INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano

Sustentabilidad y Tecnología

PROYECTO DE APLICACIÓN PROFESIONAL (PAP)

Infraestructura para la Gestión Inteligente del Agua

ITESO, Universidad Jesuita de Guadalajara

PRESENTAN:

Avalos Loaiza Antonio, ingeniería civil

Avalos Loaiza Fernando, ingeniería civil

Azano Carrillo Yoshiro Susumu, ingeniería civil

Camacho Nolazco Luis Angel, ingeniería civil

Galindo Namur Sebastián, ingeniería ambiental

Maliachi Alvarez André, ingeniería civil

Novoa Carrera Eduardo Alfredo, ingeniería civil

Soriano Dorta Luis Jaime, ingeniería civil

Villalobos Romero Emilia Carolina, ingeniería ambiental

Yuen Gutiérrez Eileen Sofia, ingeniería ambiental

Profesores PAP: Dr. José Manuel Ramírez León, Dr. David Vargas del Río, Pablo E. Zamudio Zavala.

Tlaquepaque, Jalisco, 26 de noviembre 2024.

ÍNDICE

Índice de Figuras 2

Índice de Tablas 3

Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional 5

1. Introducción 6

1.1 Problemática 6

1.2 Justificación 7

2. Marco Teórico 8

2.1 Ciclo Hidrológico 8

2.2 Aguas Subterráneas 11

2.2.1. Acuíferos 13

2.3 Impermeabilización Urbana de Suelos 22

2.4 Calidad del agua 26

2.4.1 Calidad del agua superficial 29

2.4.2 Calidad del agua subterránea 31

2.5 Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) o Sistemas de Diseño Urbano Sensibles al Agua (WSUDS) 33

2.6 Métodos de Recarga Artificial de Acuíferos 48

2.6.1 Recarga superficial 50

2.6.2 Recarga profunda 51

2.7 Monitoreo ambiental a nivel urbano 55

2.7.1 Gestión informada del agua 56
2.7.2 Proyectos de monitoreo a nivel internacional 62
2.7.3 Tecnologías existentes y desarrollo a futuro 66
3. Marco Contextual 67
3.1 San Juan de Abajo3.1.1 Introducción 67
3.1.2 Uso de suelo 67
3.1.4 Caracterización hidrológica preliminar 73
3.2 Zona Poniente de Guadalajara 84
3.2.1 Introducción 84
3.2.2 Definición del área de estudio 84
3.2.3 Demografía 85
3.2.4 Desarrollo Urbano 86
3.2.5 Uso de suelo 86
4. Resultados 88
4.1 San Juan de Abajo 88
4.2 Zona Poniente de Guadalajara 88
4.2.1 El título que le pongan Yoshiro y Jaime 88
4.2.2 El título que le pongan Antonio y Fernando 88
Referencias 97
Referencias Marco Teórico 97
Referencias Marco Contextual 112
Referencias Resultados 114

Índice de Figuras

Figura 1. El ciclo del agua (United States Geological Survey [USDG], s.f.) 11
Figura 2. Acuífero libre (Sánchez San Román). 14

Figura 3. Acuífero confinado (Sánchez San Román, s.f.). 15
Figura 4. Acuífero semiconfinado (Sánchez San Román)..... 16
Figura 5. Acuífero colgado (Sánchez San Román). 16
Figura 6. Derrumbes por descenso de los niveles freáticos (Milenio, 2017). 17
Figura 7. Porosidad eficaz (Sánchez San Román). 19
Figura 8. Gradiente hidráulico (Sánchez San Román). 20
Figura 9. Distribución del agua subterránea (Tarbuck & Lutgens, 2005). 21
Figura 10. Comparación gráfica del uso de suelo forestal vs. urbano (Hidrología Sostenible, s.f.). 22
Figura 11. Erosión de pista urbana Arequipa (Kuroiwa, 2002). 23
Figura 12. Inundación en la zona de Plaza del Sol (Orozco, 2020). 24
Figura 13. Cuatro pilares de los SuDS (Woods Ballard et al., 2015). 36
Figura 14. Diseño base de un área de biorremediación (Paus & Braskerud, 2014)..... 38
Figura 15. Ejemplo de un área de biorremediación (Abellán, 2016). 38
Figura 16. Diseño base zanja de infiltración (Susdrain, 2021). 39
Figura 17. Diseño base techo verde (Arquitectura y empresa, 2021). 40
Figura 18. Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) (Susdrain/CIRIA, 2014)..... 41
Figura 19. Barril de lluvia para riego de huertos urbanos, estrategia de gestión de escorrentía de aguas pluviales (Jennings et al., 2013). 43
Figura 20. Sección transversal de jardín de lluvia. 45
Figura 21. Experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo (IGRAC, 2021). 47
Figura 22. Método de infiltración de Bourguet, 1971..... 51
Figura 23. Método de Bourguet para recarga profunda, 1971 54
Figura 24. Metodología City Blueprint (Feingold et al., 2018). 61
Figura 25. Sistemas de aguas pluviales inteligentes (Kerkez et al., 2016)..... 63
Figura 26 Ciudades esponja (China-Britain Business Focus, 2016) 65

Índice de Tablas

Tabla 1. Distribución del agua en el mundo, (Craig, Vaughan, & Skinner, 2007)..... 12

Tabla 2. Tipos de plantas más comunes para techos verdes (Molano, 2016). 40
Tabla 3. Síntesis de los beneficios de los distintos tipos de SuDS (Susdrain, s.f.). 45
Tabla 4. Roles de la gestión y gobernanza del agua (Grigg, 2011). 57

Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional

Los Proyectos de Aplicación Profesional (PAP) son una modalidad educativa del ITESO en la que el estudiante aplica sus saberes y competencias socio-profesionales para el desarrollo de un proyecto que plantea soluciones a problemas de entornos reales. Su espíritu está dirigido para que el estudiante ejerza su profesión mediante una perspectiva ética y socialmente responsable.

A través de las actividades realizadas en el PAP, se acreditan el servicio social y la opción terminal. Así, en este reporte se documentan las actividades del desarrollo del proyecto, sus incidencias en el entorno y las reflexiones y aprendizajes profesionales que el estudiante desarrolló durante su labor.

1. Introducción

1.1 Problemática

El agua constituye el recurso más vital para la vida en la Tierra. Representa el núcleo del desarrollo sostenible y es fundamental para el desarrollo social y económico, la producción alimentaria, los ecosistemas, la energía y los medios de vida sostenibles. Además, es un factor crítico en la adaptación al cambio climático y un vínculo esencial entre la sociedad y el medio ambiente (ONU, 2021). Las cifras son alarmantes: 2.200 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura (OMS/UNICEF 2019), mientras 2.000 millones viven en países con escasez hídrica (UN 2019). Más preocupante aún, el 80% de las aguas residuales retornan al ecosistema sin tratamiento o reutilización (UNESCO, 2017).

La falta de acceso al agua limpia no solo compromete derechos fundamentales como la vivienda, la salud y la educación, sino que también impacta directamente la industria y las oportunidades de empleo. A nivel global, esta carencia se ha convertido en una fuente recurrente de conflictos sociales. En México, la problemática hídrica es especialmente crítica en las regiones central y norte del país. Según el Instituto de Recursos Mundiales (WRI), México figura entre los 25 países con mayor estrés hídrico mundial.

Contrario a la creencia popular de que el problema se reduce a la escasez, la situación está asociada con una mala gestión del agua de lluvia que resulta de la ruptura de los ciclos naturales que provoca la industrialización del territorio, pues a lo largo del año llueve considerable más agua de la que se consume (Vanegas, Vargas, Ochoa, & Grindlay, 2022). Un ejemplo revelador es el Valle de México, donde se extraen 55 metros cúbicos por segundo, mientras solo se recargan 25 metros cúbicos, es decir, menos de la mitad de lo extraído (ONU, 2021).

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) ejemplifica esta compleja realidad. A pesar de registrar un promedio de precipitación anual de 942 mm —suficiente para abastecer la ciudad e incluso localidades cercanas—, la inadecuada planificación urbana ha provocado la impermeabilización del territorio. Aproximadamente el 80% del agua pluvial termina en colectores, generando inundaciones y desaprovechando un recurso valioso. Para compensar este

déficit, la región depende de fuentes como el Lago de Chapala, la presa Calderón y pozos profundos que sobreexplotan los acuíferos, sin lograr cubrir completamente la demanda hídrica.

La problemática se agrava con los desastres naturales. Las intensas tormentas veraniegas, con precipitaciones superiores a 25 mm/h, combinadas con la degradación superficial, generan inundaciones devastadoras. Colonias enteras quedan anegadas, vialidades se vuelven intransitables y arroyos como el "Arroyo Seco" desbordan, obligando al desalojo de hogares. En suma, nos enfrentamos a ciudades hídricamente insostenibles, caracterizadas por consumos extremos, desperdicio alarmante y una incapacidad sistemática para gestionar eficientemente los recursos pluviales.

1.2 Justificación

En los últimos años, el AMG ha experimentado un crecimiento poblacional exponencial que ha derivado en la impermeabilización del suelo. Este proceso provoca una pérdida significativa en la capacidad de retención y filtración del agua pluvial, incrementando el volumen y la velocidad de escorrentía hacia zonas topográficamente más bajas (López, 2015).

Diversas estrategias se han implementado para mitigar las inundaciones. El sistema interceptor del poniente, compuesto por canales como el de Santa Catalina y Tchaikovsky, fue diseñado para retener flujos de escorrentía durante precipitaciones intensas, con el objetivo primordial de prevenir inundaciones, no de realizar recargas superficiales (Vanegas, Vargas, Ochoa, & Grindlay, 2022). Otras iniciativas incluyen las "cámaras horizontales de infiltración", parte del Sistema Acuífero de Regulación e Infiltración (Gobierno de Zapopan, 2020), y los "pozos de infiltración" en desarrollos urbanos (SIAPA, 2014). Sin embargo, estas soluciones presentan limitaciones significativas.

Las cámaras e infiltraciones superficiales quedan restringidas a las primeras capas del subsuelo, caracterizadas por una estratigrafía de permeabilidad variable. La infiltración, frecuentemente realizada sobre terraplenes, genera corrientes subterráneas que arrastran partículas finas, provocando cavidades que resultan en socavones, hundimientos y deterioro de construcciones (Vanegas, Vargas, Ochoa, & Grindlay, 2022). Propuestas como la del Dr. José Arturo Gleason

Espíndola, de instalar cisternas para almacenar agua pluvial y recargar mantos acuíferos, han tropezado con la complejidad de readaptar la infraestructura urbana existente (De la Cruz & Gleason, 2018).

Alternativas prometedoras incluyen métodos de recarga artificial de acuíferos —tanto superficiales como subsuperficiales— y los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Estas tecnologías promueven la recarga de aguas subterráneas, conservan flujos superficiales y reducen el volumen y velocidad de escorrentía en zonas de alto riesgo. Las condiciones geohidrológicas del AMG, con suelos volcánicos de alta permeabilidad, favorecen la implementación de soluciones como áreas de biorretención, superficies permeables, pozos de infiltración, techos verdes y humedales (Fletcher et al., 2014; Zamudio, Vargas, & Ochoa, 2016).

La implementación efectiva requiere estudios hidrológicos y geohidrológicos detallados, con estaciones de monitoreo que permitan simular el flujo hídrico urbano. Estos estudios no solo optimizarán las soluciones técnicas, sino que pueden fomentar la participación ciudadana mediante la transparencia y el acceso a información en tiempo real. El objetivo final de este Proyecto de Aplicación Profesional es generar un estudio interdisciplinario que sirva como base para instrumentar tecnologías que restauren el ciclo hidrológico y promuevan la participación comunitaria.

2. Marco Teórico

2.1 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico constituye un proceso natural complejo que permite la circulación del recurso hídrico, desde su precipitación como lluvia, el flujo superficial y subterráneo, hasta su reincorporación atmosférica en forma de vapor. Este tránsito ocurre mediante la evaporación de cuerpos de agua superficial o través de la transpiración vegetal (Rascón & Jiménez, 2001). En este ciclo, el agua experimenta transformaciones entre sus diferentes estados físicos, absorbiendo y liberando energía para lograr su movimiento por océanos, atmósfera y tierra (Auge M., 2007). Bajo las temperaturas terrestres, el agua transita entre sus tres fases: sólida, líquida y gaseosa, configurando así el ciclo hidrológico (Fernández & Du Mortier, s.f).

Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USDG), las fases del ciclo hídrico ocurren de forma secuencial o simultánea en toda la biósfera. Se categorizan en dieciséis componentes, asumiendo que el ciclo se inicia en los océanos:

1. Almacenamiento de agua en los océanos
2. Evaporación
3. Agua atmosférica
4. Condensación
5. Precipitación
6. Agua almacenada en hielos y nieve
7. Agua de deshielo
8. Escorrentías superficiales
9. Corrientes de agua
10. Almacenamiento de agua dulce
11. Infiltración
12. Descarga de agua subterránea
13. Manantiales
14. Transpiración
15. Agua subterránea almacenada
16. Distribución global del agua

Cada etapa desempeña un papel crucial en este intrincado proceso. La precipitación y evaporación se consideran los principales factores climáticos, representando las variables de entrada y salida del ciclo (María Paula & Jorge, 2012). La precipitación —también llamada condensación— consiste en la caída de agua líquida o sólida desde la atmósfera (Oki, Entekhabi, & Ives, 2020). La evaporación, por su parte, es el proceso mediante el cual el agua superficial pasa del estado líquido al vapor, siendo la energía solar su principal detonante (María Paula & Jorge, 2012).

En la etapa de precipitación, el agua puede seguir tres trayectorias principales:

- Evapotranspiración: Absorción directa del agua por la vegetación (Oki, Entekhabi, & Ives, 2020).

- Infiltración: Proceso por el cual el agua transita de la superficie al subsuelo. Dependiendo del volumen, puede recargar acuíferos o retenerse en la zona vadosa para ser posteriormente transpirada o evaporada (Campos, 1998).
- Escorrentías: Agua que se desliza sobre superficies naturales o artificiales, desembocando en arroyos o ríos hasta cuerpos lénticos como lagos, lagunas u océanos (Auge M., 2007).

Comprender el ciclo hidrológico resulta indispensable para implementar planes de mitigación ambiental enfocados en la conservación hídrica. Sin embargo, la actividad humana ha comenzado a interferir significativamente en este ciclo, generando efectos adversos para la población, infraestructura urbana y ecosistemas (Press & Siever, 2001):

- Desviación hídrica hacia zonas áridas para riego y abastecimiento poblacional
- Pavimentación de suelos que reduce la capacidad de infiltración
- Contribución antropogénica al cambio climático, provocando el derretimiento polar y alterando el balance hídrico

Estas disrupciones provocan problemas como inundaciones y escasez hídrica, afectando directamente los niveles de agua subterránea. En lugar de infiltrarse a los acuíferos, el agua es drenada por la infraestructura urbana de recolección (Vörösmarty & Sahagian, 2000).

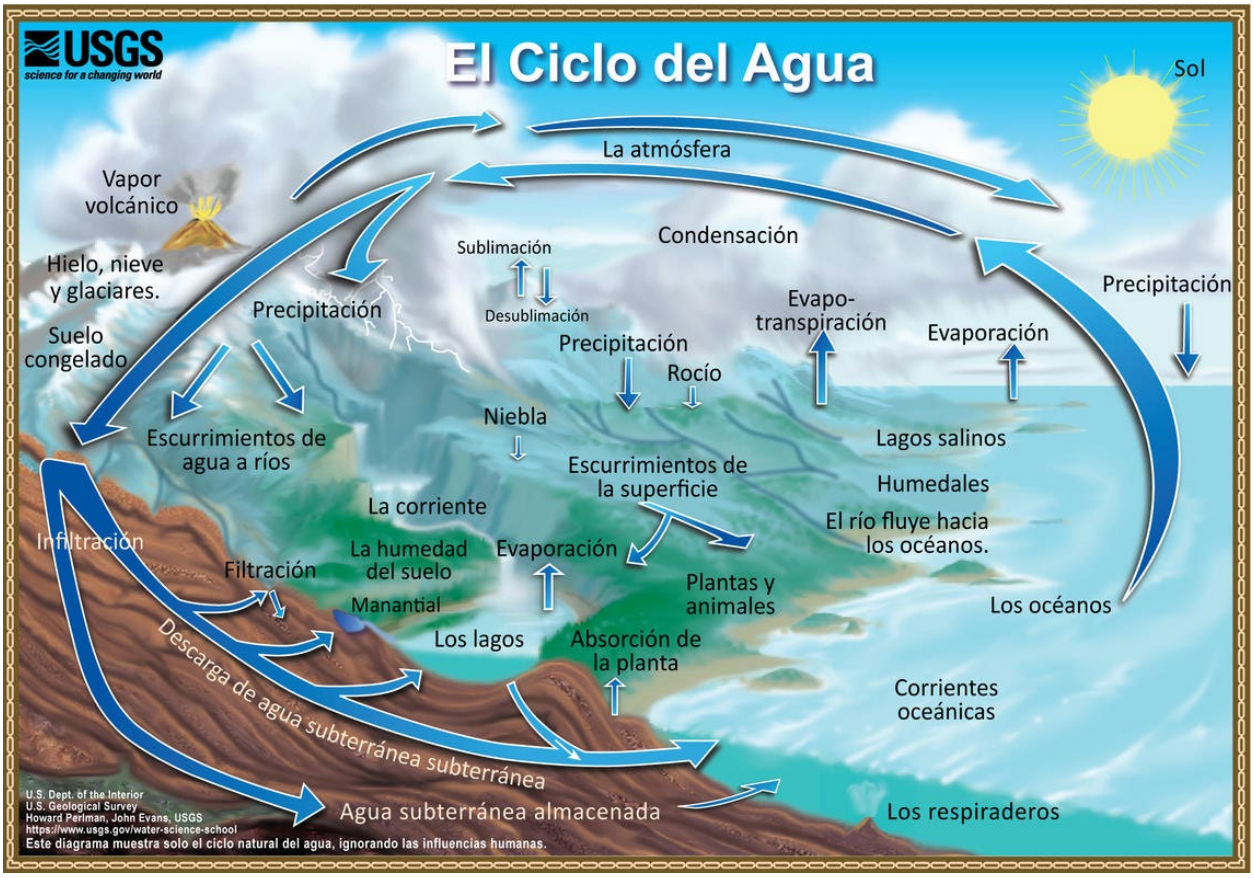


Figura 1. El ciclo del agua (United States Geological Survey [USDG], s.f.)

2.2 Aguas Subterráneas

El agua se encuentra en movimiento constante a través del ciclo hidrológico, transitando por sus tres estados físicos en la atmósfera, superficie terrestre y subsuelo. Los volúmenes y tiempos de residencia varían en cada espacio. Aunque el volumen total permanece estable en los últimos 30-40 mil años, su calidad ha experimentado un deterioro significativo debido al crecimiento poblacional y sus actividades asociadas (Auge M., 2007).

Mientras el 70% de la superficie planetaria está cubierta por agua, solo el 2.53% corresponde a agua dulce (Gómez Ugalde et al., 2012). Desde una perspectiva de recurso hídrico aprovechable, se excluye el agua oceánica (97.2%) por su salinidad y los casquetes glaciares (2.15%) por su inaccesibilidad. Consecuentemente, únicamente el 0.65% del agua dulce resulta potencialmente utilizable por los seres humanos.

Aunadas al ciclo hidrológico, las oscilaciones temporales como los fenómenos el niño y la niña son fluctuaciones climáticas de ciclo largo que hacen impredecible la renovación del recurso hídrico en una determinada zona, por lo que resulta de suma importancia una gestión del recurso que prevea su disponibilidad a largo plazo para poder abastecer las necesidades de la sociedad.

La siguiente tabla (Tabla 1), muestra la distribución del agua en el mundo según el Servicio Geológico de los Estados Unidos:

Tabla 1. Distribución del agua en el mundo, (Craig, Vaughan, & Skinner, 2007).

	Localización	Volumen de agua (km^3)	Porcentaje de agua total
Agua superficial	Lagos de agua dulce	125×10^3	0.009
	Lagos salinos y mares interiores	104×10^3	0.008
	Media en canales de corrientes	1×10^3	0.0001
Agua subsuperficial	Agua vadosa (incluida la humedad del suelo)	67×10^3	0.005
	Aguas subterráneas hasta una profundidad de media milla	4.2×10^6	0.31
	Aguas subterráneas profundas	4.2×10^6	0.31
Otras localizaciones	Casquetes y otros glaciares	29×10^6	2.15
	Atmósfera	1.3×10^3	0.001
	Océano	1.320×10^6	97.2

Las aguas subterráneas son un elemento fundamental del ciclo hidrológico. Es el agua de lluvia y de los cuerpos de agua que se infiltra en el suelo, y se acumula debajo de la superficie. El agua de lluvia puede ser atrapada por las plantas cerca de la superficie, o avanzar hacia abajo y recargar los acuíferos donde fluye constantemente entre los poros del suelo y las fracturas de la roca. Algunas veces alcanza la superficie en forma de manantiales y humedales; otras, fluye hacia los océanos; y otras, alcanza acuíferos muy profundos y se queda ahí por mucho tiempo (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019).

Como se puede observar en la Tabla 1, el agua subterránea representa el 0.31% del agua total, casi la mitad del agua disponible para el uso humano. Además, se estima que el agua subterránea tiene un volumen 35 veces mayor al volumen de todos los lagos y mares interiores en el planeta. Ambas son razones por las que existe interés en trabajar en su conservación.

En seguida, se presentan conceptos geológicos de importancia para tener una mayor comprensión del agua subterránea (Custodio & Llamas, 2001):

- Acuífero: estrato o formación geológica que permite la circulación de agua por sus poros o grietas. El agua contenida aquí es la que puede ser extraída y aprovechada.
- Acuicludo: formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable, pero no permite que circule a través de ella.
- Acuitardo: formación geológica semipermeable que contiene agua en cantidad apreciable, pero circula lentamente y con dificultad, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas.
- Acuífugo: formación geológica subterránea que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella. Son materiales no porosos ni fisurados e impermeables.

2.2.1. Acuíferos

Existen varias clasificaciones de acuíferos según sus características. Los tipos de acuíferos según la presión a la que se encuentra el agua son: libres, confinados, semiconfinados y colgados. Los acuíferos libres son aquellos que su límite superior es el nivel freático por lo que está a presión

atmosférica. Cuando se perfora un pozo, a esta altura es a la cual se presentará agua, o nivel freático. Este tipo de acuífero tiene un espesor variable, conocido como espesor saturado.

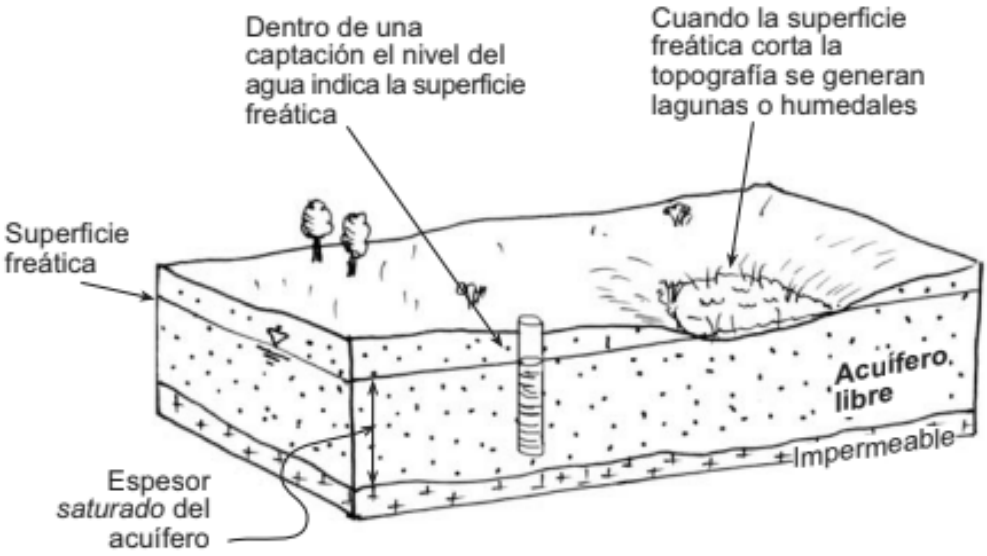


Figura 2. Acuífero libre (Sánchez San Román).

