responses to a global threat. *Progress in development studies*, 3(1), 43-58.

Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in water resources*, 51, 261-279.

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... & Viklander, M. (2014). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban water journal*, 12(7), 525-542.

Food and Agriculture Organization (FAO). 2017. Directrices para la silvicultura urbana y periurbana, por Salbitano, F., Borelli, S., Conigliaro, M. y Chen, Y. 2017. Directrices para la silvicultura urbana y periurbana, Estudio FAO: Montes N° 178, Roma, FAO.

Foschiatti, Ana María H. (2002). Vulnerabilidad Global y Pobreza. Consideraciones conceptuales. Facultad de Humanidades. Universidad Nacional del Nordeste Chaco, Argentina.

Freer, J., Beven, K. J., Neal, J., Schumann, G., Hall, J., & Bates, P. (2013). Flood risk and uncertainty.

Fritsch, K., Assmann, A., & Tyrna, B. (2016). Long-term experiences with pluvial flood risk management. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 7, p. 04017). EDP Sciences.

Gallegos, H. A., Schubert, J. E., & Sanders, B. F. (2009). Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: A case study of Baldwin Hills, California. *Advances in Water Resources*, 32(8), 1323-1335.

Grahn, T., & Nyberg, L. (2017). Assessment of pluvial flood exposure and vulnerability of residential areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 21, 367-375.

Hanak, E. y Lund, JR (2012). Adaptando la gestión del agua de California al cambio climático. *Cambio climático*, 111 (1), 17-44.

Henonin J, Russo B, Mark O, Gourbesville P (2013). Real-time urban flood forecasting and modelling—a state of the art. *J Hydroinform* 15(3):717–736.

Jato-Espino, D., Charlesworth, SM, Bayon, JR y Warwick, F. (2016). Simulaciones de lluvia-escorrentía para evaluar el potencial de SuDS para mitigar las inundaciones en cuencas muy urbanizadas. *Revista internacional de investigación ambiental y salud pública*, 13 (1), 149.

Jayasooriya, VM y Ng, AWM (2014). Herramientas para modelar la gestión de las aguas pluviales y la economía de las prácticas de infraestructura verde: una revisión. *Contaminación del agua, el aire y el suelo*, 225 (8), 1-20.

Jiang L, Chen Y, Wang H (2015). Urban flood simulation based on the SWMM model. *Remote Sens GIS Hydrol Water Resour* 368:186–191.

Karim, F., Dutta, D., Marvanek, S., Petheram, C., Ticehurst, C., Lerat, J., ... & Yang, A. (2015). Assessing the impacts of climate change and dams on floodplain inundation and wetland connectivity in the wet–dry tropics of northern Australia. *Journal of Hydrology*, 522, 80-94.

Kellens, W., Terpstra, T., & De Maeyer, P. (2013). Perception and communication of flood risks: a systematic review of empirical research. *Risk Analysis: An International Journal*, 33(1), 24-49.

Kreibich, H., & Thieken, A. H. (2008). Assessment of damage caused by high groundwater inundation. *Water Resources Research*, 44(9).

Lara San Martín, A. (2014). Generación de una base de datos sobre la Oferta Académica en las áreas de Gestión del Riesgo de Desastres en América Latina y el Caribe.

Lema Guamán, L. J. (2015). Evaluación y diseño del sistema de riego en la comunidad de Molinohuayco perteneciente al cantón El Tambo, de la provincia de Cañar.

Li, L., Uyttenhove, P., & Van Eetvelde, V. (2020). Planning green infrastructure to mitigate urban surface water flooding risk—A methodology to identify priority areas applied in the city of Ghent. *Landscape and Urban Planning*, 194, 103703.

Marlow, D. R., Moglia, M., Cook, S., & Beale, D. J. (2013). Towards sustainable urban water management: A critical reassessment. *Water research*, 47(20), 7150-7161.

Marriott, S. (1992). Textural analysis and modelling of a flood deposit: River Severn, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17(7), 687-697.

Meng, X., Zhang, M., Wen, J., Du, S., Xu, H., Wang, L., & Yang, Y. (2019). A simple GIS-based model for urban rainstorm inundation simulation. *Sustainability*, 11(10), 2830.

Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thieken, A. (2010). Review article" Assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8), 1697-1724.

Munich, R. E. (2013). TOPICS GEO. Natural catastrophes 2013. Analyses, assessments, positions. 2014 Issue.

Natarajan, S. y Radhakrishnan, N. (2019). Simulación del proceso de escorrentía-lluvia basado en eventos extremos de un área de captación urbana usando HEC-HMS. *Modelado de sistemas terrestres y medio ambiente*, 5 (4), 1867-1881.

Neumayer, E. y Plümper, T. (2007). La naturaleza de género de los desastres naturales: el impacto de eventos catastróficos en la brecha de género en la esperanza de vida, 1981-2002. *Anales de la Asociación de Geógrafos Estadounidenses*, 97 (3), 551-566.