En cambio, los acuíferos confinados tienen como límite superior una capa impermeable, lo que genera que en ese punto la presión sea mayor a la atmosférica y que su espesor sea fijo. En el caso de tener un pozo en un acuífero confinado el agua sube por las diferencias de presión a un nivel posiblemente más alto que el límite superior del acuífero. A este nivel se le llama nivel piezométrico. Cuando el nivel piezométrico de un pozo se encuentra sobre la superficie topográfica se le llama pozo surgente.

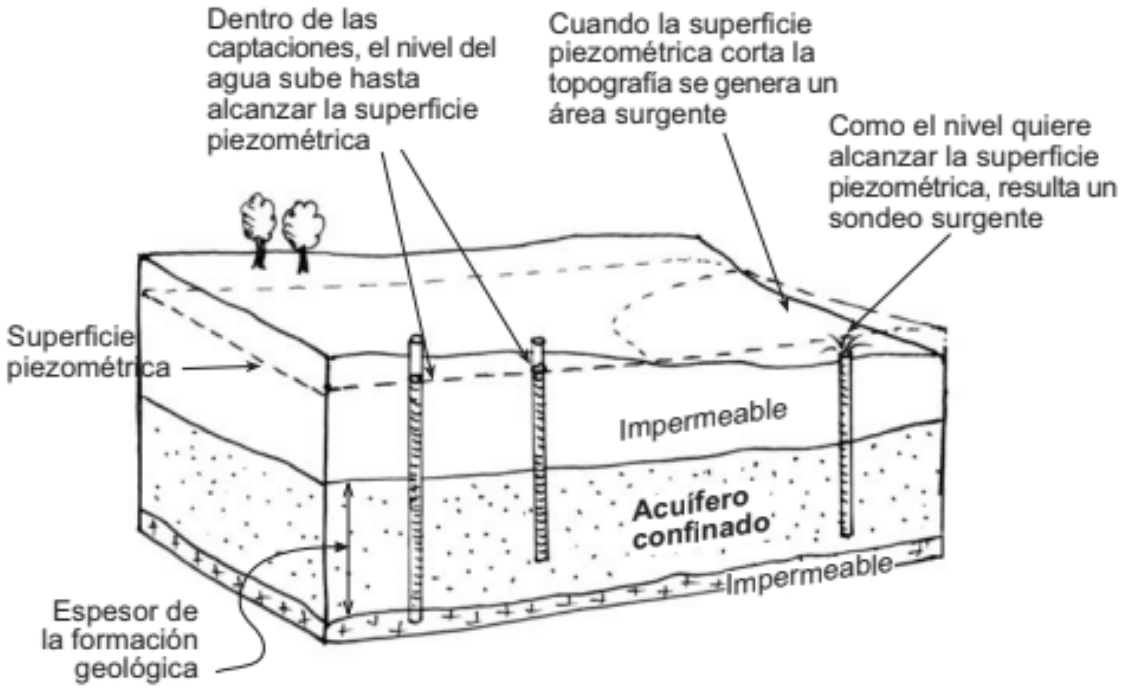


Figura 3. Acuífero confinado (Sánchez San Román, s.f.).

Los acuíferos semiconfinados son acuíferos a presión, pero algunas de sus capas confinantes son semipermeables; permiten pequeñas filtraciones. Y los colgados son reducidos en tamaño, y se generan cuando la superficie freática se encuentra a cierta profundidad y existe un nivel impermeable que lo sustenta (Sánchez San Román).

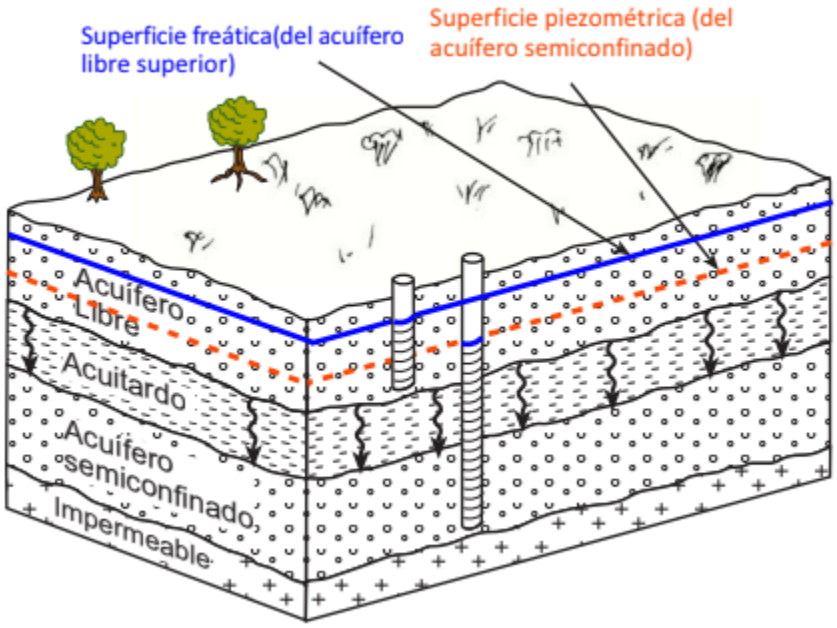


Figura 4. Acuífero semiconfinado (Sánchez San Román).

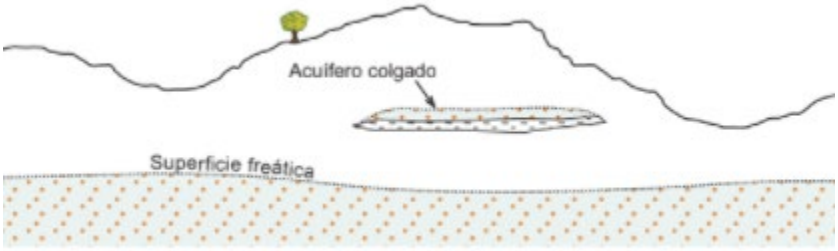


Figura 5. Acuífero colgado (Sánchez San Román).

El proceso de infiltración del agua es el único método natural de recarga de acuíferos. Cuando llueve, parte del agua escurre por la superficie, parte se evapora, y el resto se infiltra en el terreno. La fracción de agua infiltrada, que no se queda en la zona vadosa, llega al nivel freático. Dicho proceso es extremadamente lento, puede durar hasta cientos de años. Un ejemplo se presenta en los Estados Unidos donde se estima que, si se extrajera toda el agua subterránea del país hasta una profundidad de 750 metros, tardaría 150 años en realizarse una recarga completa. Los acuíferos se consideran recursos no renovables, ya que la velocidad de extracción supera la de infiltración, otra razón por la que se enfatiza en el cuidado del recurso.

El rápido descenso de los niveles freáticos a nivel mundial es un hecho, y, además de representar un problema para la disponibilidad del agua, también genera otras problemáticas como peligro para los asentamientos humanos. La extracción de grandes volúmenes de agua reduce la presión existente en el subsuelo, lo cual hace que el suelo ceda ante el peso de construcciones sobre él, generando subsidencias en el terreno y grandes derrumbes de edificaciones y accidentes en su camino.

Figura 6. Derrumbes por descenso de los niveles freáticos (Milenio, 2017).

En los acuíferos el agua se renueva muy lentamente en comparación a otros cuerpos de agua superficiales. Puede tomar años, o décadas; sin embargo, dependiendo de las características geológicas, en algunos su explotación implica su agotamiento definitivo. (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua , 2019). En la práctica resulta muy difícil y a veces imposible establecer el límite por encima del cual la explotación se transforma en sobreexplotación (Auge M. , 2006), pero está claro que esto suele generar consecuencias como la disminución de su reserva y de la productividad, salinización, contaminación, subsidencia, desecamiento, etc.

Además del problema de la escasez de agua subterránea, se tiene el problema de la contaminación del mismo recurso. Los acuíferos pueden limpiar naturalmente el agua de

contaminantes biodegradables gracias a las bacterias presentes, pero es difícil disolver o eliminar productos y/o contaminantes químicos, que llegan infiltrando agua contaminada por aguas residuales de fábricas, aceites de vehículos, etc.

2.2.2. Factores que determinan el movimiento hídrico subsuperficial

Las aguas subterráneas circulan a través de los acuíferos, formaciones geológicas compuestas por innumerables poros diminutos entre granos de suelo y sedimento, así como por estrechas diaclasas y fracturas en el lecho rocoso. La infiltración, proceso mediante el cual el agua llega al subsuelo, depende de varios factores: la pendiente del terreno, la vegetación, la profundidad del suelo y el tipo de roca (Craig, Vaughan, & Skinner, 2007).

Los principales factores que influyen en el movimiento del agua subsuperficial son la porosidad, permeabilidad y transmisividad. Existen dos tipos de porosidad:

1. Porosidad total (mt): Se define como el porcentaje del volumen total de roca o sedimento ocupado por poros, siendo el principal factor para el almacenamiento de agua subterránea. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

   mt = Volumen de huecos / Volumen total. Ecuación 1.

   Cuando se mezclan sedimentos de diversos tamaños, la porosidad disminuye, ya que las partículas más finas tienden a ocupar los espacios entre los granos más grandes.

2. Porosidad eficaz (me): Se expresa en porcentaje y se calcula con la siguiente ecuación:

   me = Volumen de agua drenada por gravedad / Volumen total. Ecuación 2.

   Este concepto implica que una porción del agua contenida en una muestra queda atrapada en los poros, como se ilustra en la Figura 45. La cantidad de agua que no drena por gravedad se denomina retención específica y se obtiene restando la porosidad eficaz de la porosidad total.

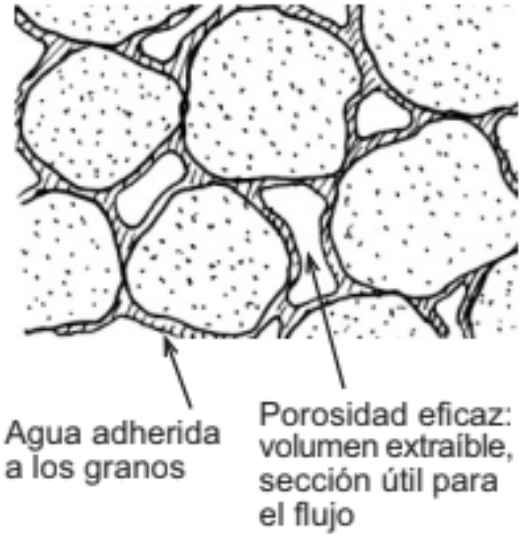


Figura 7. Porosidad eficaz (Sánchez San Román).

La permeabilidad de un material representa su capacidad para transmitir un fluido y es tan importante como la porosidad en la formación de acuíferos. Un material puede ser muy poroso pero no permitir el movimiento del agua si sus poros no están interconectados. La arcilla ejemplifica esta situación: posee una gran porosidad pero una permeabilidad tan baja que se considera un estrato impermeable.

En hidrogeología, la permeabilidad se conoce como conductividad hidráulica (K), medida en unidades como m/d y cm/s. Se describe mediante la Ley de Darcy:

$Q/A = K * i$ Ecuación 3.

Donde:

Q = Caudal

A = Área transversal

K = Conductividad hidráulica

$i = (\Delta h/\Delta l)$ = Gradiente hidráulico

El gradiente hidráulico representa la pendiente del nivel freático e influye directamente en la velocidad del flujo subterráneo. Cuanto más pronunciada es la pendiente, más rápido se mueve el agua debido a una mayor diferencia de presión entre dos puntos.

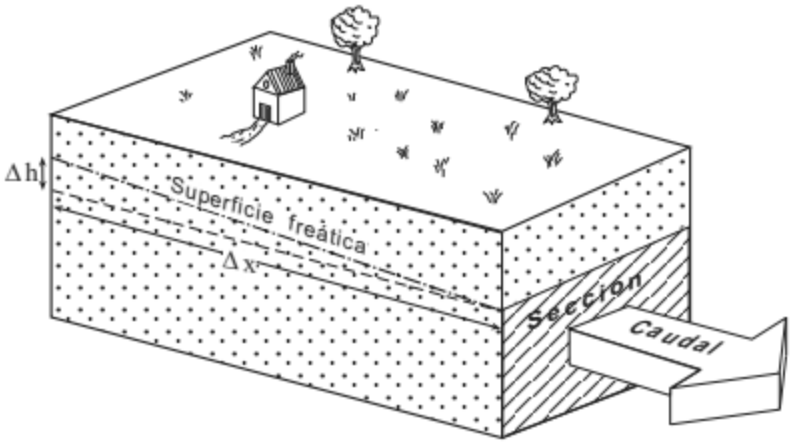


Figura 8. Gradiente hidráulico (Sánchez San Román).

La transmisividad es un parámetro que indica la facilidad con la que el agua circula horizontalmente a través de una formación geológica, dependiendo directamente de su espesor:

Transmisividad = K * espesor Ecuación 4.

El nivel freático representa la superficie bajo la cual los poros y fracturas están completamente saturados de agua, como muestra la Figura. Por encima de este nivel se encuentran:

- Franja capilar: Sección donde el agua asciende por capilaridad a través de los poros.
- Zona vadosa: Zona no saturada por la que el agua fluye durante las lluvias y que constituye el principal suministro hídrico para las plantas.

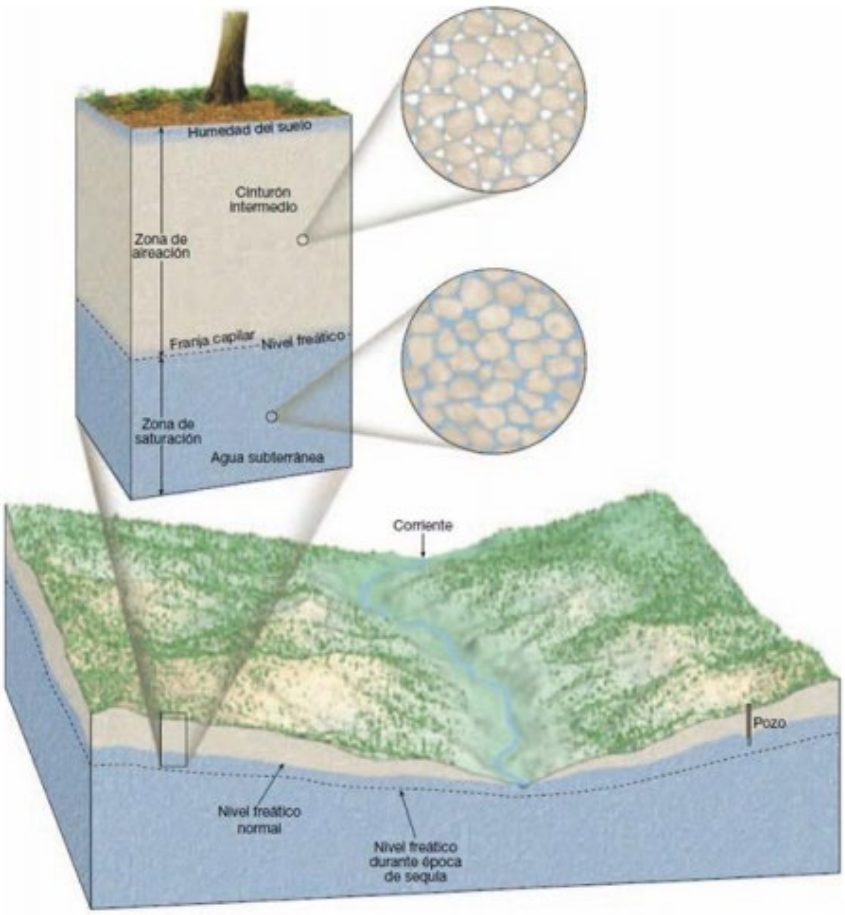


Figura 9. Distribución del agua subterránea (Tarbuck & Lutgens, 2005).

El nivel piezométrico, por su parte, se define como la cota que alcanza el agua respecto a un plano de referencia cuando se deja a presión atmosférica, representando la capacidad de trabajo potencial de una gota de agua subterránea. Es importante distinguir que en acuíferos libres coincide con el nivel freático, mientras que en acuíferos presurizados se encuentra a menor profundidad.

La mayoría de los ríos y lagos en equilibrio con su entorno durante el periodo de estiaje indican la intersección entre el nivel freático y la superficie topográfica, evidenciando que dicha agua proviene del afloramiento lateral de aguas subterráneas almacenadas previamente (Craig, Vaughan, & Skinner, 2007).

2.3 Impermeabilización Urbana de Suelos

La impermeabilización urbana de una cuenca hidrográfica se define como el cambio de uso de suelo de condiciones rurales a condiciones urbanas (Tobias, 2013). Este proceso se complejiza debido al crecimiento exponencial de la población, generando consecuencias como la contaminación de suelos y la pérdida de ecosistemas (Salas, Coy, Acuña, Páez, & Upegui, 2019). Estos cambios en las superficies provocan dos efectos principales:

1. Disminución de la capacidad de infiltración del agua
2. Limitación de las coberturas vegetales que interceptan la lluvia

La magnitud de estos efectos depende directamente del porcentaje de terreno cubierto por superficies impermeables (Tarbuck & Lutgens, 2000). Durante los periodos de lluvia, se observan escorrentías superficiales más elevadas y rápidas debido al incremento de la cubierta impermeable. La Figura 48 muestra una comparación gráfica entre el uso de suelo forestal, donde se infiltra la mayor parte del agua pluvial, y el uso urbano, donde la mayoría del agua se pierde en escorrentías superficiales (Artmann, 2014).

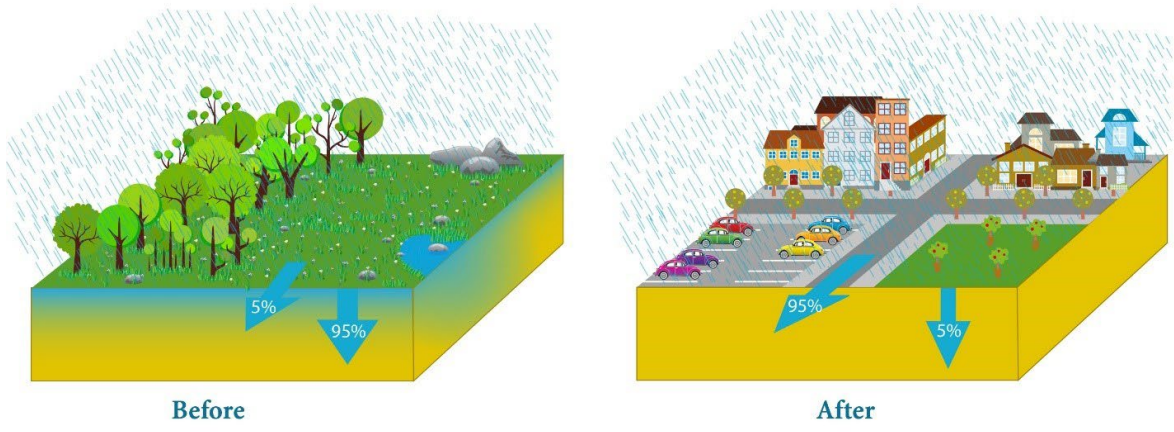


Figura 10. Comparación gráfica del uso de suelo forestal vs. urbano (Hidrología Sostenible, s.f.).

Consecuencias de la impermeabilización urbana de suelos:

1. Infraestructura y Riesgos Hidráulicos:

- Colapso de infraestructuras (Figura 49)

- Peligrosas inundaciones (Figura 50)
- Estas situaciones se originan por el crecimiento poblacional y malas prácticas como arrojar residuos sólidos a corrientes de agua

Figura 11. Erosión de pista urbana Arequipa (Kuroiwa, 2002).

Figura 12. Inundación en la zona de Plaza del Sol (Orozco, 2020).

2. Alteración del Ciclo Hidrológico:
- Reducción de la infiltración al subsuelo
- Disminución del flujo base de las cuencas
- Ocurre cuando el suelo natural se sella con superficies artificiales impenetrables debido al desarrollo residencial, comercial e industrial (Science for Environment Policy, 2012)

3. Impactos en las Aguas Subterráneas:
- Descenso del nivel freático
- Necesidad de desviar agua desde lugares lejanos para abastecer grandes ciudades
- Extracción de aguas subterráneas (Castillo & Carrasco, 2019)

4. Efectos en la Escorrentía y Evapotranspiración:
- Aumento de la escorrentía superficial
- Eliminación rápida del agua de lluvia sin tiempo suficiente para absorción
- Reducción del agua disponible para evapotranspiración y enfriamiento

Consideraciones del Cambio Climático: El aumento poblacional, combinado con el cambio climático, podría agravar los problemas de flujo de agua en zonas urbanas. Se esperan impactos como:

- Temperaturas potencialmente más altas
- Variaciones en los patrones de precipitación
- Alteración del balance hídrico y regulación del agua a escala local y de cuenca

Investigaciones como la realizada en Beijing por Miao et al. (2011) demuestran que las ciudades influyen significativamente en el movimiento de tormentas y la cantidad de lluvia. Los usos urbanos del suelo tienden a concentrar las precipitaciones en las mismas ciudades e incluso pueden aumentar el porcentaje de áreas con lluvias intensas.

Objetivos y Estrategias:

- Gestionar los cuerpos de agua para obtener máximo beneficio presente y futuro (Sachs, 2015)
- Determinar zonas con mayores riesgos ambientales
- Utilizar análisis espacial como herramienta para:
    - Estudiar el territorio
    - Determinar límites de asentamientos
    - Generar planificaciones integrales
    - Detectar zonas de mayor riesgo (Tobias, 2013)

Soluciones Propuestas: Las grandes metrópolis requieren implementar planes de gestión hídrica para resolver problemas de impermeabilización urbana. Una estrategia destacada son los Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS):

- Diseñados para maximizar beneficios de la gestión de aguas superficiales
- Objetivo: Integrar el ciclo del agua en el diseño urbano
- Buscan mejorar el comportamiento medioambiental en la urbanización de ciudades (Woods Ballard et al., 2015; Fletcher et al., 2014)

2.4 Calidad del agua

El agua es fundamental para el ser humano; no solo para beber, sino para cocinar, el saneamiento personal y diversas actividades industriales. Para satisfacer estas necesidades, la calidad del agua utilizada no debe representar ningún riesgo para la salud humana. Sin embargo, el aumento de la población mundial provoca un incremento en la demanda de los recursos naturales. Por lo tanto, es imperativo comprender que la calidad del agua en la naturaleza afecta la condición de los ecosistemas, repercutiendo directamente en la vida de los seres vivos (Sachs, 2015).

En lo que al ciclo hidrológico respecta, el recurso hídrico también sufre de algunas alteraciones naturales, además de las antropogénicas mencionadas con anterioridad. Este es el caso del agua de lluvia que, al tocar la superficie de la Tierra, disuelve los compuestos que hay en ella, causando procesos de alteración y agregando sustancias reactivas. Además, se genera mayor cantidad de sólidos disueltos totales en los ríos y aguas subterráneas, en comparación con lo que se presenta en el agua que escurre en la superficie. Cuando los iones o elementos se combinan, forman compuestos orgánicos e inorgánicos. Estos últimos incluyen los metales y no metales que originan los minerales que forman rocas que, a su vez, constituyen la corteza terrestre y, al tener contacto con el agua, producen reacción por los iones presentes (Agrawal, Pandey, & Sharma, 2010).

Un punto relevante para la protección del agua es el impacto sobre la salud pública, que se da a través de los sistemas de abastecimiento de agua, provenientes de distintas fuentes. Por causas que pueden ser naturales, pero más frecuentemente creadas por la actividad industrial, se alteran las características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de dichas fuentes. Esto incrementa el nivel de riesgo sanitario presente en el agua; es decir, la susceptibilidad de transportar agentes contaminantes que puedan causar enfermedades de origen hídrico al hombre y los animales, o alterar el normal desempeño de las labores dentro del hogar o la industria (Palansooriya et al., 2019).

Las aportaciones de contaminantes pueden ser de origen natural. En su trayectoria por el ciclo hidrológico, el agua libera o acepta iones y minerales que alteran su constitución, lo que es muy importante que se entienda y se considere para determinar el uso que se le dará al agua en su lugar de captación. En su trayectoria por el ciclo hidrológico, el agua libera o acepta iones y minerales que alteran su constitución, lo cual es muy importante que se entienda y se considere para poder determinar el uso que se le dará al agua en su lugar de captación (Agrawal, Pandey, & Sharma, 2010).

La aportación de contaminantes de mayor impacto es la que resulta de las actividades humanas. Los seres humanos utilizamos cuerpos de agua como medios convenientes para la eliminación de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas, degradando la calidad de estos. Sin embargo, su uso significa la adición de sustancias contaminantes que poseen consecuencias directas para la salud humana y, a su vez, modifica su disponibilidad (Zaporozec, 1981).

El riesgo sanitario presente en el agua es el resultado de comparar la vulnerabilidad de la población frente a una amenaza o factores de riesgo (Tinoco, 2019). Dichos riesgos pueden clasificarse como agudos o crónicos. Se denominan riesgos agudos a aquellos relacionados con la posibilidad de contraer una enfermedad a corto plazo con dosis bajas de contaminantes que puedan resultar infecciosas, como lo es la contaminación microbiológica. Por su parte, los riesgos crónicos hacen referencia a la presencia de contaminantes químicos naturalmente, como compuestos orgánicos e inorgánicos, que puedan afectar la salud humana tras largos periodos de exposición. Es prioritario tratar los riesgos agudos, gracias al gran impacto que pueden generar sobre la población y su salud (Torres, Cruz, & Patiño, 2009).

Por ello, para evaluar la calidad del agua de los cuerpos se han creado índices de calidad del agua (ICA (índices de calidad del agua)). Estos representan un componente fundamental en el manejo integrado de los recursos hídricos. No obstante, los principales esfuerzos y costos involucrados en la gestión del agua están dedicados a su protección y gestión de su calidad (Lekshmiprasad & Mophin, 2017).

En adición, de acuerdo con la Guía de Prácticas Hidrológicas de la Organización Meteorológica Mundial, los parámetros que caracterizan la calidad de agua se pueden clasificar en propiedades físicas, componentes del agua, componentes químicos inorgánicos, componentes químicos orgánicos y componentes biológicos (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

En la categoría de propiedades físicas están los parámetros de temperatura, indicador de la velocidad de reacción; la conductividad eléctrica, que indica la concentración de iones de sales, ácidos y bases inorgánicas disueltas; el color, que determina la presencia de iones metálicos, humus, turba, plantas y desechos; la turbidez, un indicador óptico de los sedimentos suspendidos en el agua, como lodos, arcillas, materia orgánica, plancton y organismos microscópicos. Por último, la transparencia del agua, la cual es determinada por los parámetros de color y la turbidez (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

Otra categoría es la de componentes del agua, en ella se miden los parámetros de pH, dureza del agua, entre otros. El parámetro de pH indica la acidez o alcalinidad del agua. Esto se conoce midiendo la actividad de los iones positivos libres en el agua. Por su fórmula molecular H_2O al disociarse ocurre lo siguiente: $H_2O \leftrightarrow$ H^+ (Iones Protón) + OH^- (iones Hidroxilo). El agua pura tiene un pH neutro, lo que significa que hay un equilibrio entre las concentraciones de protones e hidroxilos (D'Urquiza, A. 2020). Debido a que el agua está en constante interacción con el entorno debido al ciclo hidrológico, el pH está en constante cambio. En aguas no contaminadas, el pH lo controla el equilibrio entre los iones de HCO_3^-(Bicarbonato). Los cambios de pH se pueden ocasionar por lluvias ácidas, desechos industriales, drenaje de minas o lixiviación de minerales (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

La dureza del agua mide la concentración de iones como Ca^{2+}, Mg^{2+}, Sr^{2+}, Fe^{2+}, así como de HCO_3^-, SO_4^{2-}, NO_3^- y Cl^-; que se encuentran presentes en el agua (Soto, 2010). La dureza no se ha ligado aún con efectos nocivos a los humanos, sin embargo, representan una amenaza debido a que una alta dureza del agua deja incrustaciones en las tuberías y reducen la efectividad en los

intercambiadores de calor, puesto a que también dejan incrustaciones. Como resultante, es más complicado remover suciedad y grasas de equipos industriales (D'Urquiza, A. 2020).

Los componentes químicos orgánicos son parte de otra categoría y se conforman por enlaces largos, generalmente de carbono. Algunos ejemplos son los hidrocarburos clorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, fenoles, PCB, plaguicidas y detergentes (Organización Meteorológica Mundial, 1994). La mayoría de los componentes que no contengan carbono se catalogan como inorgánicos.

Entre la categoría de componentes químicos inorgánicos se encuentran el oxígeno (i.e., O2) disuelto y los metales pesados. El oxígeno disuelto en el agua indica presencia de materia orgánica, siendo importante para evaluar y controlar el tratamiento de las aguas de desecho. Por otro lado, la medición de metales pesados es importante, ya que su extrema abundancia resulta peligrosa por su carácter no biodegradable y la toxicidad que ejercen, tanto en el uso del agua para riego agrícola, como para uso doméstico (Mancilla-Villa et al., 2012). Otros componentes inorgánicos son alcalinidad, Cl-, F-, P- (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

En la última categoría se encuentran los componentes biológicos, en la cual se presentan organismos microbiológicos como las bacterias, que pueden estar asociadas con coliformes fecales; así como los patógenos y macrobióticos (e.g., plancton, gusanos, peces y vegetación). En los análisis bacteriológicos es importante conocer de manera cuantitativa y cualitativa los organismos coliformes presentes, determinando el número más probable por unidad de volumen en el agua (i.e., NMP) (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

2.4.1 Calidad del agua superficial

Las fuentes de agua superficial son el eje de desarrollo de los seres humanos, permitiendo el abastecimiento para las diferentes actividades socioeconómicas llevadas a cabo en los asentamientos poblacionales. No obstante, de forma paradójica, muchas de estas actividades causan alteración y deterioro de estas. En general, las aguas superficiales están sometidas a

contaminación natural (e.g., arrastre de material particulado y disuelto, y presencia de materia orgánica natural) y de origen antrópico (e.g., descargas de aguas residuales domésticas, escorrentía agrícola, efluentes de procesos industriales, entre otros) (Narváez, 2021).

Las actividades socioeconómicas humanas, derivadas de la urbanización, producen contaminantes físicos, químicos y biológicos, transportados por aguas residuales, o bien, del Agua de Escorrentía Urbana (i.e., AEU). El agua residual arrastra compuestos orgánicos que demandan oxígeno, varias formas de nitrógeno y bacterias de origen fecal, entre otros contaminantes. Por otro lado, el AEU transporta menores concentraciones de estos contaminantes, pero se relaciona con mayores concentraciones de otros, asociados al uso de vehículos, como lo son los hidrocarburos y los metales pesados (Vázquez et al., 2020).

Los depósitos de sólidos y sustancias, a lo largo de las cuencas urbanas durante periodos secos, pueden conllevar importantes problemas medioambientales. Durante los episodios lluviosos, las primeras aguas de escorrentía superficial provocan el lavado de las superficies impermeables de las cuencas urbanas (i.e., fenómeno de primer lavado o first flush), de modo que los alivios de los sistemas unitarios de alcantarillado (i.e., DSUs) pueden provocar el flujo de significativas cantidades de contaminación al medio (Espín et al., 2016).

Los contaminantes asociados al first flush en las áreas urbanas se deben a las diferentes actividades humanas que, por el lavado atmosférico y las superficies impermeables (e.g., calles, avenidas, parques, cubiertas, etc.), son introducidos al agua por diferentes procesos físicos y químicos. Por consiguiente, los usos del suelo generan diversos contaminantes con magnitudes distintas; por ejemplo, los residenciales, industriales, comerciales y vías de transporte generan sedimentos, nutrientes, materia orgánica y aceites y grasas. Análisis fisicoquímicos y bacteriológicos de escorrentías, realizados por diferentes autores y en distintas áreas urbanas, han mostrado la existencia de sólidos suspendidos, coliformes fecales, materia orgánica, metales pesados y otros constituyentes como aceites, grasas e hidrocarburos (Peña & Lara, 2012).

En su gran mayoría, las aguas de lluvia tienen como disposición final cuerpos hídricos y, al empeorar sus condiciones naturales, se convierten en puntos de contaminación difusa en las fuentes receptoras. Dichos puntos de contaminación pueden clasificarse como difusos o puntuales, según su origen. Aquellos difusos corresponden a los contaminantes arrastrados por escorrentías desde su generación hasta los cuerpos receptores; a diferencia de los puntuales, que abarcan aquellas descargas directas en los cuerpos de agua (Mijangos et al., 2015).

La contribución de los puntos de contaminación puntuales y difusos es relevante a escala mundial. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA) estima que las fuentes no puntuales representan el 65% de las cargas totales de contaminación. Por su parte, la Administración de Protección Ambiental de Taiwán le atribuye poco más del 20% de las cargas contaminantes, a las fuentes hídricas superficiales (Peña & Lara, 2012). Claro que los contextos políticos y sociales en ambas naciones son muy diferentes entre sí. Sin embargo, grosso modo, se estima que en los países desarrollados son mucho más relevantes las fuentes de contaminación difusa que las puntuales, mas no significa que estos últimos puedan considerarse como insignificantes (Mijangos et al., 2015).

2.4.2 Calidad del agua subterránea

Como se mencionó previamente, el agua subterránea es indispensable para el desarrollo humano, representando casi la mitad del agua disponible para consumo (Piguave-Reyes et al., 2019).

El crecimiento urbano y la infraestructura pública han ocasionado transformaciones en las fuentes de agua subterráneas, pues las han reducido a ríos de aguas negras o, en el peor de los casos, desaparecido por la infraestructura. Todas las actividades que interfieren en los procesos hídricos, como la eliminación de la cobertura vegetal, provocan la compactación del suelo e impermeabilizan los espacios. Por ello se modifican los patrones de escorrentía, limitando la capacidad de recarga de los acuíferos y poniendo en riesgo el abastecimiento hídrico a largo plazo. La progresiva urbanización afecta la disponibilidad del agua, así como su calidad, lo cual

tiene importantes implicaciones sociales, ambientales, económicas y políticas (Dávila & de León, 2011).

Una de las principales fuentes de contaminación a la que están expuestos los acuíferos son las descargas de aguas residuales. Se les denomina así a las aguas de composición variada, provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (ECOL, 1997). Además, los acuíferos también pueden verse afectados por la infiltración de agua residual utilizada para el riego agrícola, que puede traer altas concentraciones de pesticidas (e.g., fertilizantes químicos, nitratos, fosfatos, insecticidas, fungicidas, entre otros). Otra fuente preocupante es la infiltración de los lixiviados procedentes de los sitios de disposición final o de los vertederos de residuos sólidos, situados sin tener en cuenta ningún criterio hidrogeológico (UNAM, 2018).

Los estratos del subsuelo atenúan muchos contaminantes activamente, y han sido considerados potencialmente efectivos para la disposición segura de aguas residuales domésticas. La degradación de estos contaminantes en la zona vadosa (i.e., no saturada) es producto de la degradación bioquímica, reacciones químicas y procesos de adsorción. Existen en el subsuelo ciertos microorganismos que residen en el subsuelo, que favorecen la degradación bioquímica. Las reacciones químicas las generan los materiales geológicos existentes.

Por último, los fenómenos de adsorción son producidos en la roca, principalmente tras un largo trayecto a través de ella. Sin embargo, la eficacia para eliminar contaminantes depende directamente de los perfiles del subsuelo y la estratigrafía. Así, la vulnerabilidad de los acuíferos ante la contaminación también varía según el tipo de contaminante y de su composición. Por ejemplo, un acuífero somero fracturado es significativamente más susceptible a ser contaminado a uno confinado poroso (del Puerto & Valdés, 2021).

El movimiento del agua y transporte de contaminantes desde la superficie del suelo a los acuíferos suele ser un proceso muy lento. Puede tomar desde algunos años hasta décadas, antes de que se observe afectación por contaminantes persistentes en el suministro de agua (Lagos,

2002). Este factor puede interpretarse de dos maneras: por un lado, resulta beneficioso para el medio ambiente, pues le da tiempo suficiente a los contaminantes a degradarse; pero también incrementa la probabilidad de penetración de contaminantes más persistentes.

2.5 Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) o Sistemas de Diseño Urbano Sensibles al Agua (WSUDS)

Los SuDS son sistemas que buscan aportar a la restauración del ciclo natural del agua maximizando las oportunidades y beneficios que se pueden obtener de la gestión de aguas superficiales (Woods Ballard et al., 2015). Distintos países han optado por implementar planes de desarrollo sostenible, en los que se involucran sistemas de drenaje que utilizan técnicas de depuración natural de contaminantes y ayudan a restaurar el ciclo hidrológico. Tal es el caso de Australia con los Diseños Urbanos Sensibles al Agua (WSUD), Suecia con la Gestión Urbana Integral del Agua (IUWM) (Global Water Partnertship, 2013), o de Reino Unido con los Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) (Fletcher et al., 2014).

El término SuDS surge en Reino Unido. Sin embargo, el uso de técnicas de SuDS está cada vez más extendido por el mundo. Se han realizado multitud de proyectos y experiencias que han generado distintos manuales de diseño, guías y normativas para facilitar su divulgación. En países como Reino Unido o Estados Unidos se han desarrollado normativas que fijan periodos de retorno y duración de lluvias que permiten un diseño integral desde el punto de vista de calidad y cantidad de lluvia (Momparlet, 2008).

Actualmente se ha reconocido a nivel mundial que se necesita un cambio para la gestión del agua de lluvia en entornos urbanos (Momparlet, 2008). Este tipo de técnicas no han sido no han sido implementadas en México. Sin embargo, existen varios estudios de alternativas de SuDS en distintas partes del país, por ejemplo, en la ciudad de Córdoba, Veracruz (Gorostegui, 2021). Hablando sobre los sistemas de drenaje, éstos pueden contribuir al desarrollo sostenible, mejorar los espacios en los que vivimos, trabajamos y jugamos, equilibrando las diferentes oportunidades y desafíos que influyen en el diseño urbano y el desarrollo de las comunidades (Susdrain, s.f.).

El drenaje urbano consiste en la gestión del agua de lluvia precipitada. Actualmente, en países poco desarrollados, el drenaje urbano consiste solo en el movimiento del agua de lluvia precipitada de un lugar hacia otro. Lo cual acaba provocando problemas como contaminación difusa, inundaciones y pérdida de servicio de sistemas de saneamiento. En cambio, el drenaje sostenible pretende disminuir estos problemas para mejorar la gestión del agua de lluvia y evitar pérdidas de recursos. Para lograr este sistema se requiere de una adecuada metodología para asegurar el objetivo del proyecto y se tomen en cuenta las condiciones particulares de dicho país (Gorostegui, 2021).

Los SuDS son una mejor opción que los métodos tradicionales de drenaje (Susdrain, s.f.), puesto que tienen los siguientes beneficios y características.

- Gestionan los volúmenes de escorrentía y los caudales de las superficies duras, reduciendo el impacto de la urbanización en las inundaciones.
- Protegen o mejoran la calidad del agua (reduciendo la contaminación por escorrentía).
- Se adecúan a las necesidades de la comunidad local.
- Proporcionan oportunidades para la evapotranspiración de la vegetación y las aguas superficiales.
- Fomentan la recarga natural de las aguas subterráneas y de los acuíferos.

Los Sistemas de Drenaje Sostenible proporcionan un drenaje de alta calidad al tiempo que ayudan a hacer frente a las lluvias intensas, mejoran la calidad del aire urbano, regulan las temperaturas de los edificios, reducen el ruido y ofrecen oportunidades de recreación. También contribuyen a contrarrestar algunos de los efectos del aumento de la urbanización en el ciclo del agua, como la reducción de la infiltración, que a su vez puede dar lugar a una disminución de las reservas de agua subterránea (Woods Ballard et al., 2015). De acuerdo con lo anterior, los SuDS son elementos de la red de drenaje que permitirán recoger, transportar, descontaminar, retener, filtrar y evacuar el agua de lluvia de una manera sostenible.

Un buen diseño de SUDS maximiza el uso del espacio disponible, por lo que pueden utilizarse incluso en los espacios más pequeños. Con respecto a la calidad del aire urbano, los SuDS muchas veces se relacionan con infiltración en uso de suelo de vegetación o techos verdes. Por lo tanto, dicha vegetación puede absorber contaminantes mediante sus estomas y reducir la contaminación atmosférica. Por otro lado, esta vegetación también combate con la radiación solar en zonas urbanas lo que permite regular la temperatura dentro de la ciudad.

Es posible clasificar los beneficios de los Sistemas de Drenaje Sostenible en cuatro categorías principales: Cantidad de Agua, Calidad del Agua, Comodidad y Biodiversidad. Se trata de los cuatro pilares del diseño de los SuDS (Woods Ballard et al., 2015). De acuerdo con la Figura 13, el primer pilar de los SuDS (i.e., Cantidad de Agua) se refiere tanto a la gestión del riesgo de inundaciones como a la protección del ciclo hidrológico natural. Por otro lado, la categoría de Calidad del Agua se enfoca al monitoreo de las características del recurso hídrico, con la intención de evitar contaminación de este. Por su parte, con el pilar de Comodidad se busca crear mejores lugares para la sociedad, tanto para su recreación como para la vida cotidiana en general. Finalmente, la categoría de Biodiversidad se centra en favorecer el desarrollo de la naturaleza.

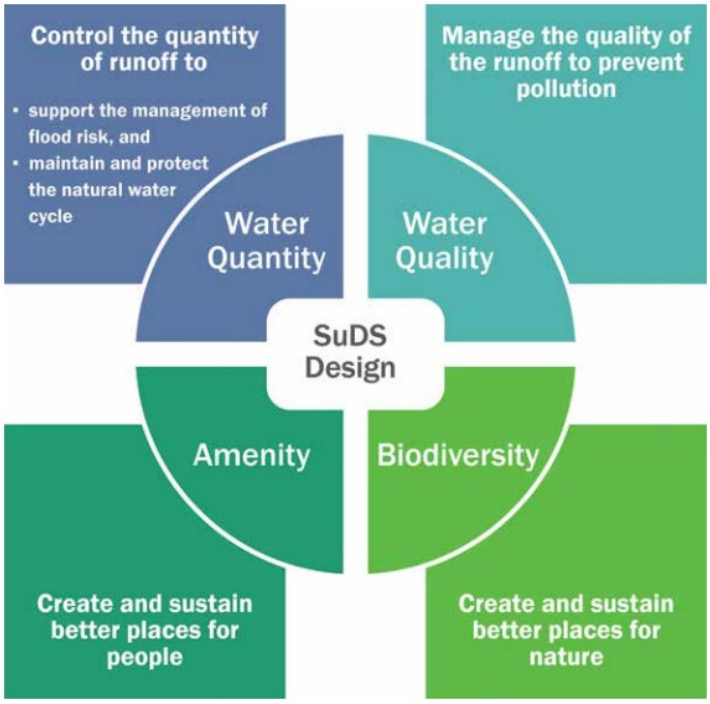


Figura 13. Cuatro pilares de los SuDS (Woods Ballard et al*., 2015).*

Los SuDS pueden adoptar muchas formas, tanto por encima como por debajo del suelo. Este tipo de sistemas pueden incluir tanto actividades de jardinería, como productos patentados o fabricados. Los sistemas de gestión de aguas pluviales diseñados para gestionar y utilizar el agua de lluvia cerca de donde cae, en la superficie e incorporando vegetación, tienden a proporcionar los mayores beneficios. La mayoría de los sistemas de gestión del agua pluvial utilizan una combinación de componentes de producto patentados o ya fabricados para alcanzar los objetivos generales de diseño del sitio (Woods Ballard et al., 2015).

Los drenajes sostenibles son una excelente alternativa para aprovechar el agua pluvial y cuidar de la infraestructura urbana. Sin embargo, no siempre pueden ser aplicados y presentan algunas de sus desventajas, como son (Gorostegui, 2021):

- Requieren tiempo, planificación y recursos adicionales que se necesitan mediante un acuerdo entre los inversionistas y las alternativas a evaluar.
- Algunas técnicas son muy costosas.

- Necesitan un grado de tecnicidad para aplicar los métodos de la manera correcta.
- No siempre son aptos en zonas con muchos sedimentos superficiales.
- Requieren de una ubicación específica, diseño y mantenimiento.
- Se necesitan previamente estudios geológicos de la zona.

Dentro del enfoque de los SuDS existen varias alternativas a los sistemas de drenaje convencionales. El proceso de selección del o de los SuDS depende de varios factores como los usos urbanos, la cantidad y la calidad del agua de escorrentía, el entorno arquitectónico, usos de suelo, entre otros. Entre los principales tipos se encuentran las áreas de biorretención, desconexión de la escorrentía, superficies permeables, pozos y zanjas de infiltración, techos verdes y humedales. Los sistemas de infiltración son especialmente útiles ya que contribuyen a disminuir las escorrentías superficiales (y por lo tanto las inundaciones) al mismo tiempo que favorece la recarga natural y artificial del agua subterránea (Paus & Braskerud, 2014)

Las áreas de biorretención consisten en depresiones poco profundas con vegetación, las cuales son una buena opción para el manejo local de agua pluvial. La Figura 14 muestra el diseño general de esta alternativa, el cual incluye una capa de drenaje. Para su diseño, es importante considerar criterios como la ubicación, tamaño, tipo de suelo, tipo de vegetación y mantenimiento. En este tipo de SuDS la escorrentía se retiene en la superficie antes de ser filtrada al subsuelo o transportada por lo que reduce el riesgo de inundaciones y al mismo tiempo que el sistema de biorretención elimina los contaminantes a través de procesos físicos, químicos y biológicos (Paus & Braskerud, 2014). Esta estructura tiene asociada cobertura vegetal y puede implementarse en una gran variedad de espacios como separadores de zonas viales y andenes. Su implementación puede generar beneficios a nivel de paisajismo y amenidad.

A pesar de que estos sistemas son populares en distintos países del mundo como Estados Unidos, Canadá y Australia, existen consideraciones o ciertas desventajas al implementarlos; una de ellas es la superficie amplia que requiere en comparación con los sistemas convencionales. Si el suelo no se drena adecuadamente, hay que añadir una tubería de drenaje. No es un sistema adecuado

para zonas con pendientes muy pronunciadas. En la Figura 15 se presenta un ejemplo de este tipo de SuDS.

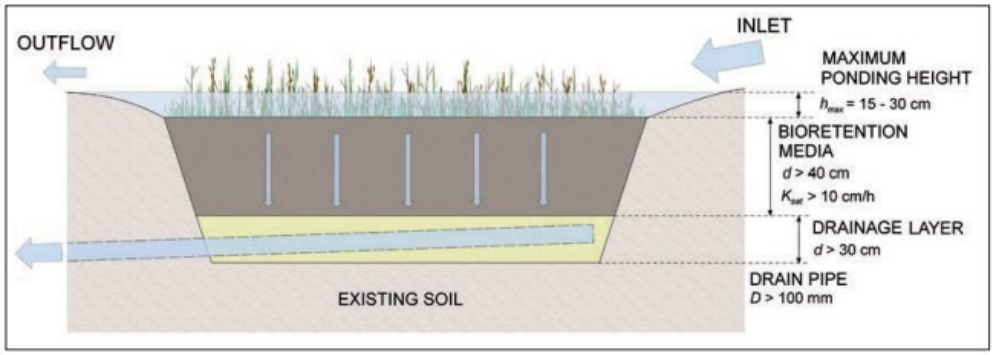


Figura 14. Diseño base de un área de biorremediación (Paus & Braskerud, 2014).

Figura 15. Ejemplo de un área de biorremediación (Abellán, 2016).

Otro tipo de SuDS son las zanjas de infiltración, las cuales consisten en excavaciones que fungen como zonas de almacenamiento temporal subterráneas rellenas de grava (Figura 16). Estos sistemas funcionan para pequeñas áreas de drenaje y permiten que las escorrentías de agua pluvial se infiltren en el suelo. Pueden ser utilizadas debajo de cunetas verdes, pavimentos porosos o banquetas. Gracias a su fácil construcción pueden colocarse en áreas residenciales,

comerciales, estacionamientos o carreteras. No son sistemas tan comunes en comparación con los SuDS superficiales; sin embargo, son una buena alternativa cuando la minimización de costos es una prioridad (Chahar, Graillot, & Gaur, 2012).

Es importante considerar que, si el tiempo entre dos tormentas sucesivas es menor al tiempo de vaciado de la zanja, es necesario desviar el exceso de agua al alcantarillado o algún otro tipo de almacenamiento. Este sistema incluye un filtro físico para remover sólidos (Susdrain, 2021). Es necesario su mantenimiento para asegurar que no haya obstrucciones en el proceso de infiltración y su uso no se recomienda en zonas con suelos muy finos.