- Pitt, M. (2008). Learning lessons from the 2007 floods. Pitt Review.
- Pizzuto, J. E. (1987). Sediment diffusion during overbank flows. *Sedimentology*, 34(2), 301-317.
- Pochwat, K., Słyś, D., & Kordana, S. (2017). The temporal variability of a rainfall synthetic hyetograph for the dimensioning of stormwater retention tanks in small urban catchments. *Journal of Hydrology*, 549, 501-511.
- Polsky, C., Neff, R. y Yarnal, B. (2007). Elaboración de evaluaciones comparables de vulnerabilidad al cambio global: el diagrama de alcance de la vulnerabilidad. *Cambio ambiental global*, 17 (3-4), 472-485.
- Qin, HP, Li, ZX y Fu, G. (2013). Los efectos del desarrollo de bajo impacto sobre las inundaciones urbanas bajo diferentes características de lluvia. *Revista de gestión ambiental*, 129, 577-585.
- R. Koolhaas (2016) "Ciudad genérica" en *TYS Magazine* (2016) Conceptos básicos sobre urbanismo y ordenación del territorio.
- Rangari, V. A., Gonugunta, R., Umamahesh, N. V., Patel, A. K., & Bhatt, C. M. (2018). 1D-2D Modeling of urban floods and risk map generation for the part of hyderabad city. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Rodríguez Bayón, J. (2013). Sistemas urbanos de drenaje sostenible. La infraestructura verde. Saia p, 58.
- Rosenberg, EA, Keys, PW, Booth, DB, Hartley, D., Burkey, J., Steinemann, AC y Lettenmaier, DP (2010). Las precipitaciones extremas y los impactos del cambio climático en la infraestructura de aguas pluviales en el estado de Washington. *Cambio climático*, 102 (1), 319-349.
- Rosenzweig, B. R., McPhillips, L., Chang, H., Cheng, C., Welty, C., Matsler, M., ... & Davidson, C. I. (2018). Pluvial flood risk and opportunities for resilience. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(6), e1302.

Sada Pezonaga, L. (2011). Sistema urbano de drenaje sostenible de pluviales para urbanización en Ayegui.

Salazar-Briones, C., Hallack-Alegría, M., Mungaray-Moctezuma, A., Lomelí, M. A., Lopez-Lambraño, A., & Salcedo-Peredia, A. (2018). Modelación hidrológica e hidráulica de un río intraurbano en una cuenca transfronteriza con el apoyo del análisis regional de frecuencias. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(4), 48-74.

Schanze J, Zeman E, Marsalek J (eds) (2007) Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures, vol 67. Springer

Schubert, J. E., Monsen, W. W., & Sanders, B. F. (2015). Metric-resolution 2D river modeling at the macroscale: Computational methods and applications in a Braided River. *Frontiers in Earth Science*, 3, 74.

Seenath, A., Wilson, M., & Miller, K. (2016). Hydrodynamic versus GIS modelling for coastal flood vulnerability assessment: Which is better for guiding coastal management?. *Ocean & Coastal Management*, 120, 99-109.

Shukla, S. y Wood, AW (2008). Uso de un índice de escurrimiento estandarizado para caracterizar la sequía hidrológica. *Cartas de investigación geofísica*, 35 (2).

Tang, Z., Engel, B. A., Pijanowski, B. C., & Lim, K. J. (2005). Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. *Journal of environmental management*, 76(1), 35-45.

Tingsanchali, T. (2012). Urban flood disaster management. *Procedia engineering*, 32, 25-37.

Tsubaki, R., & Fujita, I. (2010). Unstructured grid generation using LiDAR data for urban flood inundation modelling. *Hydrological Processes: An International Journal*, 24(11), 1404-1420.

Turner BL (2003) A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc Natl Acad Sci* 100:8074–8079

UNESCO. 1984. Final Report, Programme on Man and the Biosphere (MAP). International Experts Meeting on Ecological Approaches to Urban Planning. MAB Report Series 57, pp.1–63.

Valle, L. F. (2020). Infraestructura verde.

Vaze, J., Viney, N., Stenson, M., Renzullo, L., Van Dijk, A., Dutta, D., ... & Daamen, C. (2013, December). The Australian water resource assessment modelling system (AWRA). In 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia (Vol. 16).

Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., Terán, R., Vásquez, I., Díaz, J., ... & Alcántara, J. (2016). Manejo y gestión de cuencas hidrográficas. Lima, Perú: Fondo Editorial-UNALM. Obtenido de file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Libro% 20Manejo% 20y% 20Gestio% CC% 81n% 20de% 20Cuencas% 20Hidrogra% CC% 81ficas, 20, 20.

Waghwal, R. K., & Agnihotri, P. G. (2019). Flood risk assessment and resilience strategies for flood risk management: A case study of Surat City. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 40, 101155.

Walker, G., & Burningham, K. (2011). Flood risk, vulnerability and environmental justice: evidence and evaluation of inequality in a UK context. *Critical social policy*, 31(2), 216-240.

Walsh, C. J., Fletcher, T. D., Bos, D. G., & Imberger, S. J. (2015). Restoring a stream through retention of urban stormwater runoff: a catchment-scale experiment in a social–ecological system. *Freshwater Science*, 34(3), 1161-1168.

Walsh, C. J., Roy, A. H., Feminella, J. W., Cottingham, P. D., Groffman, P. M., & Morgan, R. P. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3), 706-723.

White, M. D., & Greer, K. A. (2006). The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Penasquitos Creek, California. *Landscape and urban Planning*, 74(2), 125-138.

Zilbert, L. (2010). Evolución de las Políticas de Reducción de Riesgo de Desastres. En Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD (Ed.), Diplomado de Especialización en Desarrollo Local y Gestión Integral del Riesgo (hoja de ruta) PNUD: escuela virtual.

Zoppou, C. (2001). Revisión de modelos de aguas pluviales urbanas. Modelado ambiental y software , 16 (3), 195-231.

Zucchetti, A., Gutierrez, C., Gonzales, P., Alcantara, T., & Hartmann, N. (2021). Guía: Infraestructura verde y soluciones basadas en la naturaleza para la adaptación al cambio climático.