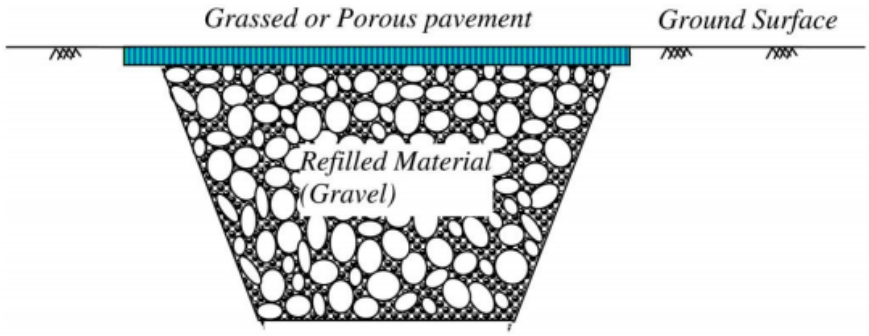


Figura 16. Diseño base zanja de infiltración (Susdrain, 2021).

Por su parte los techos verdes consisten en aprovechar la superficie de estos añadiendo vegetación. Como se muestra en la Figura 17, su diseño consiste en múltiples capas entre las cuales se incluye una membrana impermeable, una capa de aislamiento, drenaje, un sustrato y la capa final de vegetación. No se puede utilizar cualquier planta porque pueden sufrir exceso de humedad, sequías, temperaturas extremas, velocidad del viento elevada. Las plantas de crecimiento bajo o compacto son una buena opción para este sistema.

Este tipo de SuDS puede utilizarse en cualquier sector (e.g., residencial, industrial). A pesar de ser inicialmente costosos, los beneficios que brinda lo compensan durante su vida útil. Uno de estos beneficios es la disminución de la energía requerida para mantener un clima agradable en el

interior ya que la vegetación añadida intercepta y disipa la radiación solar al mismo tiempo que contribuye a mejorar la calidad del aire. Asimismo, estos sistemas minimizan la escorrentía de agua pluvial de los edificios ya que recolectan y retienen la precipitación (Oberndorfer et al., 2007).

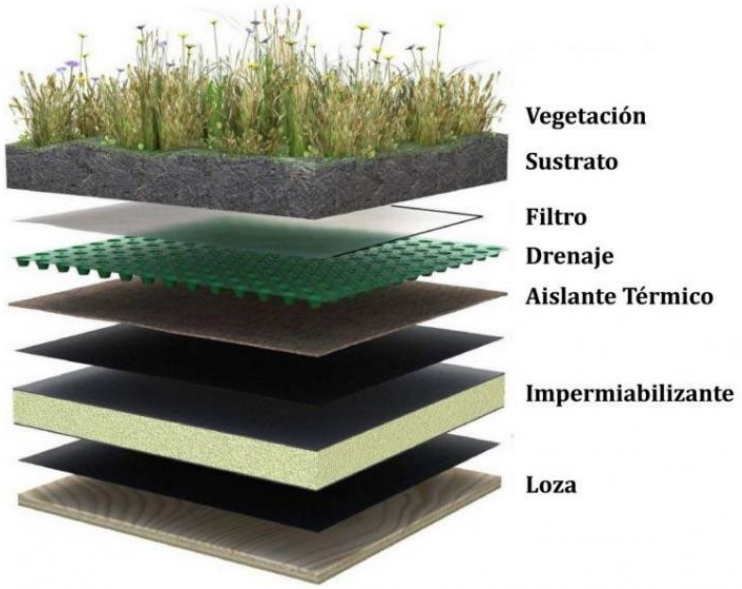


Figura 17. Diseño base techo verde (Arquitectura y empresa, 2021).

El tipo de vegetación influye en la eficiencia del techo para retención de agua. Se debe considerar que las plantas soportan distintas temperaturas, humedad y viento. Es importante escoger especies adecuadas para un espacio determinado. La vegetación debe cumplir con características fundamentales como: habilidad para sobrevivir en sequía y/o una baja cantidad de nutrientes, tener buena cobertura de suelo, poco mantenimiento, reproducirse rápidamente, tener raíces cortas y poder fitorremediar. Dicha vegetación debe ser capaz de evitar erosión del suelo. Este tipo de plantas se encuentran en el género Sedum, además es importante considerar las plantas endémicas del sitio para no alterar el ecosistema (Vijayaraghavan, 2016). A continuación, se muestran algunos tipos de plantas aptas para techos verdes (Molano, 2016).

Tabla 2. Tipos de plantas más comunes para techos verdes (Molano, 2016).

Region	Genus (species)	Family	Life form	Source(s)
North America, Central America, South America	*Portulaca (P. halimoides, P. grandiflora)*	Portulacaceae	Succulent	Dvorak and Volder 2010
	Sedum (S. praealtum)	Crassulaceae	Succulent	Dvorak and Volder 2010
	Sempervivum (S. tectorum)	Crassulaceae	Succulent	Dvorak and Volder 2010
	Bouteloua	Poaceae	Graminoid	Simmons et al. 2008
	Hilaria	Poaceae	Graminoid	Simmons et al. 2008
	Dalea	Fabaceae	Forb	Simmons et al. 2008

Por otro lado, la Figura 18 representa un sistema de pavimento permeable que, en conjunto con la gestión integral de las aguas superficiales, permiten que el agua de la lluvia se infiltre en el subsuelo. Además de generar una recarga artificial para el acuífero, se utiliza este método para controlar las inundaciones generadas por eventos de precipitación intensa. El concepto general de los SuDS resalta en los métodos de recarga artificial, ya que se atienden distintas problemáticas que enfrentan las cuencas urbanas con una solución integral que contribuye al mejoramiento ambiental.

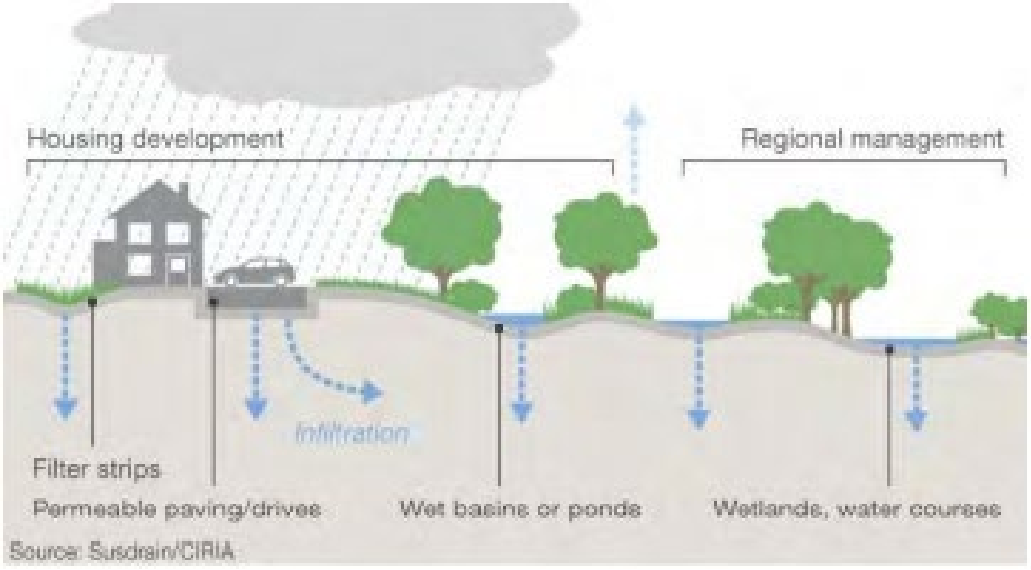


Figura 18. Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) (Susdrain/CIRIA, 2014)

Los sistemas de pavimento permeable (PPS por sus siglas en inglés) resultan ideales para una amplia variedad de zonas residenciales, comerciales e industriales, algunas de sus aplicaciones más comunes resultan en accesos vehiculares, estabilización de pendientes y control de la

erosión, caminos en campos de golf, estacionamientos, accesos pedestres, caminos y senderos, así como en campo de irrigación. En comparación a un sistema de drenaje tradicional, los PPS resultan más económico y rentables en cuanto a los beneficios que aporta puesto que permiten reducir las escorrentías superficiales, la recarga de agua al subsuelo ahorro del agua al permitir completar el ciclo del agua y reducción de la contaminación de esta (Scholz & Grabowiecki, 2006).

En cuanto al mejoramiento de la calidad del agua gracias a los PPS destacan las siguientes variables: sedimentos y sólidos suspendidos, materia orgánica con altos niveles de DBO, nutrientes y contaminantes disueltos (incluyendo nitrógeno, fósforo, metales pesados, solventes, herbicidas y pesticidas), grasas y aceites, así como patógenos fecales. Un estudio citado en (Scholz & Grabowiecki, 2006), demostró que los PPS ayudan significativamente a reducir los niveles de contaminación de aceites e hidrocarburos en comparación a un pavimento impermeable en donde estos contaminantes son más persistentes. Lo anterior debido a que un PPS puede llegar a funcionar como un biorreactor en el lugar y las comunidades microbianas que se desarrollan de manera natural pueden llegar a funcionar como organismos degradadores de estas sustancias.

Otro estudio mencionado en (Scholz & Grabowiecki, 2006) demuestra la eficiencia de los PPS para reducir los niveles de sólidos suspendidos y plomo en un 64% y 79% respectivamente en comparación a un pavimento impermeable. Tipos de plantas más comunes para techos verdes. A esas comunidades se les influencia por el nivel de los nutrientes presentes en el agua, como el fósforo y el nitrógeno.

Otra alternativa de los SUDS son los barriles de lluvia los cuales consisten en recolectar el agua de escorrentía de los techos de las casas en barrilles de alta capacidad para después vaciarlos una vez que termine la tormenta y permitir que el agua se infiltre al subsuelo mediante jardines de infiltración. Algunas desventajas de este método son que requiere mucha participación de los habitantes/encargados de la casa/edificio puesto que se debe vaciar cada vez que se llena para seguir funcionando. Otra limitación de este sistema está relacionada con la capacidad del suelo

en donde se realizan las descargas para infiltrar el agua. Además, estos barriles deben conectarse a un sistema de drenaje para que, si se llenan durante una precipitación prolongada, estos desembocan los excesos al drenaje y evitar afectaciones al inmueble. Sifonamiento de los barriles de lluvia (Jennings et al., 2013).

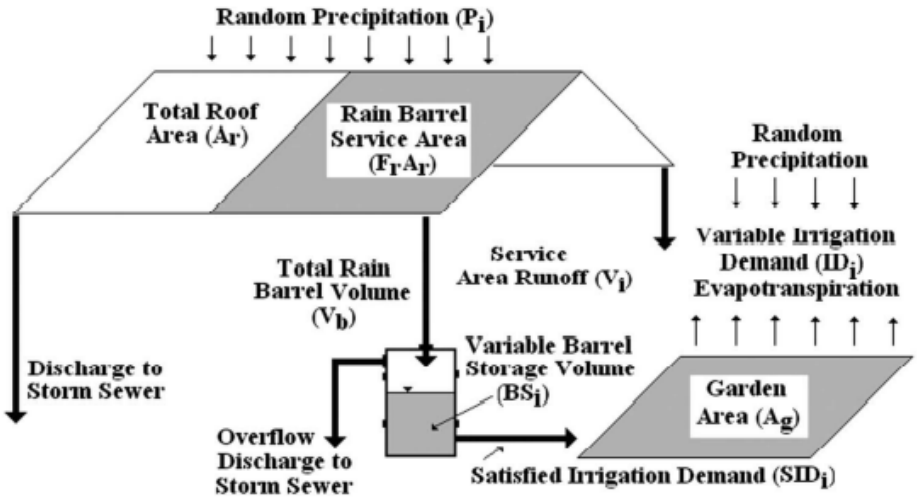


Fig. 1. Rain barrel for urban garden irrigation stormwater runoff management strategy

Figura 19. Barril de lluvia para riego de huertos urbanos, estrategia de gestión de escorrentía de aguas pluviales (Jennings et al*., 2013).*

La alternativa de desconexión de la escorrentía del techo consiste en desviar el flujo del agua de lluvia del drenaje y dirigirlo hacia áreas vegetadas en donde pueda ser infiltrada al subsuelo. Esto permite reducir el volumen de agua y los contaminantes de los cuerpos de agua. Este sistema puede ser aplicado en cualquier ámbito; comercial, industrial o residencial. Para esto, es indispensable considerar aspectos como la distancia que el agua debe recorrer y un área permeable destinada para recibir el agua, la topografía con pendientes ligeras y el tipo de suelo (las arenas permiten una mejor infiltración) (Maryland Department of the Environment, 2009).

La desconexión de la escorrentía puede ser complementada con otros SuDS, como lo son los jardines de lluvia. Son depresiones poco profundas en las que se plantan árboles y arbustos propios de la zona y se añade cobertura vegetal al suelo. En realidad, no existe un consenso sobre

las dimensiones o diseño propio de los jardines de lluvia o sobre el suelo, lo más importante es maximizar la infiltración y tratamiento del agua y evitar los encharcamientos por la posibilidad de la reproducción de mosquitos. El tiempo de residencia del agua en los jardines debe ser de máximo 3 a 4 horas de acuerdo con el manual para el diseño de jardines de lluvia de Prince George's County, 2002 (Clausen, 2005)

Un experimento realizado en Haddam, CT en el 2002 (Dietz & Clausen, 2005) consistió en la construcción de dos jardines de lluvia (Figura 20). Los resultados permitieron demostrar la eficiencia de estos jardines antes las lluvias y disminuir la escorrentía superficial; solo el 0,8 % terminó en escorrentía superficial, mientras que el resto se infiltraron. En cuanto a metales contaminantes como lo fueron cobre, plomo y zinc, no fue posible muestrearlos de manera adecuada puesto que en el 64% de los muestreos resultaron por debajo del límite de detección. Para el caso de coliformes fecales se encontró tanto a la entrada como a la salida que los niveles de coliformes fueron <10 UFC / 100 ml (menor a 10 unidades formadoras de colonias cada 100 ml) en los 6 eventos de muestreo. Aunque el potencial REDOX en el suelo era el adecuado para la desnitrificación, el tiempo de retención pudo ser poco y por eso no ocurrió, el nitrógeno fue el único nutriente que disminuyo sus niveles en la salida del agua a diferencia de como entró, aunque la masa de retención de nitrógeno total no se esperaba. Para el caso del fósforo se encontraron reducciones significativas en sus niveles y el estudio lo atribuye a alteraciones en el suelo al momento de construir el jardín de lluvia.

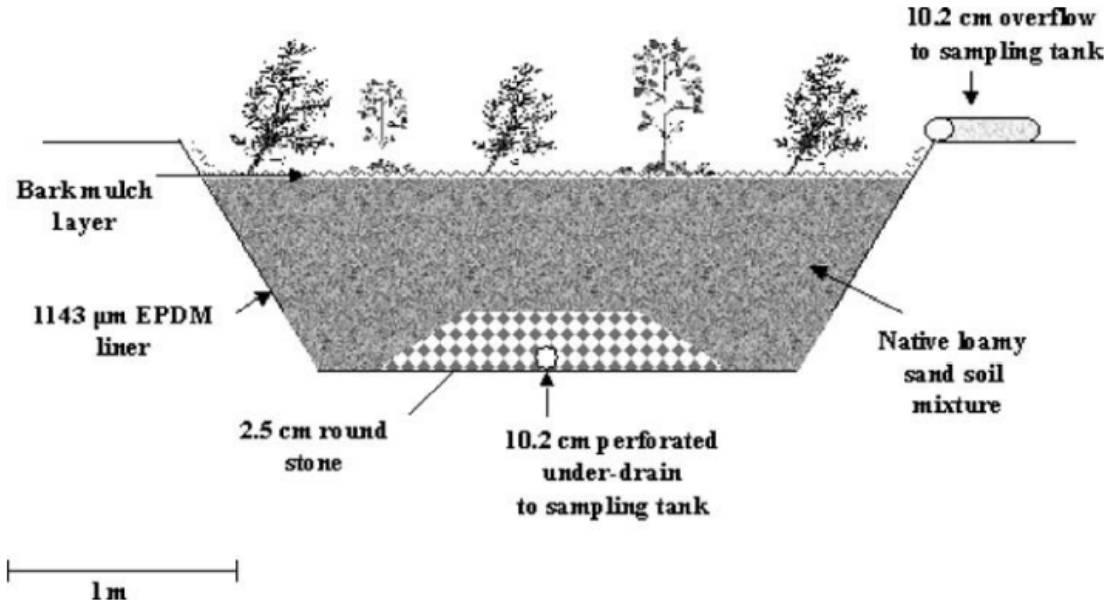


Figura 20. Sección transversal de jardín de lluvia.

El estudio concluye que los jardines construidos resultaron ser buenos para infiltrar el agua de lluvia y evitar inundaciones, pero los resultados no fueron buenos en cuanto al mejoramiento de la calidad del agua, por lo que se recomienda que estos jardines estén conectados a un drenaje subterráneo para un tratamiento secundario del agua.

La siguiente tabla presenta de manera resumida las características de cada uno de los tipos de SuDS descritos en cuanto a los distintos beneficios que brinda su aplicación (Susdrain, s.f.).

Tabla 3. Síntesis de los beneficios de los distintos tipos de SuDS (Susdrain, s.f.).

SuDS	Reducción caudal pico	Reducción volumen	Tratamiento calidad de agua	Beneficio social	Beneficio ecológico
Área de biorretención	Medio	Medio	Bueno	Bueno	Medio
Techo verde	Medio	Medio	Bueno	Bueno	Bueno

Zanja de infiltración	Medio	Bueno	Bueno	Bajo	Bajo
Pavimentos permeables.	Alto	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Barriles de lluvia.	Medio	Medio	Bajo	Bueno	Bajo
Jardines de lluvia.	Alto	Excelente	Medio	Bueno	Bueno

Una característica distintiva de los SuDS es que proveen espacio para almacenar agua en contornos naturales. Los pozos de inyección profunda almacenan los volúmenes excedentes de escurrimientos superficiales y los infiltran al subsuelo para que el agua quede almacenada entre los estratos. La implementación de uno de estos sistemas resuelve la problemática en cuestión, estableciendo un plan para asegurar el manejo integral del agua, que ayuda a proteger a la población en los eventos de precipitación extremos y al mismo tiempo aprovechar la gran cantidad de lluvia que cae en la zona como recarga del acuífero, una de las fuentes principales de abastecimiento de agua de la población del AMG.

Varias de las alternativas de SuDS asociadas con la infiltración ya han sido aplicadas alrededor del mundo con éxito. La Figura 21 representa el mapa de experiencias de Gestión de la Recarga Artificial de Acuíferos publicado por el Centro International de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC, por sus siglas en inglés); en donde es posible observar que la mayoría de estos proyectos se centra en países más desarrollados. Este mapa indica distintos colores de acuerdo con el principal tipo de recarga artificial utilizado.

Figura 21. Experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo (IGRAC, 2021).

Como se puede apreciar en el mapa ya existen distintas aplicaciones de SuDS en el mundo. Refiriéndose a la infiltración por extensión habla de la aplicación de zanjas de infiltración. La filtración inducida se entiende por todos esos sistemas que filtran el agua como son los pavimentos permeables, los techos verdes, áreas de biorretención, humedales artificiales, entre otros. Con respecto a la recarga de pozos, son sistemas de drenaje que sirven para recargar las aguas subterráneas, los pozos son ventajosos cuando hay un terreno escaso. La calidad del agua no siempre es la mejor; se usan para recargar acuíferos mediante técnicas superficiales. Lo cual se relaciona con la modificación de cauces que consiste en estructuras que interceptan o detienen flujos de corrientes de agua superficial incrementando la recarga natural de los acuíferos (Ojeda, 2016). Por último, otra aplicación es la de recolección de agua y lluvia como la técnica previamente mencionada de los barriles de lluvia.

En síntesis, es importante reconocer que la clave para una adecuada implementación de los SuDS se basa en tres aspectos. El primero consiste en considerar desde el principio cómo manejar la escorrentía superficial y a partir de ahí comenzar el diseño. Asimismo, se debe visualizar la planificación urbana, arquitectura, drenaje y aspectos ambientales como un conjunto y no como elementos independientes. Finalmente, es fundamental incluir a todos los interesados en el

proyecto; ya sea autoridades locales, expertos ambientales, responsables del mantenimiento de lo SuDS, entre otros (Woods Ballard et al., 2015).

2.6 Métodos de Recarga Artificial de Acuíferos

La recarga artificial comprende una serie de técnicas que tienen como objetivo un mejor aprovechamiento de los acuíferos mediante el aumento y creación de reservas, interviniendo directamente en el ciclo natural del agua -citado en (Fernandez et. al., 2005). La recarga artificial de acuíferos se ha configurado en los últimos años como una herramienta de gestión hídrica económica y de gran efectividad con respecto a las grandes obras hidráulicas, resultando una actividad de primer orden en varios países del mundo, como pueden ser Holanda, USA, Australia, entre otros (Fernandez et. al., 2005).

Expertos en hidrología y geotecnia están de acuerdo con las ventajas que suponen los métodos de recarga artificial. Pero muchos organismos reguladores del agua no ven las técnicas como viables, ya que antes se consideraban emergentes y riesgosas; es el primer obstáculo para usar estos métodos. A pesar de esto, la evidencia empírica muestra lo contrario: la cantidad de experiencias en diferentes zonas del planeta demuestran que la aplicación de esquemas de recarga artificial dentro de la gestión hídrica ha ampliado el suministro de agua, la seguridad hídrica y el mejoramiento de la calidad del agua (Vanegas, 2017).

La tecnología muestra que esta técnica ya es aplicada y comprobada, según datos tomados por el Centro Internacional de Evaluación del Agua Subterránea en el que se muestran todas las experiencias de recarga artificial del mundo, estas se categorizan en 5 diferentes grupos de tecnologías:

- Infiltración por extensión
- Filtración inducida
- Recarga de pozos
- Modificación de cauces

- Recolección de agua de lluvia/escorrentía.

La gran mayoría de estos casos se encuentran distribuidos en Europa y Asia, con apenas 16 interacciones en México.

El almacenamiento subterráneo, sobre todo en zonas urbanas donde hay pocas alternativas, permite conservar el exceso de agua estacional hasta que la demanda de agua sea mayor. Los sistemas bien diseñados y operados pueden mejorar la calidad de las aguas subterráneas, esto supone que el agua recargada en un acuífero pueda ser utilizada para diferentes objetivos:

- Almacenar agua en los acuíferos para su uso futuro, especialmente en zonas de escasa disponibilidad de terreno en superficie o sin posibilidad de otras formas de almacenamiento.
- Suavizar las fluctuaciones en la oferta/ demanda del agua.
- Desarrollar estrategias de manejo integral del agua en una cuenca.
- Estabilizar o aumentar los niveles del agua subterránea en acuíferos sobreexplotados.
- Almacenar agua en el subsuelo cuando no hay espacio superficial disponible para la construcción de presas.
- Reducir las pérdidas por evaporación y escurrimiento.
- Reducir el escurrimiento superficial y la erosión del suelo.
- Mejorar la calidad del agua y suavizar sus fluctuaciones
- Mantener caudales ecológicos en ríos y arroyos
- Manejar la intrusión salina y la subsidencia del terreno
  Disponer/reusar el agua de desecho o de las tormentas.

Para lograr esto existen dos tipos de recargas artificial: los sistemas de recarga por superficie o en profundidad, que se explican con mayor detalle a continuación.

2.6.1 Recarga superficial

Los sistemas de recarga en superficie buscan extender la superficie de contacto agua terreno y así incrementar la infiltración. Principalmente se implementan en acuíferos libres que no presentan niveles de baja permeabilidad en las cercanías de la superficie del terreno, permitiendo así que el agua se infiltre y llegue al acuífero. Dentro de esta categoría se dividen en varios métodos, los más comunes son (Custodio, 1996):

a) Zanjas o canales: este es el método más primitivo y consiste en hacer circular el agua por surcos, estos pueden seguir las curvas de nivel del terreno e irse ramificando o que la serie de surcos se encuentren lateralmente en la zanja
   principal. La infiltración ocurre en el fondo y en los lados, con importancia variable según su anchura. Su inconveniente es que necesita una gran área (Custodio, 1996).
b) Balsas: consiste en excavar balsas en el terreno que almacena el agua para
   dejarla infiltrar, esta se produce principalmente en el fondo. La disposición de unas varias balsas en línea sirve para disminuir las interferencias hidráulicas que se producirían si estuviesen juntas, simultáneamente, facilita la extracción de agua por líneas de pozo, asegurando un tiempo mínimo de retención.
c) Fosas: este método se considera cuando el acuífero tiene mucho espesor de
   materiales sueltos y permeables, al igual que su nivel freático es muy profundo. Algunas fosas que se pueden utilizar son de las excavaciones para extraer gravas, por decir un ejemplo. En este caso es importante considerar la relación entre la superficie lateral con la del fondo, su infiltración predomina por los flancos. Si se decide utilizarlas, se deben retirar escombros, basura, u otros residuos que puedan existir e impedir su funcionamiento.

Un método matemático para la estimación de la infiltración es el de Bourguet, quien encontró en un estudio, de forma empírica, una relación entre la velocidad aparente de infiltración y la permeabilidad de un suelo, como se muestra a continuación (Bourguet, 1971)*:*

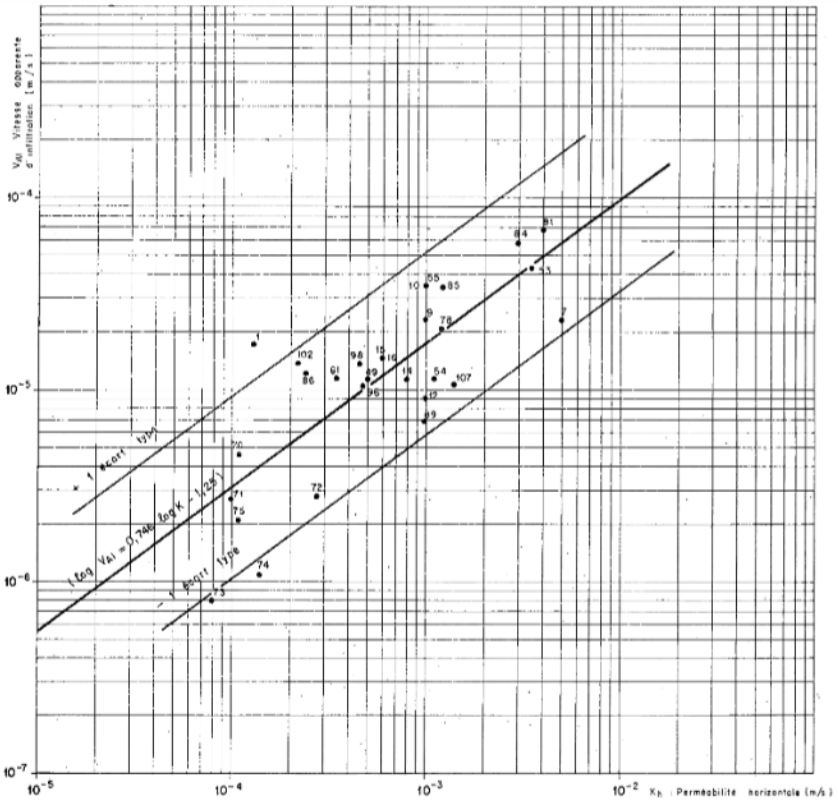


Figura 22. Método de infiltración de Bourguet, 1971

$$Log\ VAI_{(10^{-5}m/s)} = 0.746\ Log\ K_{(10^{-5}m/s)} - 1.25 \qquad \pm 0.47$$

Donde:

K = Permeabilidad horizontal [10-5 m/s]

VAI = Velocidad aparente de infiltración [10-5 m/s]

Esta ecuación se obtuvo a partir de una regresión logarítmica, la cual obtuvo un coeficiente de correlación de $\rho = 0.789$, lo que permite obtener una primera aproximación confiable a la infiltración cuando se conoce la permeabilidad horizontal de los suelos, o viceversa.

2.6.2 Recarga profunda

El segundo tipo de recarga artificial es la recarga en profundidad. Se basa en pozos verticales que introducen el agua al acuífero por medio de la fuerza hidrostática que genera la columna de agua

para lograr atravesar muchos estratos, con la ventaja de recargar todas las capas que se atraviesan. Este método presenta dos inconvenientes: el primero es que su coste de construcción y mantenimiento es alto, y el segundo es que se necesita de agua con una mejor calidad para reducir los problemas de colmatación, ya que la superficie filtrante es mucho menor, sin embargo, es la mejor alternativa de recarga para terrenos formados por niveles permeables e impermeables alternados, así mismo, son muy útiles en zonas donde el terreno disponible para las instalaciones superficiales es escaso o muy caro; como ocurre en zonas urbanas (Custodio, 1996).

Con este método se suelen recargar los estratos con menor extracción de agua subterránea pues, de este modo, se logra un mayor recorrido del agua en el acuífero. Por consiguiente, esto ayuda a que el agua pueda pasar con facilidad de un nivel a otro, evitando problemas de contaminación y logrando una mezcla más homogénea entre el agua inyectada y la que se encuentra en el acuífero (Custodio, 1996).

Dentro de esta categoría se incluyen los sondeos de inyección, el aprovechamiento de simas y dolinas, la implementación de drenes y galerías.

Los métodos de recarga sitúan el agua de tal forma que pueda percolar hacia la formación geológica, lo que supone varios beneficios dentro de los que se encuentran:

- El incremento en la disponibilidad de agua.
- Estabilización/aumento de los niveles piezométricos.
- Aumento del flujo de base (gasto ecológico) en ríos.
- Control de la intrusión salina.
- Reducción de la subsidencia del terreno.
- Fuente sostenible de agua subterránea.
- Sostenibilidad de áreas irrigadas.
- Estabilización de la erosión del suelo.

- Análisis positivo de la relación costo-beneficio.
- Mejoramiento del nivel de vida.
- Mitigación de inundaciones.
- Control de la contaminación.
- Ahorro de espacio superficial para el almacenamiento del agua.

Sin embargo, no todo son ventajas en los proyectos de recarga, también es importante tener en cuenta las desventajas como:

- La necesidad de limpieza en las áreas de infiltración.
- El manejo de obstrucciones en la superficie.
- Información básica inadecuada/conceptos erróneos de la geología e hidrología:
    - Diseño pobre y limitado del sistema
    - Mal diseño de las estructuras de infiltración, de los pozos e inestabilidad de las estructuras.
    - Pozos con malas condiciones de funcionamiento
    - Mala operatividad y rendimiento por debajo de los niveles esperados.
- Agua resultante en el acuífero de baja calidad.
- Pérdidas de agua por infiltración debido a fallas geológicas no conocidas o mal identificadas.
- Aceptabilidad política y social.
- No contar con personal capacitado para mantenimiento y/o ejecución.

Para implementar un proyecto de recarga se necesita información hidrogeológica como el tipo de acuífero, superficial o profundo, determinar la capacidad de infiltración del suelo (m/día) y la conductividad (i.e., permeabilidad) hidráulica de este (m/día), es decir, qué tan rápido absorbe y distribuye el agua el suelo, la porosidad y porosidad efectiva del suelo, la profundidad a nivel freático o la superficie piezométrica, es decir, qué tan profundo y qué tan fácil es llegar a este acuífero, la calidad de agua, tanto de la que llega como la que ya está en el acuífero, la

disponibilidad de terreno, el espesor saturado y el volumen del agua disponible para la recarga en un determinado tiempo (Ojeda, 2016).

Se encontró una ecuación empírica para los pozos de absorción, que relaciona el caudal inyectado con la permeabilidad horizontal, el diámetro, la profundidad del pozo y la constante π (Bourguet, 1971):

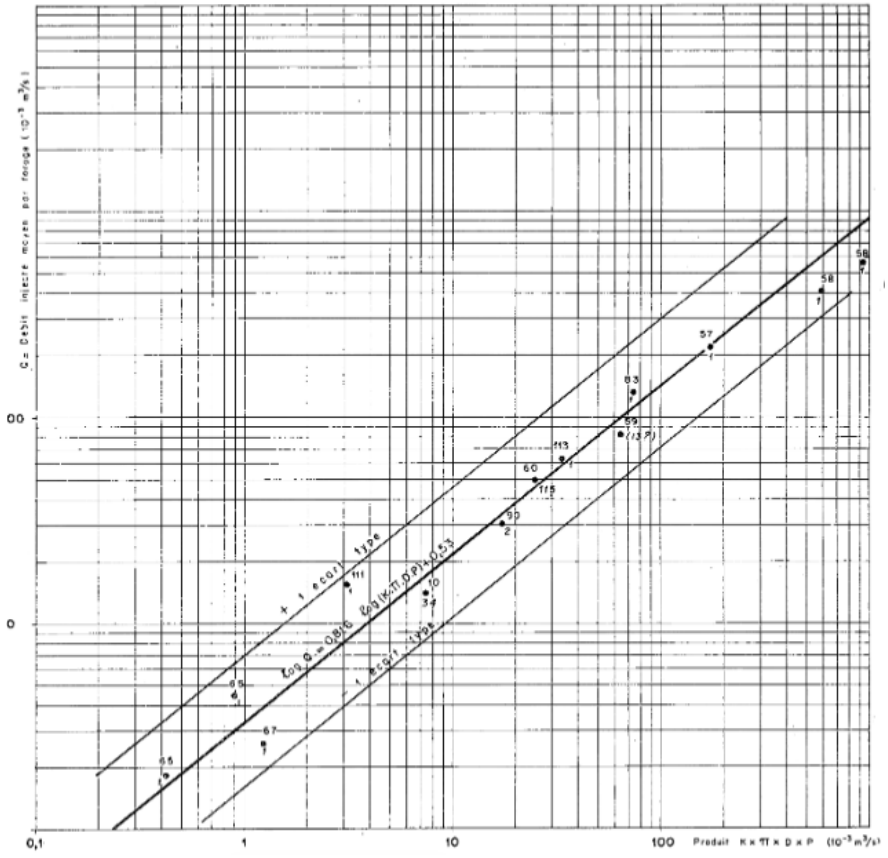


Figura 23. Método de Bourguet para recarga profunda, 1971

$$Log\ Q = 0.816\ Log\ (K \cdot \pi \cdot D \cdot P) + 0.53 \qquad \pm 0.32$$

Donde:

Q = Caudal inyectado por el pozo de infiltración [m3/s]

K = Permeabilidad horizontal del acuífero [m/s]

D = Diámetro del pozo [m]

P = Profundidad del pozo [m]

Esta ecuación se obtuvo a partir de una regresión logarítmica, la cual obtuvo un coeficiente de correlación de $\rho = 0.976$, lo que brinda una primera aproximación bastante confiable a la infiltración de un pozo cuando se conoce la permeabilidad horizontal del acuífero.

La recarga de acuíferos puede ser modelada para analizar el comportamiento de estos a lo largo del tiempo sin necesidad de hacer un gasto importante de construcción y monitoreo de un pozo. Existen diferentes programas que sirven para este tipo de simulaciones; uno de los Softwares más utilizados para estos trabajos es Modflow, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, que utiliza el método de diferencias finitas para los cálculos matemáticos del modelo.

Modflow funciona con el método de diferencias finitas, el cual lleva desde los años 60 en desarrollo y tiene bastante documentación. La ecuación general que rige para las condiciones transitorias, heterogéneas y anisotrópicas está dada por:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + W = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

$k_x, k_y\ y\ k_z$: conductividades hidráulicas en la dirección x, y & z

W: término de fuente o sumidero

S: rendimiento específico o coeficiente de almacenamiento

2.7 Monitoreo ambiental a nivel urbano

El monitoreo es el proceso de recolección, verificación, evaluación y utilización de información en una determinada zona o sitio de interés particular, buscando definir el impacto causado en este, sea positivo o negativo. Su concepto metodológico supone un sistema integral de seguimiento continuo de observaciones y mediciones de las diferentes características del

ambiente para su evaluación y el pronóstico de los cambios experimentados bajo la influencia antrópica y de los factores naturales (Perevochtchikova, 2009).

La información recabada en los sistemas de monitoreo sirve de insumo base para un trabajo de gobernanza que, idealmente, busca reducir la contaminación del agua, aprovechar el agua pluvial y apegarse al proceso natural del ciclo hidrológico en la medida de lo posible.

2.7.1 Gestión informada del agua

Actualmente, muchas ciudades del planeta comparten el problema de la escasez de agua potable; especialmente las que padecieron el crecimiento acelerado que se detonó en la década de 1960. Con el aumento de la población y el consumo, los gobiernos tuvieron que ampliar la provisión de agua potable y los sistemas de alcantarillado; siendo la última menos urgente que la primera, la construcción y mejora de los sistemas pluviales fue descuidada.

Dicho aumento en la demanda de agua y acumulación de poblaciones en centros urbanos ocurrió de la mano de un desarrollo económico inestable y de una falta de experiencia para administrar el agua como recurso. Todo esto dio lugar al estado actual en que se encuentran las grandes urbes, donde es común la escasez de agua potable, así como las inundaciones estacionales derivadas de un sistema de alcantarillado insuficiente a causa de su desactualización y falta de mantenimiento (Biswas, 2006).

Considerando lo anterior, se concluye que la mayoría de los impedimentos para contar con prácticas de administración de agua sostenibles en ciudades son institucionales, más que técnicos (Porse, 2013). Esto abre una línea de acción como alternativa para solucionar el problema en cuestión, actualmente se le conoce como gobernanza.

Se entiende como gobernanza al sistema que trabaja con la administración del agua para brindar óptimamente el recurso hídrico a poblaciones. Grigg (2011, p.800) en su publicación Water governance: from ideals to effective strategies la define de la siguiente manera:

“La gobernanza del agua implica un amplio conjunto de funciones habilitadoras y reguladoras que apoyan y supervisan a las organizaciones que utilizan los recursos para gestionar el agua para las necesidades humanas y ambientales. La gobernanza requiere el establecimiento de políticas para crear mecanismos para empoderar y controlar las funciones y los resultados de los procesos de gestión del agua”.

Es de suma importancia comprender la diferencia entre administración del agua y gobernanza, ya que estos trabajan de forma complementaria, cada uno con sus propias tareas. En la siguiente tabla hay una breve descripción de los roles que juegan cada uno. En la siguiente tabla se presenta una breve descripción de los roles que juega cada uno de ellos (Grigg, 2011).

Tabla 4. Roles de la gestión y gobernanza del agua (Grigg, 2011).

Sector	Roles de gestión	Roles de gobernanza
Suministro público e industrial	Proveer el suministro de agua por medio de servicios públicos y otros sistemas.	Garantizar el acceso, regular la asignación y calidad, empoderar a los servicios públicos.
Aguas residuales y calidad ambiental del agua	Proveer la remoción y tratamiento de aguas residuales y calidad ambiental del agua.	Garantizar el acceso, regular las descargas y la calidad del agua, empoderar a los proveedores.
Aguas pluviales e inundaciones	Proporcionado por organizaciones para el control de aguas pluviales e inundaciones de áreas y sitios urbanos.	Garantizar el acceso, regular las inundaciones y las fuentes difusas, garantizar la preparación.
Riego y drenaje agrícola	Proporcionar agua cruda y sistemas de drenaje en	Regular la asignación y el drenaje, empoderar a los sistemas de riego,

	zonas irrigadas y las alimentadas por la lluvia.	supervisar las organizaciones.
Control de flujo interno	Coordinar los flujos para la energía hidroeléctrica, la navegación, la recreación, la pesca y la vida silvestre.	Establecer los flujos internos, controlar desvíos y descargas
Gestión de aguas subterráneas	Gestionar el desarrollo y el uso de las aguas subterráneas.	Regular la extracción y protección de aguas subterráneas
Gestión de áreas y usos múltiples	Proporcionar coordinación y planificación de cuencas hidrográficas a través de agencias multipropósito.	Empoderar y coordinar la cuenca hidrográfica y otras acciones multipropósito.

Complementariamente, Porse (2013, p.31) en su publicación Stormwater Governance and Future Cities escribió sobre la gobernanza:

“Se distingue de las acciones gubernamentales para reconocer la flexibilidad, la descentralización y la inclusión de los participantes privados y comunitarios, que pueden haber establecido procesos extra-gubernamentales para la gestión de los recursos ambientales. La gobernanza del agua describe la gama de actores, instituciones y organizaciones que contribuyen a la gestión del agua en muchos niveles.”

De acuerdo con el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP, por sus siglas en inglés), el estado de confusión presente en la gobernanza de la mayoría de los países, por falta de instituciones que administren el agua o por la fragmentación de autoridades encargadas de la toma de decisiones, causan una gran cantidad de problemas que derivan como escasez de agua en las comunidades humanas (Grigg, 2011).

La implementación de políticas por parte de la gobernanza es útil porque pretende terminar con la escasez económica del agua, caso presente en la mayoría de las grandes ciudades. Esto quiere decir que no hay escasez física como tal, sino que cada vez resulta más caro obtener agua limpia, ya que se tiene que recurrir a pozos más profundos, o bombeos de fuentes más alejadas de las urbes.

Siendo el desarrollo de políticas una de las principales tareas de la gobernanza, es indispensable contar con información del comportamiento del recurso hídrico y la disponibilidad del agua. Para ello hay que contar con estaciones de monitoreo capaces de brindar información certera y constante, y así poder implementar acciones para perjudicar en menor medida el ciclo hidrológico. Sin embargo, la disponibilidad de datos es uno de los más grandes retos por el alto costo del monitoreo. Algunos otros retos para la gobernanza de las aguas pluviales son la falta de financiamiento, desarrollo descontrolado, sistemas desactualizados, requisitos de calidad ambiental e hidrología incierta (Porse, 2013).

Debido a la importancia de reconocer las necesidades específicas para una correcta gobernanza, redes a nivel mundial como Watershare y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) se han dedicado a determinar los desafíos locales del agua a partir de la experiencia global. Para esto, han implementado herramientas como City Blueprint y el Marco de Indicadores de Gobernanza del Agua; las cuales son ejemplos de tendencias para establecer indicadores concretos que proporcionan información acerca del manejo del agua en cada región.

City Blueprint revela los puntos de mejora de una ciudad respecto a los recursos hídricos. Al ser una evaluación rápida, funciona como la base para la planificación de las estrategias a largo plazo para el uso sostenible del agua. Asimismo, con los resultados obtenidos, City Blueprint proporciona una plataforma en la que las ciudades comparten sus mejores prácticas y aprenden unas de otras. Actualmente incluye alrededor de 125 ciudades en más de 50 países (KWR, 2020).

Como se muestra en la Figura 24, esta metodología se basa en tres bloques asociados a tres preguntas muy concretas:

¿Cuáles son los retos principales de la ciudad? (TPF).
¿Qué tan adecuado es el manejo del agua en la ciudad? (CBF).
¿En qué aspecto se puede mejorar la gobernanza? (GCF).

El primer bloque (i.e., TPF) se divide en 12 indicadores sociales, ambientales y económicos (e.g., tasa de urbanización, escasez del agua, inflación) evaluados del 0 al 4 respecto al nivel de preocupación. El segundo (i.e., CBF) incluye 25 indicadores divididos en 7 categorías (e.g., calidad del agua, residuos sólidos, infraestructura) evaluados del 0 (bajo desempeño) al 10 (alto desempeño). Como puntaje general, para estos dos bloques se calcula el Índice de Tendencias y Presiones (TPI, por sus siglas en inglés) y el Blue City Index® (BCI), respectivamente. Por su parte, el tercer bloque (i.e., GCF) se compone de 27 indicadores divididos en 9 condiciones de gobernanza (e.g., sensibilización, participación de las partes interesadas, capacidad de implementación) evaluados con una escala de puntuación tipo Likert desde muy alentadora (++) a muy limitante (-) (Feingold et al., 2018).

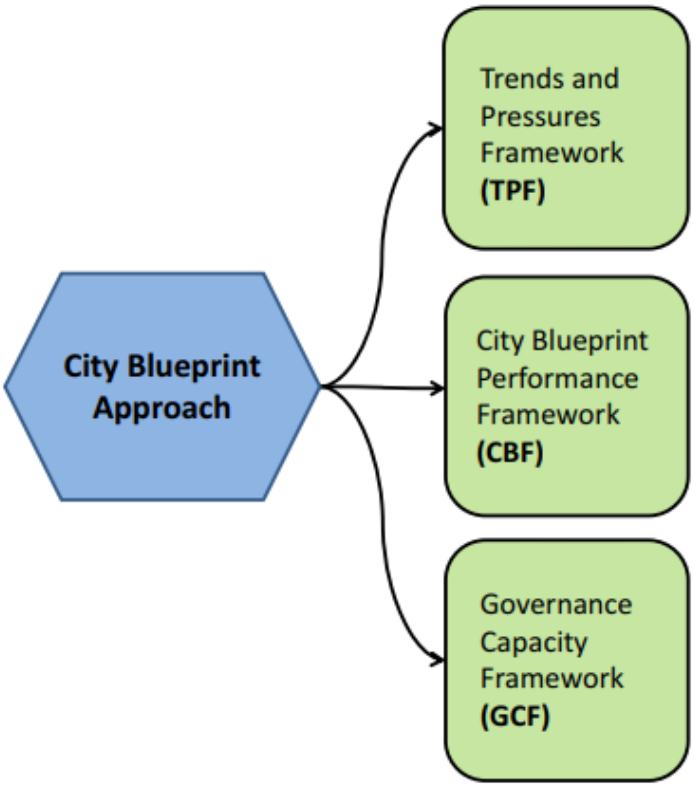


Figura 24. Metodología City Blueprint (Feingold et al.*, 2018).*

Por su parte, el Marco de Indicadores de Gobernanza del Agua de la OCDE es una herramienta de autoevaluación. Incluye 36 indicadores agrupados en 12 principios (e.g., financiación, monitoreo y evaluación, coherencia de políticas) que se evalúan con el sistema de semáforo, una lista de verificación con más de 100 preguntas sobre la implementación de cada principio y un plan de acción a corto, medio y largo plazo. Esta metodología considera una evaluación en 10 pasos divididos en 3 fases: preparación, diagnóstico y acción.

El sistema de semáforo utiliza una escala de cinco puntos que van desde el caso en que la dimensión analizada es completa y pertinente ("existe y funciona") hasta la ausencia de dicha dimensión ("no existe"); incluyendo la opción de "no es aplicable". Asimismo, se identifica la tendencia prevista a tres años en cuanto a la situación actual (i. e., mejora, estable o reducción) y el nivel de consenso entre las partes interesadas (i. e., amplio, aceptable o débil). Como último paso, el plan de acción describe detalladamente aspectos como el marco de políticas,

instituciones e instrumentos involucrados, los recursos financieros y humanos necesarios, así como la responsabilidad tanto del sector público como del privado (OCDE, 2018).

Las ventajas de estos sistemas son innumerables, pareciera que una de las principales es tener una calificación y tomar acciones para mejorar o conservar las buenas prácticas, según el caso. Pero no debemos perder de vista que estos sistemas también nos ayudan a recabar datos y generar mediciones importantes para futuros trabajos. La falta de información es un problema grave pero este tipo de proyectos facilita las soluciones a dichos problemas.

Ambas herramientas evalúan de manera detallada cada aspecto relevante para la adecuada gestión del agua. A pesar de tener indicadores y preguntas establecidas, la evaluación se adapta al contexto y objetivos de cada ciudad, lo cual proporciona resultados específicos en cada proyecto. Actualmente City Blueprint se utiliza principalmente en países europeos, sin embargo, es una buena opción para que los países menos desarrollados generen ideas y las adapten a sus necesidades. Por su parte, el Marco de Indicadores de Gobernanza del Agua de la OCDE ya ha sido utilizado tanto en países avanzados como en países en desarrollo (e. g., México). La disposición de todos los involucrados para proporcionar información y reconocer los puntos de mejora es clave para la participación en estas alternativas; requiriendo poco esfuerzo a cambio de una oportunidad para mejorar la gobernanza del agua de las ciudades.

2.7.2 Proyectos de monitoreo a nivel internacional

Internacionalmente se están desarrollando proyectos que integran la gobernanza y monitoreo para lidiar con la problemática de escasez del agua. Un proyecto destacado es el que se denomina Sistemas de Aguas Pluviales Inteligentes. Kerkes et al. (2016) lo describen como un sistema que busca mejorar los sistemas de alcantarillado que dejaron de ser funcionales por el rápido crecimiento de las ciudades. Fueron diseñados a partir de observaciones del comportamiento del agua y se han ido modificando conforme se desarrolla la ciudad. El proyecto busca complementar el sistema de alcantarillado con sensores y controladores de bajo costo, de modo que éstos

puedan responder en tiempo real a los cambios en el entorno, desde tormentas hasta cambio de uso de suelos, convirtiéndolos en sistemas adaptativos como se observa en la Figura 25.

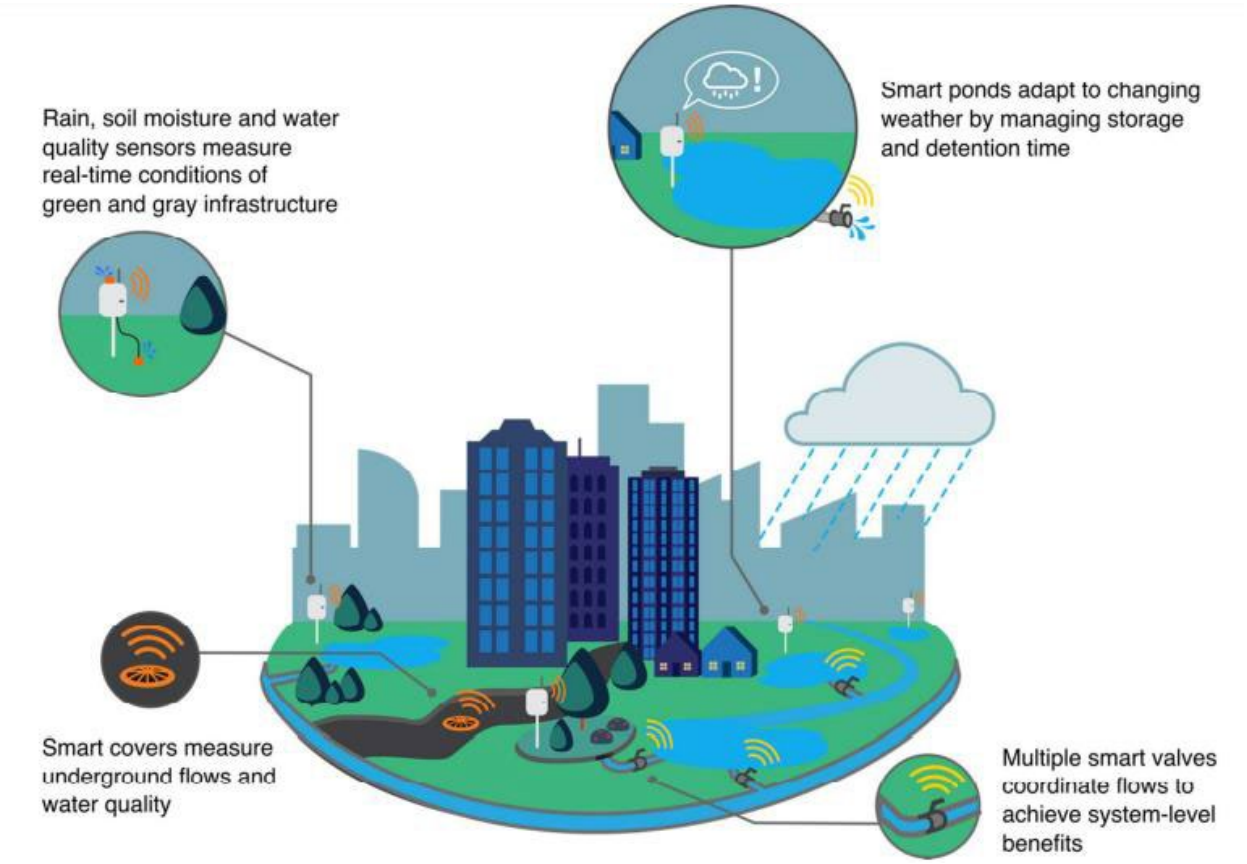


Figura 25. Sistemas de aguas pluviales inteligentes (Kerkez et al*., 2016).*

Los proyectos como este se consideran como una posible herramienta para mejorar la calidad del agua en ciudades puesto que, además de proveer información en tiempo real a las poblaciones y administradores, tendrán la capacidad de controlar válvulas, compuertas y bombas para controlar flujos de agua en tuberías, e incluso en infraestructuras verdes, con base en los datos recabados por los sensores in situ, lo cual puede reducir los flujos erosivos, prevenir inundaciones y, por medio de detención y retención, aumentar la calidad del agua por remoción de SST, contaminantes biológicos como E. Coli, nitritos y metales.

Este tipo de proyectos que buscan llevar a cabo un control de la calidad de agua en tiempo real tienen una baja cantidad en cuanto a número de estudios, sin embargo, son prometedores

debido a la reducción de costos en la tecnología que ya arroja datos precisos de flujo de agua, precipitación y humedad en el suelo, aunados al éxito en los resultados obtenidos en un área prueba de 100 km2 en South Bend, Indiana, el cual funciona con datos generados cada 5 min.

Los próximos desafíos del proyecto de Sistemas de Aguas Pluviales Inteligentes consisten en mejorar la tecnología para la medición de nutrientes, metales y bacterias ya que sigue en desarrollo, y, por otro lado, continuar estudiando la compleja dinámica espaciotemporal que gobierna el flujo del agua para poder hacer funcional la propuesta a mayor escala (Kerkez et al., 2016). También entran en esta categoría el costo de los periodos de mantenimiento de los sensores y, en algunas zonas, la seguridad de estos. Si ponemos de ejemplo México, podemos decir que existen ciertas zonas donde la gente no sabe relacionarse con este tipo de tecnologías y se pudiera llegar a tener problemas de delincuencia o vandalismo.

Otro proyecto destacado es la iniciativa de ciudades esponja (SCI, por sus siglas en inglés). Este proyecto surge en respuesta al aumento de desastres por inundaciones pluviales, y la escasez y contaminación de agua derivada de la urbanización. Durante el periodo 2014-2020 China comenzó este proyecto, que es análogo a otros que se han realizado en otros países como EE. UU., U.K. y Australia.

Jiang et al. (2018) mencionan que la SCI consiste en sistemas de agua pluvial integrados con la restauración de ecosistemas estratégicos (i. e., jardines de biofiltración o humedales), para preservar su capacidad de absorber y almacenar agua. Asimismo, se opta por cambiar el pavimento convencional por materiales permeables como adoquines porosos. Esta iniciativa se basa en un desarrollo de bajo impacto, que aplica soluciones ingenieriles y naturales encaminadas a almacenar temporalmente el agua de lluvia y mantener el proceso hidrológico natural.

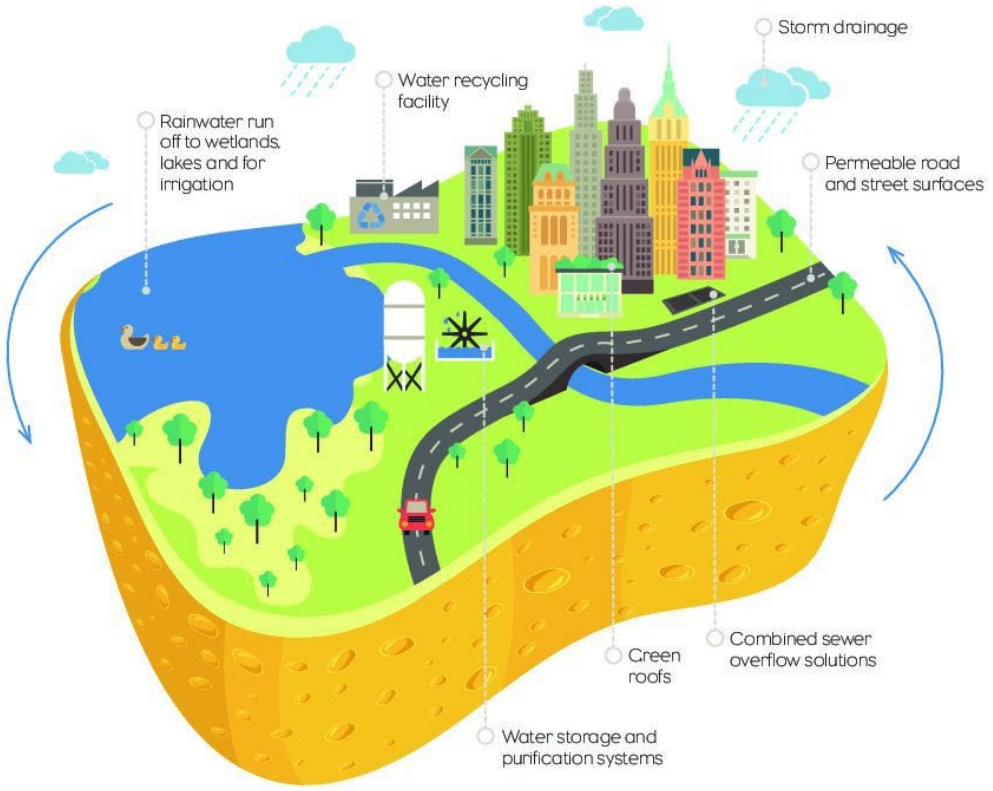


Figura 26 Ciudades esponja (China-Britain Business Focus, 2016)

Las ventajas de la SCI son congruentes con los objetivos del presente proyecto puesto que permite mitigar inundaciones, reducir la carga de contaminación en las escorrentías y recolectar agua de lluvia para almacenarla en cisternas subterráneas con el fin de garantizar la disponibilidad del recurso. Sin embargo, para que las ciudades esponjan sean una propuesta eficiente, es necesario adoptar medidas técnicas, de gobernanza y financieras adecuadas para cada región (Jiang et al., 2018). Otra de las desventajas de esta propuesta es que se necesita bastante espacio dentro de la ciudad para recolectar y almacenar la cantidad de agua solicitada, sin embargo, en ciudades “nuevas” tenemos la posibilidad de destinar, desde un inicio, espacios para este tipo de actividades.

2.7.3 Tecnologías existentes y desarrollo a futuro

Una tecnología existente para el monitoreo de humedales inundados estacionalmente es el espectro-radiómetro de imágenes de media resolución (MODIS). Este instrumento se encuentra en satélites que capturan la superficie de la Tierra cada 1 o 2 días, adquiriendo datos en distintas longitudes de onda (NASA, 2020). Se diseñó y se utiliza para el monitoreo de humedales inundados estacionalmente, pero podría aplicarse también a contextos urbanos. Al monitorear un humedal pequeño con MODIS, se ha encontrado que el nivel de agua respecto al tiempo es un buen indicador para determinar la extensión de inundación (Li et al., 2015).

De acuerdo con lo anterior, los sensores se han utilizado para monitorear desde el cumplimiento de reglamentos hasta el desempeño de instalaciones individuales de aguas pluviales. Se sigue buscando desarrollar tecnología capaz de brindar datos fiables y constantes de parámetros como presencia de nutrientes, metales pesados y bacterias, para asegurar una calidad óptima en el agua para su infiltración a los acuíferos y evitar problemáticas para la salud humana (Kerkez et al., 2016). También es necesario trabajar con tecnología que permita el monitoreo localizado de la infraestructura distribuida para asegurar el desempeño de los sistemas.

Las ciudades son consideradas puntos clave para la obtención y análisis de información puesto que es posible combinar datos de plataformas privadas con redes públicas de sensores y así fortalecer el desarrollo de métricas para el monitoreo ambiental (Porse, 2013).

Como se mencionó anteriormente en esta sección de Marco Teórico, la infiltración del agua es parte fundamental del ciclo hidrológico. Este se ve alterado principalmente por la impermeabilización de suelos. Al impedir el flujo natural del agua de lluvia hacia los acuíferos se minimiza el aprovechamiento de este recurso, además de generar problemáticas como las inundaciones. Una opción para modificar esto son los SuDS, cuyo objetivo es maximizar los beneficios que es posible obtener de la adecuada gestión de las aguas superficiales. Para solucionar el problema es necesario reconocer la importancia de una adecuada gobernanza del agua, acompañada de un plan de monitoreo del flujo y calidad de los recursos hídricos de cada región; en este caso del AMG.

3. Marco Contextual

3.1 San Juan de Abajo

San Juan de Abajo cuenta con una población de más de 11,000 personas y una economía agrícola. Teniendo en cuenta que el crecimiento de las urbes es cada vez más rápido, se deben considerar estrategias que prevengan catástrofes. Parte de la economía del lugar está basada en la agricultura, sin agua este comercio no puede prosperar, por ende, tampoco la población. Tener un entendimiento de la hidrología del lugar es importante para proponer una infraestructura adecuada. Los ríos Huichichila y Ameca son cuerpos de agua muy cercanos al pueblo, ambos muy especiales, sin embargo, en tiempos de lluvias, sus calados aumentan considerablemente y presentan un riesgo para la población.

Uno de los factores que Pourrut (1995) presenta como fundamentales para el estudio de los flujos hidrológicos en una cuenca es el uso de suelo y vegetación, dado que este factor estará directamente ligado con la rugosidad del suelo. Por lo tanto, en primera instancia se consultó el uso de suelo y vegetación presentado por el INEGI a escala 1:250,000 en su Serie VII. Esta primera aproximación se realizó para identificar los principales usos de suelo de y tipos de vegetación de la zona (Geografía INEGI, 2021).

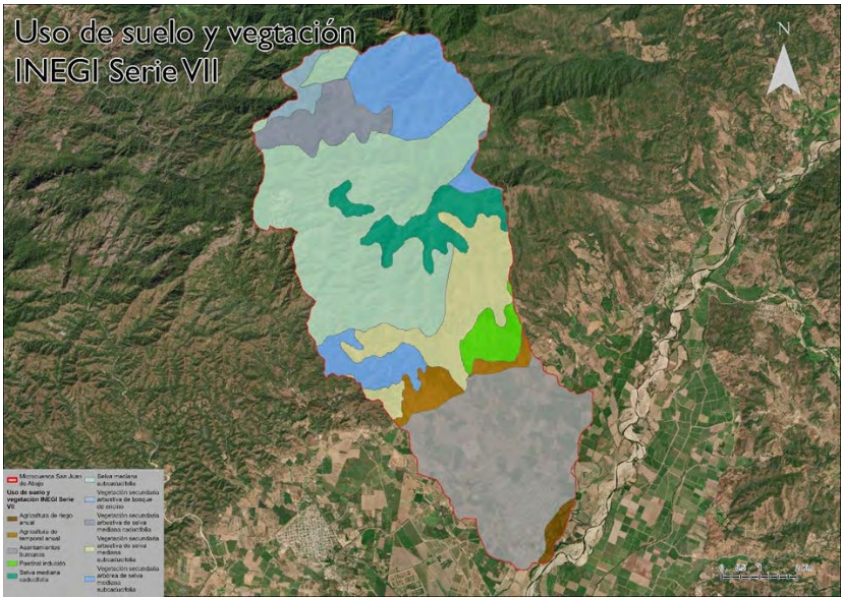


Figura 1. Uso de suelo y vegetación INEGI Serie VII (INEGI, 2021).

De la Figura 1., es posible observar que en la parte alta de la cuenca se encuentran: vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino, vegetación secundaria arbustiva de selva mediana caducifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subcaducifolia, vegetación secundaria arbórea de selva mediana subcaducifolia y selva mediana caducifolia; mientras que en la parte baja de la cuenca es posible encontrar: pastizal inducido, agricultura de temporal anual, agricultura de riego anual y asentamientos humanos.

De esta manera es posible concluir que dentro de la cuenca es posible identificar dos zonas marcadas por la intensidad de la intervención humana, donde la parte alta presenta una intervención humana baja, mientras que la parte baja presenta una alta intervención humana.

Con la finalidad de llevar a cabo un análisis a mayor detalle de los usos de suelo y vegetación presentes en la zona se llevó a cabo una clasificación de la vegetación a partir de una imagen satelital multiespectral procedente de la plataforma PlanetScope Monitoring, la cual cuenta con una resolución de 3.7 m por pixel y un tiempo de revisita de un día (Planet, 2023) (Figura 1010). La imagen se obtuvo para el 29 de abril de 2023, previa a la temporada de lluvias, para observarse con mayor detalle las diferencias entre cada tipo de vegetación de la zona.

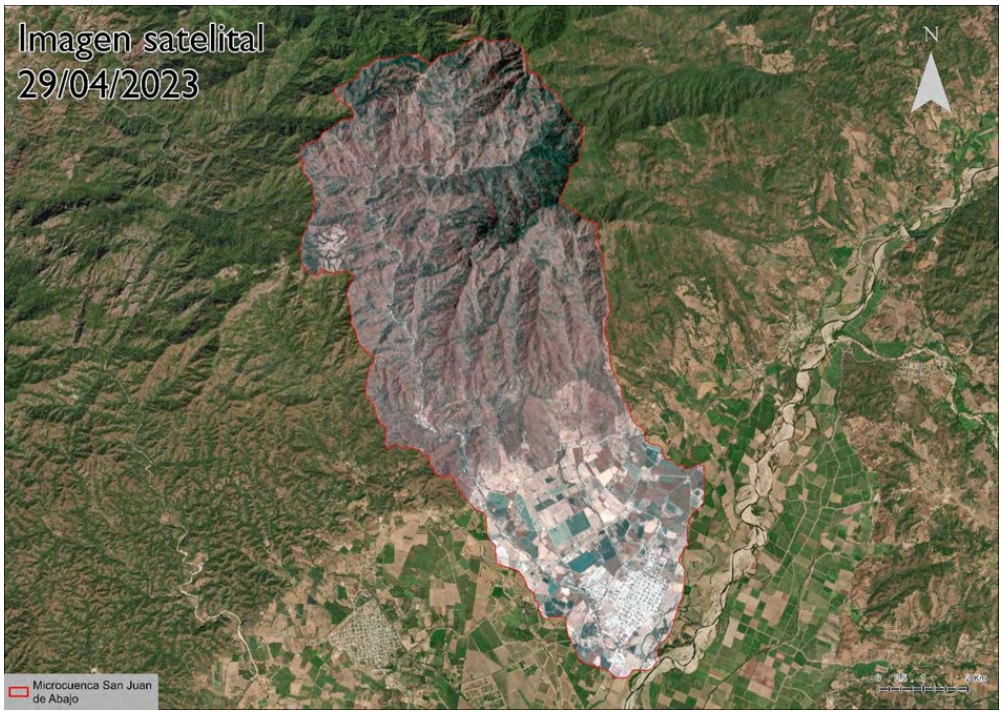


Figura 2. Imágen satelital del 29 de abril de 2023 (Planet, 2023).

Para clasificar la imagen satelital se realizó una clasificación supervisada, usando el software ArcGIS pro. Para este proceso primero se realizaron puntos de entrenamiento de la vegetación utilizando las siguientes clases: vegetación cerrada, vegetación abierta, vegetación dispersa, desprovisto de vegetación, agricultura activa, agricultura pasiva y urbano. Una vez entrenado el modelo se corrió la clasificación supervisada de la vegetación utilizando el algoritmo de Support Vector Machine.

Posteriormente, a partir de las cartas topográficas del INEGI 1:20,000 se detalló la clasificación espectral de la vegetación generada mediante la clasificación supervisada, tras determinar las áreas establecidas como: camino, carretera, canal, calle y manzana. Estas áreas se agregaron a la clasificación supervisada resultando en la clasificación de la vegetación presentada en la Figura 3(Geografía INEGI, 2016).

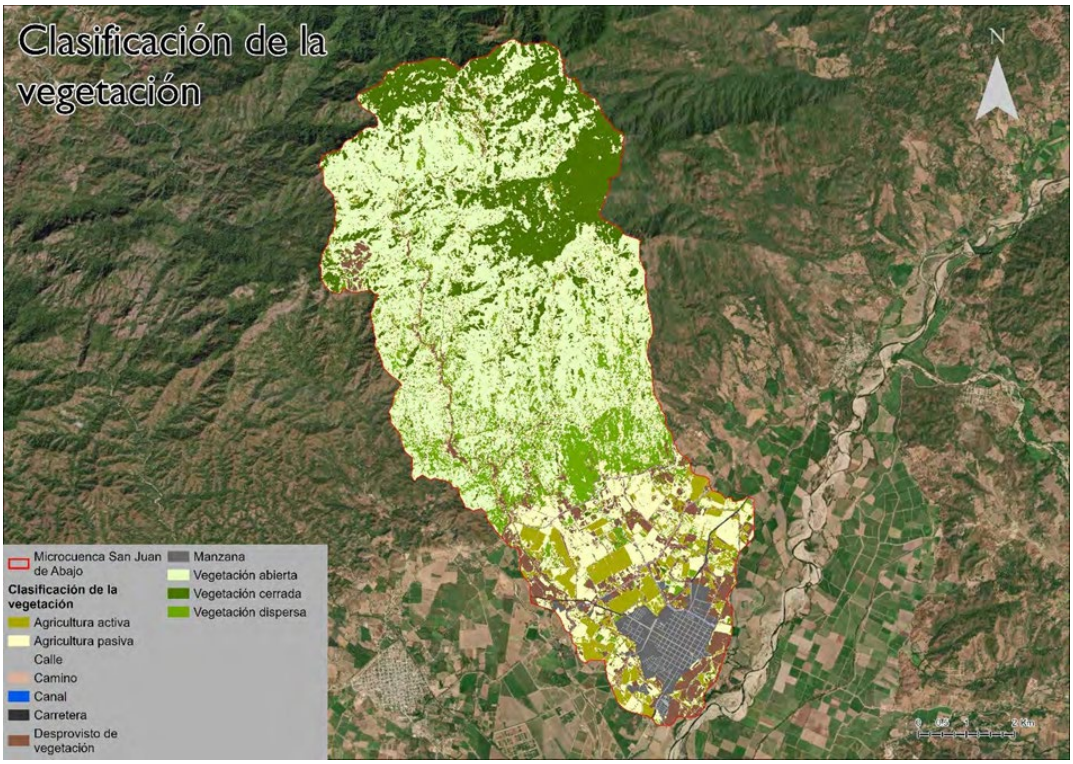


Figura 3. Clasificación de la vegetación (Elaboración propia de alumnos del semestre pasado).

De la Figura anterior es posible observar que la tendencia de distribución presentada en el Uso de Suelo y Vegetación INEGI Serie VII se mantienen, dado que el área con mayor intervención humana puede ubicarse al sur de la cuenca y el área con una baja intervención humana se ubica al norte de la cuenca.

3.1.3 Propuestas de intervención del semestre anterior

Según el estudio de los compañeros del semestre pasado establecieron tres zonas de estudio. Dos de ellas en el Río Huichichila y otra en una zona de cultivos de temporada y ganadería en donde pasa el afluente de una escorrentía.

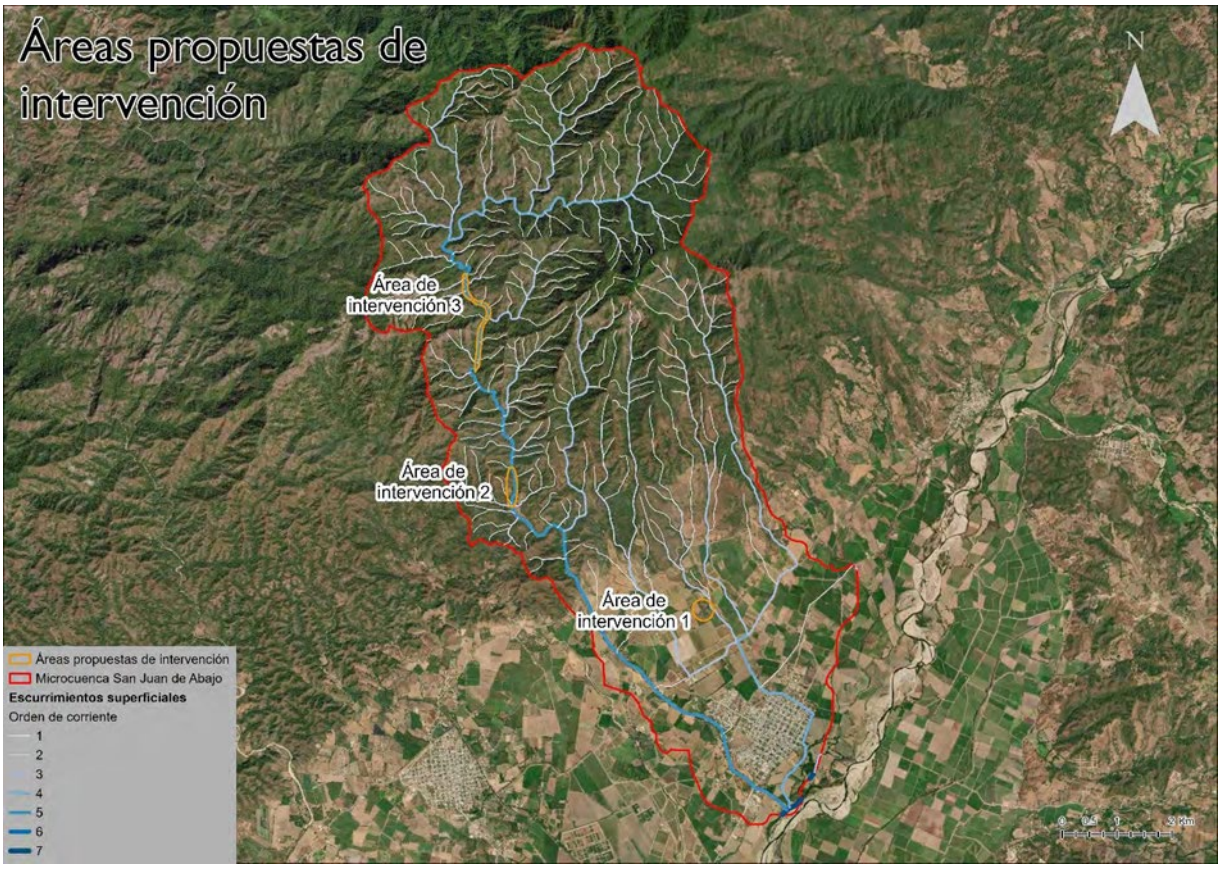


Figura 4. Áreas propuestas de intervención.

Área 1: Represa y área inundable

- Objetivo: Generar una actividad económica alternativa a la siembra de sandías y recargar el acuífero.
- Características:
    - Represa con área inundable para producción acuícola.
    - Dominio público para beneficiar a la comunidad.
    - Conexión con el suelo para la recarga del acuífero.

Área 2: Área recreativa estilo balneario

- Objetivo: Fomentar la recreación segura y la conservación del río.
- Características:

- Acondicionamiento de un área recreativa pública con acceso seguro al río.
- Mantenimiento continuo para evitar accidentes y contaminación.
- Infografías para concientizar sobre la importancia del río.

Área 3: Gaviones para retención de agua

- Objetivo: Retener y ralentizar el flujo de agua para proteger el área 2 y prevenir la erosión.
- Características:
  - Construcción de gaviones en la parte alta de la cuenca.
  - Reducción de la velocidad del flujo de agua en áreas erosionables.
  - Protección del área 2 de crecidas en el río.

Beneficios esperados:

- Diversificación de la economía local.
- Mejora de la calidad del agua.
- Disminución del riesgo de inundaciones.
- Promoción de la recreación y el turismo.
- Conservación del ecosistema del río.

Se recomienda:

- Implementar las tres áreas de intervención de manera conjunta para lograr un impacto integral en la gestión del agua.
- Involucrar a la comunidad en el proceso de diseño, implementación y mantenimiento de las intervenciones.
- Realizar un seguimiento y monitoreo continuo de las intervenciones para evaluar su efectividad y realizar ajustes necesarios.

Información Meteorológica.

Generación de una tormenta de diseño para el área de estudio

- No existía información de referencia de tormentas de diseño para la zona.
- Se consultó información de las estaciones meteorológicas de CONAGUA: San José del Valle, La Desembocada y Las Gaviotas.
- Se determinó la precipitación máxima registrada por estación.
- Se interpoló la precipitación máxima para el área de estudio usando el método IWD.
- Se definió la duración promedio de una tormenta con la mayor intensidad: 3 horas.

Proceso de generación:

1. Obtención de datos de precipitación:
    - Se utilizaron datos de las estaciones meteorológicas de CONAGUA para el período 1981-2010.
    - Se seleccionaron las estaciones más cercanas al área de estudio y con mayor cantidad de datos históricos.
2. Interpolación de la precipitación máxima:
    - Se utilizó el método IWD para estimar la precipitación máxima en el área de estudio.
3. Definición de la duración de la tormenta:
    - Se analizaron datos de las estaciones meteorológicas Acuarela, Las Palmas y Vidanta.
    - Se identificaron las tormentas con mayor intensidad y ocurrencia dentro de intervalos de una hora.

- Se determinó que la duración del evento de lluvia con mayor intensidad es de 3 horas.

Resultado:

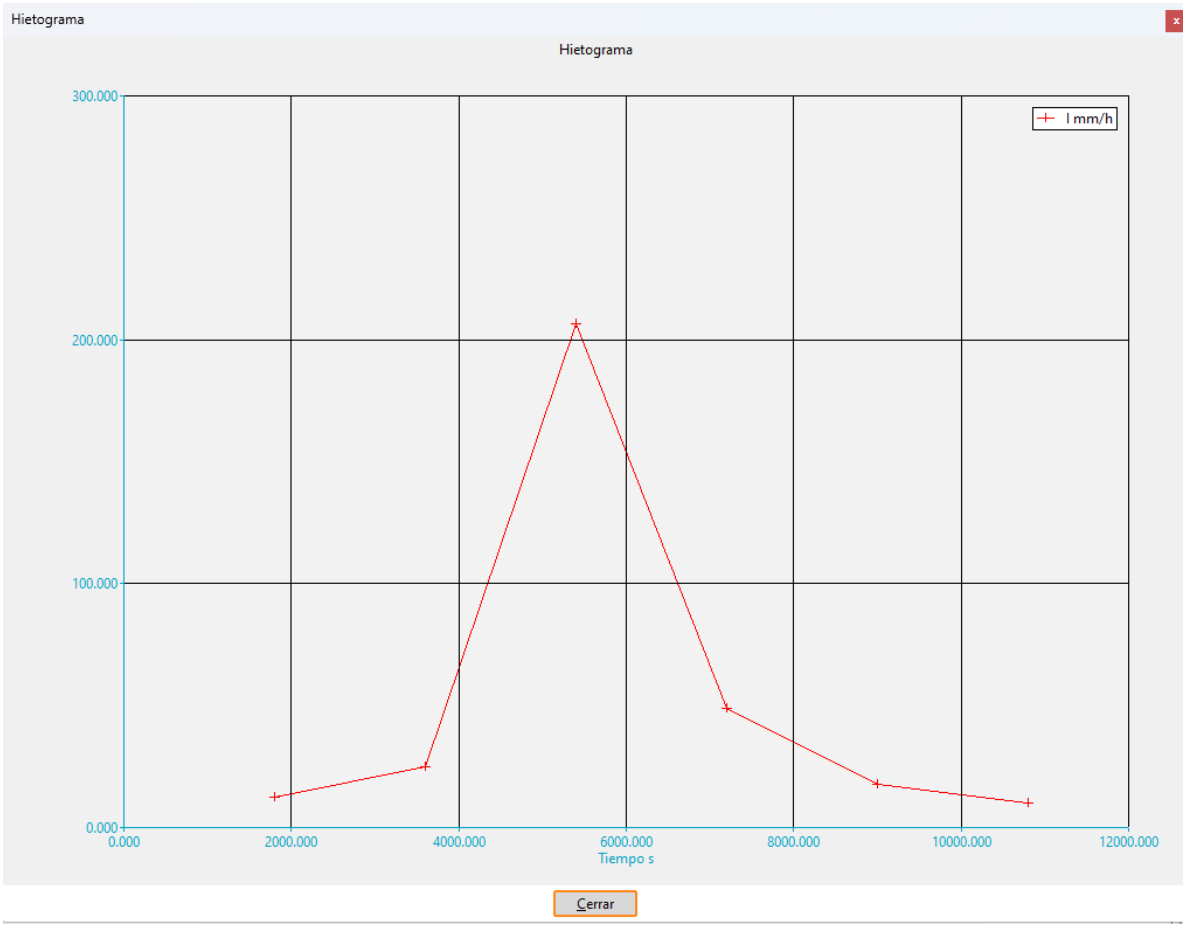
- Se generó una tormenta de diseño para el área de estudio con una precipitación máxima promedio y una duración de 3 horas.

Beneficios:

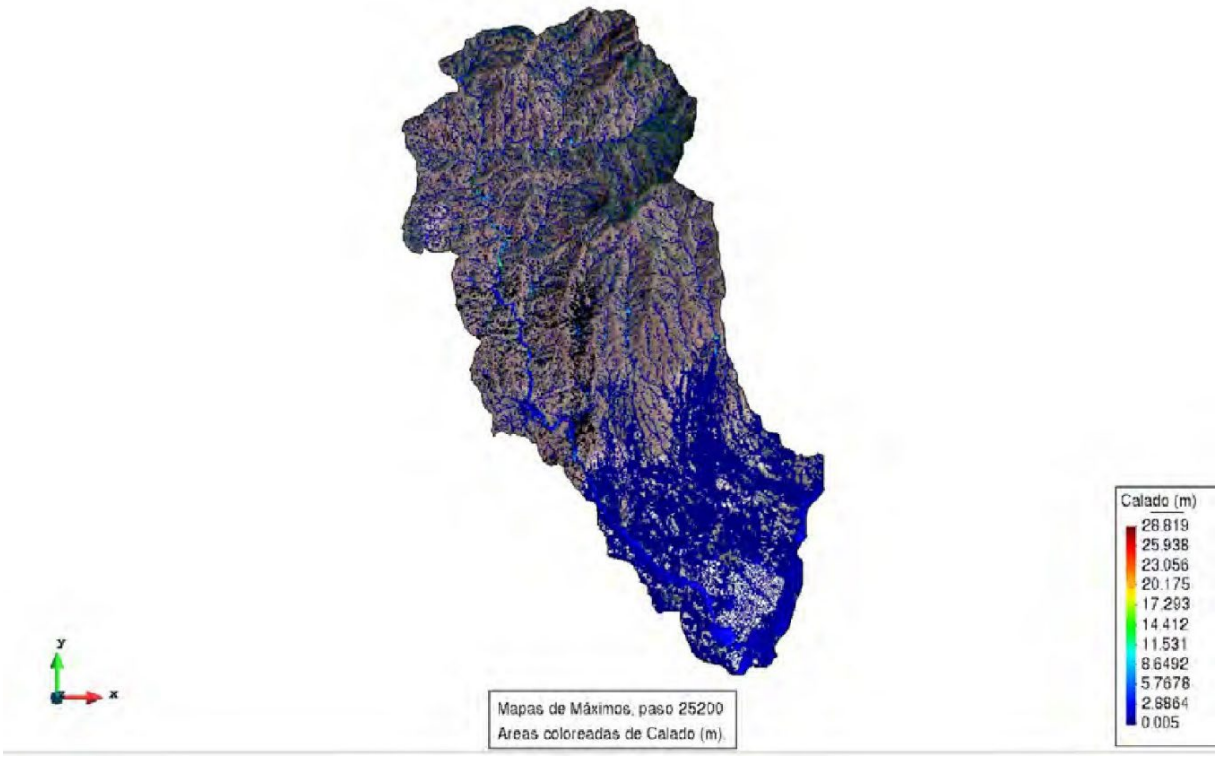
- Permite realizar simulaciones hidrológicas más precisas en el área de estudio.
- Aporta información valiosa para el diseño de infraestructura hidráulica.
- Reduce el riesgo de inundaciones y otros desastres relacionados con el agua.

Modelación y resultados de IBER.

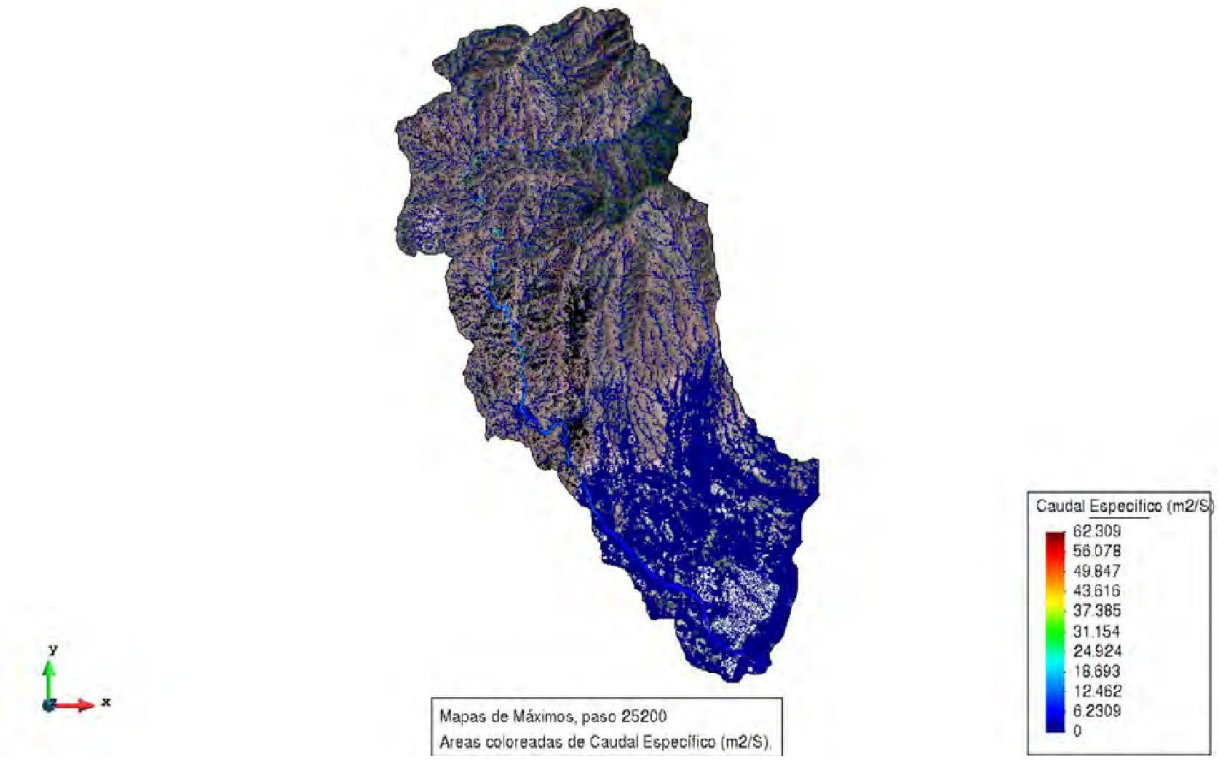
Para realizar el modelo los compañeros realizaron un preprocesamiento de la información recabada mediante el uso del software de SIG ArcGIS pro. Primero se transformó la información correspondiente al modelo digital de elevación tipo superficie de formato ráster a formato ASCII, ya que es el formato soportado por IBER. Finalmente, el modelo digital de elevación en tipo ASCII fue utilizado para generar un RTIN en la plataforma de IBER con un tamaño de malla máximo de 100 metros, un tamaño de malla mínimo de 1 m y una tolerancia de 0.6 m.



Hietograma asignado para la primera iteración en IBER.

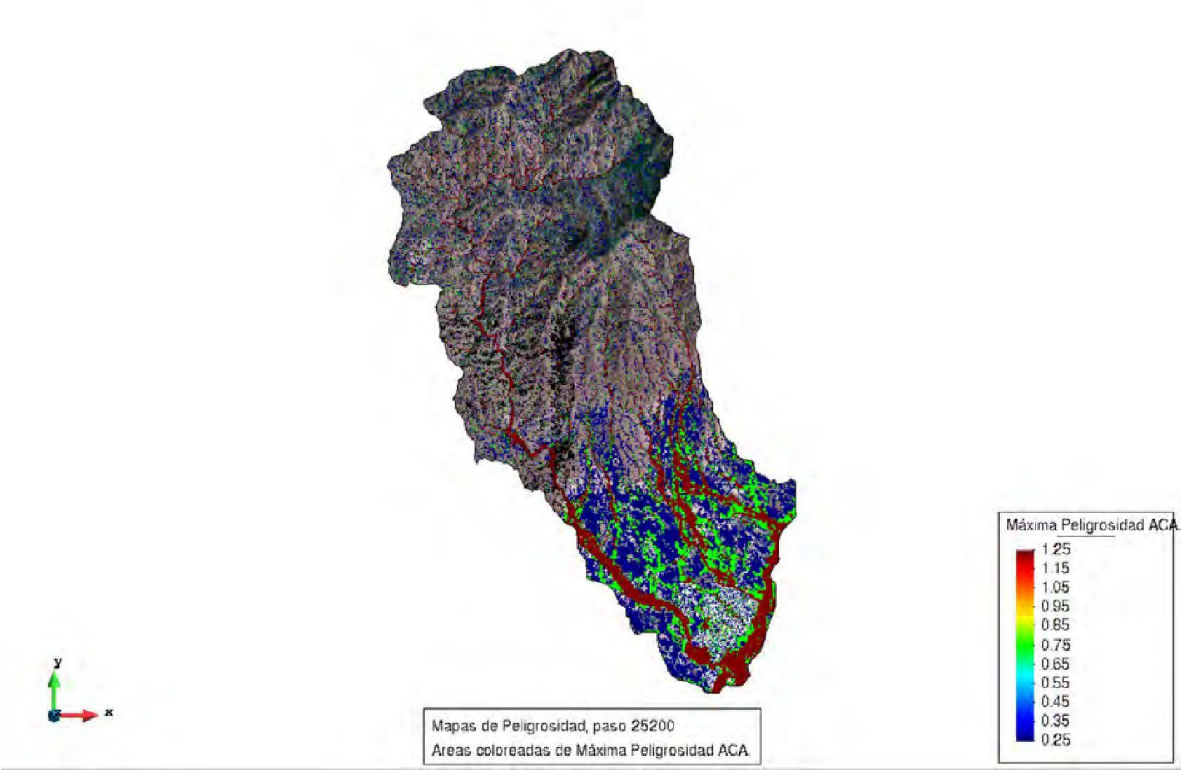


Mapa de máximo calado en el área de estudio.



Mapa de máximo caudal específico en el área de estudio

A partir de los resultados presentados en las figuras anteriores es posible identificar las zonas con mayor calado y caudal específico, al presentarse un evento de lluvia. De este primer resultado es posible identificar como la zona alta de la cuenca (Norte), presenta cauces más definidos dada su topografía accidentada; mientras que la zona baja de la cuenca (Sur), que se encuentra en una planicie, es más propensa a generar inundaciones. Otro aspecto importante evidenciado de esta primera iteración es la identificación de las zonas más propensas a inundaciones en el poblado de San Juan de abajo, en una franja de Noroeste a Sureste.



Mapa de máxima peligrosidad ACA.

Finalmente, en la anterior imagen, es posible observar la máxima peligrosidad basada en la metodología de la Agencia Catalana del Agua (ACA). La metodología propuesta por la agencia tiene como propósito caracterizar la gravedad del flujo del agua y como este puede impactar en la seguridad de las personas y los bienes materiales. Esta caracterización está

enfocada en el calado y el flujo del agua lo cual la ACA muestra la siguiente tabla en la figura 10.

Gravedad	Descripción	Rango	Factor de Gravedad
Extrema	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado superior a 4 metros, una velocidad mayor que 6 m/s o el producto de ambas superior a 2 m2/s	c> 4m v > 6 m/s c·v >2m2/s	6.0
Muy alta	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado entre 2 y 4 metros, una velocidad entre 3,5 y 6 m/s o el producto de ambas superior a 1 m2/s	2<c< 4m 3,5<v < 6 m/s 1<c·v <2m2/s	4.0
Alta	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado entre 1 y 2 metros, una velocidad entre 1 y 3,5 m/s o el producto de ambas superior a 0,5 m2/s	1<c< 2m 1<v < 3,5 m/s 0,5<c·v <1m2/s	2.0
Moderada	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado superior a 0,4 metros, una velocidad mayor a 0,4 m/s y el producto de ambas superior a 0,08 m2/s	0,4<c< 1m 0,4<v < 1 m/s 0,08<c·v <0,5m2/s	1.0
Baja	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado inferior a 0,4 metros, una velocidad menor a 0,4 m/s y el producto de ambas menor que 0,08 m2/s	c ≤ 0,4m v ≤ 0,4 m/s c·v ≤ 0,08m2/s	0.5

Figura 88. Determinación de peligrosidad ACA (Gracia et al., 2010).

Caracterización territorial

Topografía

Zona baja (Pueblo San Juan de Abajo y áreas agrícolas):

- Terreno prácticamente plano.
- Cercanía al Río Ameca.
- Riesgo de inundaciones por aumento del caudal de los ríos en temporadas de lluvia.

Importancia de la vegetación:

- La ausencia de vegetación aumentaría significativamente el riesgo de inundaciones en el pueblo San Juan de Abajo.

Consideraciones adicionales:

- El Modelo Digital de Elevación muestra claramente la diferencia topográfica
- La zona baja carece de obstáculos naturales que puedan detener el flujo del agua.

Beneficios:

- La comprensión de la topografía de la cuenca permite identificar áreas de riesgo y tomar medidas de prevención.
- La información sobre la vegetación es crucial para diseñar estrategias de manejo del agua y conservación del suelo.

- El análisis de la cuenca contribuye a la toma de decisiones informadas para la gestión del agua y la reducción del riesgo de desastres.
- La tabla abajo integra los cuerpos de agua superficiales,

  principalmente ríos, de la zona de estudio.

Tabla IX. Cuerpos de agua superficiales de San Juan de Abajo. (SIGEIA, 2023).

Tipo	Nombre del río	Clasificación	Longitud del río (m)
Canales de irrigación	Canal Guastitán	Canal	5,979.9
Canales de irrigación		Canal	1,033.53
Canales de irrigación		Canal	1,445.81
Canales de irrigación		Canal	8,005.19
Canales de irrigación		Canal	8,706.29
Canales de irrigación		Canal	13,798.84
Canales de irrigación		Canal	5,572.34
Ríos y límites de corrientes de perenes dobles	Río Ameca	Corriente perenne	6,217.74

Ríos y límites de corrientes de perenes dobles	Río Ameca	Corriente perenne	11,841.25
Ríos y límites de corrientes de perenes dobles	Río Ameca	Corriente perenne	9,260.17
Arroyos y de corrientes intermitentes	A. Guastitán	Corriente intermitente	8,782.22
Arroyos y de corrientes intermitentes		Corriente intermitente	

Calado:

El río Huichichila presenta variaciones en su profundidad, con zonas de 2 a 5 metros y otras que superan los 5 metros cerca del río Ameca.

En la parte alta de la cuenca, la profundidad alcanza hasta 10 metros.

En general, el calado se mantiene dentro de estos rangos.

Peligrosidad:

La mayor peligrosidad se concentra en la zona baja de la cuenca, en la confluencia de los ríos Ameca y Huichichila, donde el índice de peligrosidad alcanza 1.25.

A lo largo del río Huichichila, el índice de peligrosidad también es de 1.25.

Algunas áreas dentro del pueblo de San Juan presentan un índice elevado, lo que sugiere riesgo de inundación y escurrimientos peligrosos.

Calidad del agua:

En la parte alta de la cuenca, el agua del río Huichichila es clara y no muestra signos de contaminación.

El agua fluye por un cauce natural sin intervención humana ni urbanización.

A medida que se acerca a la desembocadura con el río Ameca y al pueblo San Juan de Abajo, el agua pierde claridad y se contamina.
Se observaron descargas de aguas negras provenientes de viviendas cercanas al río.
La contaminación es relativamente baja y podría solucionarse desviando las descargas a la red municipal.
Con un tratamiento adecuado del entorno, el agua del río podría mantenerse limpia.

Observaciones adicionales:
El análisis realizado con IBER permitió identificar zonas con diferentes características hidrológicas.
La calidad del agua se ve afectada por las actividades humanas, principalmente por las descargas de aguas negras.
Es necesario implementar medidas para prevenir la contaminación del río y mejorar su calidad.

Beneficios:
La comprensión de la dinámica hidrológica de la cuenca permite tomar decisiones informadas para la gestión del agua.
El conocimiento de la calidad del agua es fundamental para la protección de la salud pública y el medio ambiente.
La identificación de áreas de riesgo de inundación facilita la implementación de medidas de prevención y mitigación.
La microcuenca de “San Juan de Abajo” se encuentra en tres acuíferos: “Puerto Vallarta”, “Zacualpan – Las Varas”, “Valle de Banderas”. Las características de cada acuífero se mencionan en la siguiente tabla:

Tabla X. Características de los acuíferos pertenecientes a la microcuenca de San Juan de Abajo. (SIGEIA, 2023).

Clave del acuífero	Nombre del acuífero	Disponibilidad		Fecha D.O.F.	¿Sobre - explotado?	Superficie del acuífero (Ha)	Superficie de la geometría (m2)	Superficie de incidencia (m2)
1427	Puerto Vallarta.	Sin disponibilidad		17/09/2020	Sí	1,572.521	68,042,409.06	24,274.872
1806	Zacualpan – Las Varas	Con disponibilidad			No	137,383.927		2’351,616.845
1807	Valle de Banderas	Con disponibilidad			No	118,058.122		65’666,517.343

Dos de los tres acuíferos que inciden en la zona de estudio se encuentran con un buen abasto de agua, a excepción del de “Puerto Vallarta”. A su vez, en la tabla, se puede saber que “Valle de Banderas” abastece el 96.50% de la cuenca, “Zacualpan” el 3.46%, y “Puerto Vallarta” el 0.04%. Es importante notar que los acuíferos que tienen una mayor carga de abastecimiento no se encuentran sobreexplotados.

La precipitación de la zona es favorable para el constante flujo de aguas superficiales, mismo que tiene efecto sobre el agua subterránea mediante procesos de infiltración e intercambio con los ríos (mismo que se mencionan en la tabla 1). La instalación de tecnologías, como gaviones, compuertas, balsas de acuicultura, etc.; disminuyen la velocidad con la que fluye el agua superficial, beneficiando la infiltración y el reabastecimiento de los acuíferos.

Existen varias concesiones dentro de la zona de San Juan de Abajo que se relacionan directamente con la extracción de agua de los acuíferos. Éstas se resumen en la tabla 3.

Tabla III. Concesiones subterráneas. (PNT, 2023)

Estado	Municipio	Cuenca	Acuífero	Clave de acuífero	Volumen anual en m3
Nayarit	Bahía de Banderas	Río Ameca-Ixtapa	Valle de Banderas	7	78,351
					206,186
					144,330
					149,828
					127,835
					180,069
					116,838
					203,436
					185,568
					141,581
					89,347
					45,361
					114,089
					166,323
					156,701
					123,711
					65,979
					104,467

De acuerdo con la tabla se tiene un total de 2’400,000 m3 de extracción de agua por concesiones registradas. En total se tiene información de 18 concesiones. La tabla 2 no presente información de la cantidad de agua disponible en el acuífero, solo que sí se tiene disponibilidad; no obstante, el volumen de extracción es relativamente menor al área del acuífero, suponiendo que hay una relación entre el área y el volumen de agua disponible, se podría decir que la extracción de ésta no supone un problema de sobreexplotación.

3.2 Zona Poniente de Guadalajara

3.2.1 Introducción

La Zona Poniente de Guadalajara, emerge como un área de oportunidad para la investigación, innovación y el desarrollo de infraestructura de recarga artificial. Esta región, incluye a los municipios de Zapopan, Tlajomulco de Zúñiga y zonas de Tlaquepaque.

Al aprovechar la ubicación estratégica y la infraestructura existente de la Zona Poniente, se pueden diseñar soluciones de recarga artificial que satisfagan las necesidades tanto de residentes como de visitantes. Además, la integración de estas tecnologías avanzadas promovería la eficiencia energética y la reducción de la huella de carbono, contribuyendo así a la construcción de una ciudad más resiliente y sostenible.

Desde el punto de vista climático, la Zona Poniente de Guadalajara disfruta de un clima subtropical seco, con temperaturas cálidas la mayor parte del año y una temporada de lluvias durante los meses de verano. Esta ubicación geográfica y su clima favorable han contribuido al desarrollo urbano y económico de la región.

3.2.2 Definición del área de estudio

La Zona Poniente de Guadalajara se encuentra ubicada en el estado de Jalisco, en el occidente de México. Limita al norte con el municipio de Zapopan, al este con el Río Santiago que la separa de la Zona Centro de Guadalajara, al sur con el municipio de Tlajomulco de Zúñiga y al oeste con el municipio de Zapopan y el municipio de Tlajomulco de Zúñiga. Esta ubicación geográfica la convierte en un punto neurálgico dentro del área metropolitana de Guadalajara, la segunda área metropolitana más grande de México.

La Zona Poniente se caracteriza por su topografía variada, que va desde áreas planas hasta zonas montañosas, lo que le otorga un paisaje diverso y atractivo. Además, está atravesada por importantes vías de comunicación, como la Carretera Federal 15 que conecta Guadalajara con otros puntos del país, así como por modernas autopistas y avenidas que facilitan el transporte dentro y fuera de la región.

Más específicamente nuestra área de estudio corresponde a la microcuenca El Tecolote es una región geográfica específica ubicada en la zona poniente de la ciudad de Guadalajara, en el estado de Jalisco, México. Esta área abarca una extensión relativamente pequeña de terreno, pero juega un papel crucial en el equilibrio hidrológico y ecológico de la región circundante.

El entorno natural de la microcuenca está caracterizado por una combinación de elementos urbanos y naturales. Aunque se encuentra dentro del área urbana de Guadalajara, aún conserva ciertos elementos de vegetación y cursos de agua naturales que son vitales para la regulación del agua y la biodiversidad local.

Sin embargo, como ocurre en muchas áreas urbanas en crecimiento, la microcuenca El Tecolote enfrenta diversos desafíos ambientales y de gestión del agua. Entre estos desafíos se encuentran la contaminación del agua, la pérdida de áreas verdes debido al desarrollo urbano y la alteración de los cursos de agua naturales debido a la urbanización y la infraestructura construida.

El estudio y la simulación de esta microcuenca son de suma importancia para comprender mejor cómo los cambios en el uso del suelo y la infraestructura pueden afectar el flujo del agua, la calidad del agua y la capacidad de la microcuenca para proporcionar servicios ecosistémicos vitales para la comunidad local y el medio ambiente en general.

3.2.3 Demografía

La Zona Poniente de Guadalajara alberga una población diversa y dinámica que refleja la riqueza cultural y social de la región. Con una población en constante crecimiento, esta área se ha convertido en uno de los polos demográficos más importantes de la ciudad.

Según datos recientes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la población total de la Zona Poniente se estima en 1 millón 469 mil 966 para el año 2023, y con una densidad poblacional promedio de 1274.7 habitantes por kilómetro cuadrado. Esta densidad varía significativamente dentro de la zona, siendo las áreas residenciales y comerciales las más densamente pobladas.

En cuanto a la estructura demográfica, la Zona Poniente presenta una distribución equilibrada por edades, con una proporción significativa de jóvenes y adultos en edad laboral. Sin embargo, también se observa un aumento en la población de adultos mayores, reflejando las tendencias demográficas a nivel nacional.

La diversidad étnica y cultural es otro aspecto destacado de la demografía de la Zona Poniente. La presencia de comunidades indígenas, migrantes internacionales y personas de diversas regiones de México ha enriquecido el tejido social de la región, contribuyendo a su dinamismo y pluralidad.

En términos de distribución geográfica, la población se concentra principalmente en áreas urbanas y suburbanas, con núcleos residenciales y comerciales bien definidos. Sin embargo, también existen

comunidades rurales y semiurbanas en las zonas periféricas, donde la densidad poblacional es menor pero igualmente significativa en términos de identidad y desarrollo comunitario.

3.2.4 Desarrollo Urbano

El desarrollo urbano en la Zona Poniente de Guadalajara ha experimentado un notable crecimiento y transformación en las últimas décadas, impulsado por una combinación de factores económicos, sociales y geográficos. Esta área, que anteriormente estaba compuesta principalmente por zonas rurales y semirrurales, ha experimentado una rápida urbanización debido al aumento de la población, la expansión de la actividad económica y la creciente demanda de vivienda y servicios.

Uno de los principales impulsores del desarrollo urbano en la Zona Poniente ha sido el crecimiento económico y la atracción de inversiones. La proximidad a centros de actividad económica, como el área financiera de Puerta de Hierro y el corredor industrial de Periférico, ha fomentado la construcción de desarrollos comerciales y residenciales de alta gama, así como la expansión de infraestructuras y servicios.

La planificación urbana en la Zona Poniente ha sido fundamental para guiar el crecimiento de manera ordenada y sostenible. La creación de planes maestros y regulaciones urbanas ha permitido la identificación de áreas para el desarrollo residencial, comercial e industrial, así como la preservación de espacios naturales y zonas de conservación ecológica.

El desarrollo de infraestructura también ha sido un aspecto clave del desarrollo urbano en la Zona Poniente. La construcción de nuevas carreteras, avenidas y vías de acceso ha mejorado la conectividad dentro de la región y con otras partes de la ciudad, facilitando el flujo de personas y mercancías. Del mismo modo, la expansión de servicios básicos como agua, electricidad, gas y telecomunicaciones ha sido fundamental para satisfacer las necesidades de una población en crecimiento.

Sin embargo, el desarrollo urbano en la Zona Poniente también ha enfrentado desafíos y críticas. La expansión descontrolada de la mancha urbana ha generado preocupaciones sobre la pérdida de áreas verdes, la fragmentación del hábitat natural y la congestión vehicular. Además, la desigualdad en el acceso a vivienda, servicios y oportunidades económicas ha sido un tema de preocupación para algunos sectores de la población.

3.2.5 Uso de suelo

Dentro de la Zona Poniente, se pueden identificar diferentes categorías de uso de suelo, cada una con sus propias características y restricciones. Algunas de las categorías más comunes incluyen:

Residencial: Esta categoría comprende áreas destinadas principalmente a la construcción de viviendas unifamiliares, multifamiliares o mixtas. Se pueden encontrar diferentes tipos de densidades residenciales, desde zonas de baja densidad con viviendas unifamiliares hasta áreas de alta densidad con edificios de departamentos.

Comercial: Las zonas comerciales están destinadas a la instalación de negocios, tiendas, restaurantes, oficinas y otros establecimientos comerciales. Estas áreas suelen estar ubicadas en torno a corredores viales principales y centros de actividad económica, como Puerta de Hierro y Ciudadela.

Industrial: Las áreas industriales están reservadas para la ubicación de actividades productivas, fábricas, bodegas y centros de distribución. Estas zonas suelen estar alejadas de las áreas residenciales para minimizar posibles conflictos de uso de suelo y mitigar impactos ambientales.

Mixto: En algunas partes de la Zona Poniente, se permite el desarrollo de proyectos mixtos que combinan usos residenciales, comerciales e incluso industriales en un mismo espacio. Estos desarrollos buscan fomentar la integración y diversidad funcional en el tejido urbano.

Además de estas categorías principales, también existen áreas destinadas a usos institucionales, educativos, recreativos, de conservación ecológica y de infraestructura pública, como parques, áreas verdes, escuelas, hospitales y vialidades.

4. Resultados

4.1 San Juan de Abajo

Resultados de Emilia, André y Eduardo, cuidando formato.

4.2 Zona Poniente de Guadalajara

4.2.1 El título que le pongan Yoshiro y Jaime

Poner aquí los resultados Yoshiro y Jaime, cuidando formato.

4.2.2 El título que le pongan Antonio y Fernando

Pongan aquí sus resultados Antonio y Fernando, cuidando formato.

4.2.3 Intervenciones Hidráulicas en las Cuencas de Arroyo Tecolote y Arroyo Garabato, tributarios del Arroyo Seco

Metodología

Modelo Digital de Elevación

Se realizó un MDE del cerro de Bugambilias y también abarcando el territorio de las cuencas de los dos arroyos. Esto se hizo mediante los datos del INEGI de Marco Cartográfico (límites de cartas escala 1: 10,000), se ubicaron los cuadrantes relevantes y se copiaron sus códigos para así poder obtener las imágenes ráster del relieve continental (INEGI). Contando ya con los rásteres del territorio, se utilizó la herramienta Mosaic to new Raster en el programa de ArcGIS Pro.

Delimitación de la Cuenca

Ya teniendo el MDE, se continuó trabajando en ArcGIS Pro y se utilizaron las herramientas: Flow Direction y Flow Accumulation. Con esas dos, se obtiene la 4 hidrología, los cauces, como líneas. Manualmente se selecciona el punto de desfogue y se utiliza: Watershed para generar la cuenca finalmente.

Capa de rugosidad

La capa de rugosidad representa que tan fácil o difícil es que el agua escurra superficialmente sobre una superficie, dependiendo de su composición; las rugosidades pueden variar desde el

concreto que tiene un coeficiente muy bajo de 0.018, hasta un bosque muy denso con uno de 0.3. Para construir esta capa se utilizaron las siguientes variables: Uso de suelo y vegetación INEGI Serie VII, el cual detalla la cobertura de suelo de la zona, de las cuales se utilizaron: Agricultura de temporal anual, Bosque de Encino-Pino, Pastizal Inducido y Vegetación Secundaria 8 Arbustiva de Encino-Pino. Esta capa se combinó con capas que contenían la delimitación de las calles, las manzanas, las construcciones (techos de edificios) y Áreas Verdes, compartidas por parte del equipo del PAP. Además, se construyó una capa delimitando bien las zonas del cauce principal de los arroyos Garabato y Tecolote.

El geoproceso para la construcción de la capa de rugosidad consistió en asignar a la mancha urbana los atributos que eran compatibles con la imagen satelital, y al resto asignarle un uso de suelo según INEGI. Al final, se unieron estas capas con la herramienta “Merge” en ArcGis Pro, y se obtuvo una capa nueva con la cobertura de suelo correspondiente, la cual influye en la modelación de Iber en la velocidad del flujo de agua.

Número de curva

El número de curva es una variable que determina la cantidad de agua que es capaz de infiltrarse en el subsuelo dependiendo la cobertura que tenga, la cual se representa con un número del 0 al 100 donde 0 es que toda el agua escurre y 100 que toda el agua se infiltró. De acuerdo con información de Earth Engine Apps, se consultaron los números de curva a 250m de escala por parte de GCN250m: Global Hydrologic Curve Number Explorer. Aquí, se asignó a cada tipo de uso de suelo (misma capa que la de rugosidad), el número de curva promedio correspondiente para cada uno. Esta capa también se importa al Iber para la determinación automática de pérdidas.

La capa de número de curva y la de rugosidad se exportaron como tipo de archivo “.ascii,” para hacerlos compatibles con la configuración de Iber.

Creación de la Ortofoto del sitio

Para la imagen de fondo de Iber, se descargó una ortofoto de Copernicus del satélite Sentinel-2, y se acotó al límite de la delimitación de las microcuencas Tecolote y Garabato.

Configuración del IBER

La modelación del Iber pretende ser un primer acercamiento a la realidad de la peligrosidad de la zona de interés. Para esto se comenzó con añadir la imagen de fondo, la cual se creó previamente con información del Sentinel-2. Después, se añadió el modelo digital de elevación

tipo terreno, que se importó como formato .txt, con la herramienta RTin de Iber. Estas capas ayudan a ilustrar de manera general la morfometría de la zona de estudio.

Sobre este relieve que se importó en Iber, se añadió la delimitación de las microcuencas como malla, con triángulos formados con la resolución de 1 a 30 9 metros, que optimiza el proceso para generar menos atributos. Sobre esta malla se asignaron las salidas de agua que tendrá cada microcuenca, las cuales son justo la parte más al este de cada una. Después de asignar las dos pérdidas, se usó la herramienta de asignación automática de pérdidas, donde se añadió la capa de número de curva, la cual representa las pérdidas por infiltración de las microcuencas. Asimismo, se añadió la rugosidad, donde a cada tipo de suelo, Iber le asignó un coeficiente de rugosidad.

Otro atributo agregado al Iber fueron la ubicación y tamaño de los puentes a lo largo de los arroyos principales de ambas microcuencas, ya que en estas zonas el programa podría interpretarlas como saltos hidráulicos, lo cual modificaría el resultado esperado. Estos se añadieron como alcantarillas en el Iber, para indicar que el flujo del agua entraba y salía debajo de los puentes sin salirse a la calle.

Hietograma

La creación de estos se basó en el artículo de “Incertidumbre de los modelos hidrológicos” de Diego Rojas Sigala. A continuación, se anexa la tabla final con la serie de cálculos para las simulaciones; en el caso de este proyecto, se trabajó únicamente con el tiempo de retorno de 25 años.

Análisis Topográfico

En la primera etapa de construcción del modelo se delimitaron las microcuencas del Tecolote y Garabato de manera que se hiciera una distinción entre el agua que aporta cada uno al arroyo seco. En la figura 10 se puede observar que la parte alta de las microcuencas corresponden al Bosque de la Primavera y al cerro de Bugambilia, las cuales son zonas donde el agua sigue limpia y puede ser aprovechada para infiltración. La creación de esta red hidrográfica a pequeña escala se explicó en la metodología, y puede ser replicable en casi cualquier zona donde se

cuente con un modelo digital de elevación.

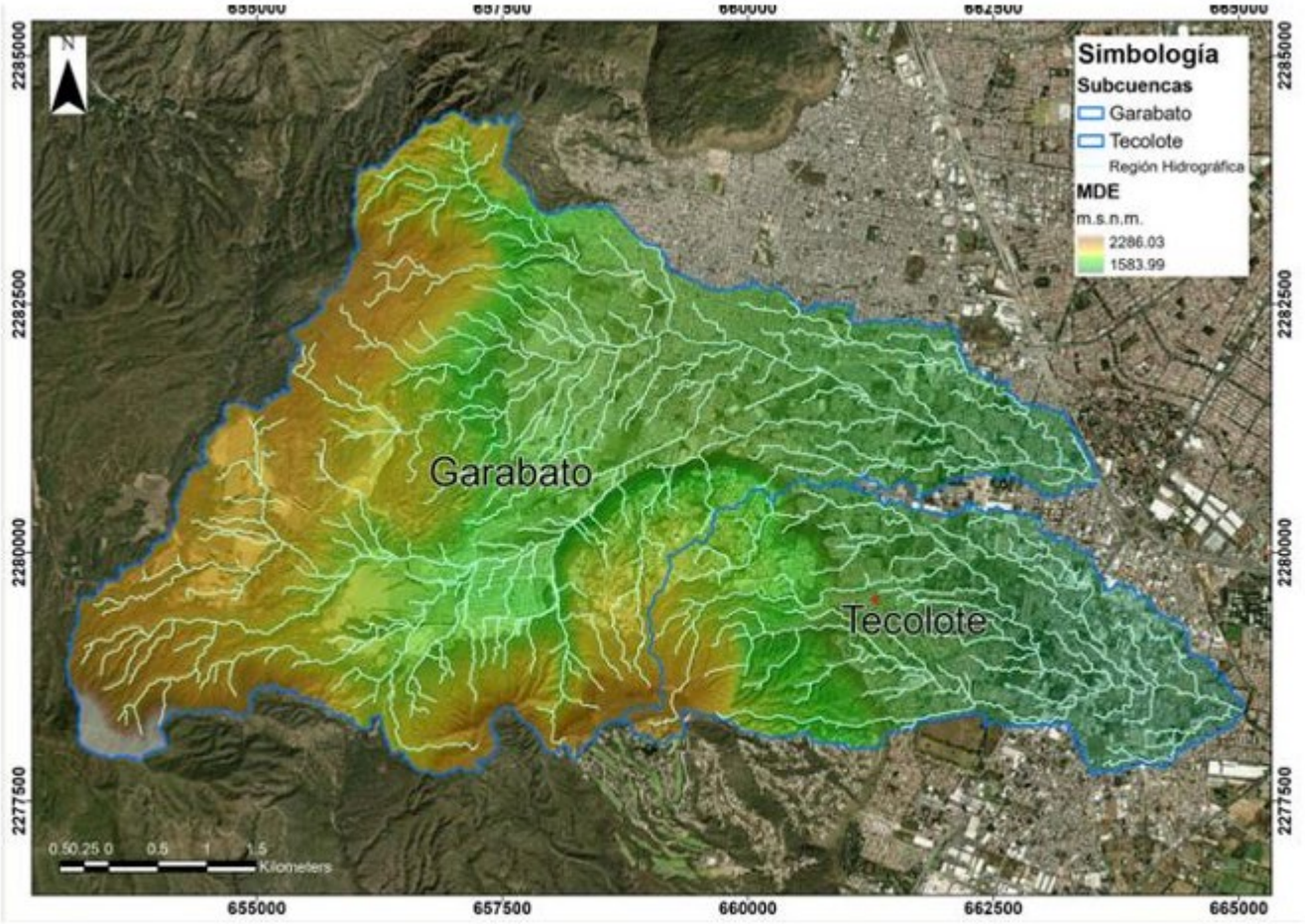


Figura 10: Delimitación microcuencas Garabato y Tecolote

Análisis de Tipo y Uso de Suelo

Un paso muy importante de este proyecto fue la asignación correcta de rugosidades a cada zona dentro de la delimitación de las microcuencas; a pesar de que Iber agrega automáticamente las rugosidades, es necesario tenerlas detalladas en una capa geoespacial. La creación de dicha capa fue la parte que más tiempo tomó del proyecto, debido a que los insumos no llegaban al nivel de detalle deseado, por lo que se tuvo que procesar dicha información para generarla.

En la figura 11 se observa detalladamente cada tipo y uso de suelo, resaltando zonas como el cerro de Bugambilias donde existe una mancha urbana rodeada de bosque, con zonas de interés que podrían intervenirse, además se observan detalladamente las calles, que son la principal vía de escurrimiento del agua de lluvia. Además, se identifican varias áreas verdes

dentro de la ciudad, donde no solo el agua correrá más lento, sino que también ayudan a definir posibles sitios de intervención para la infraestructura.

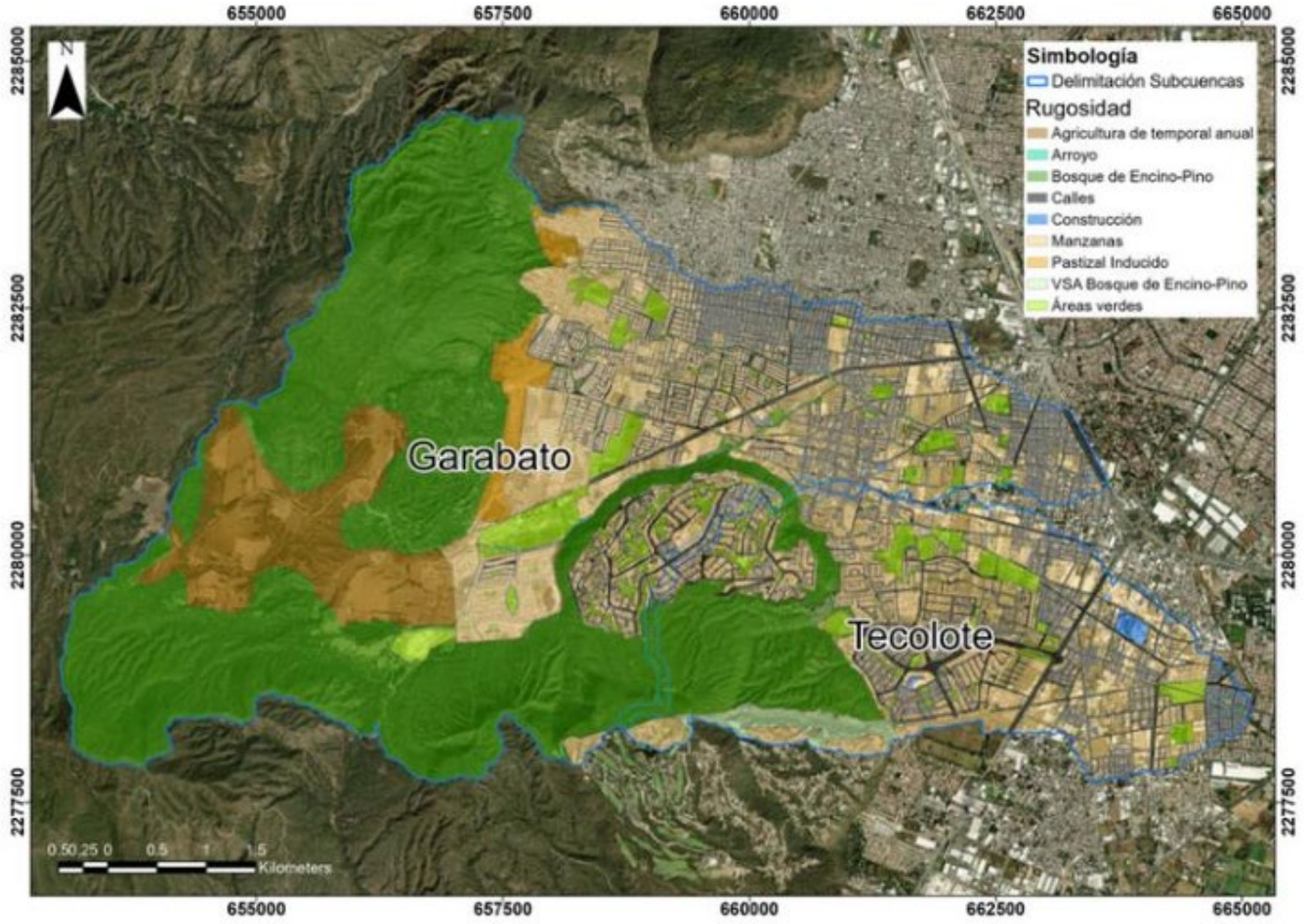
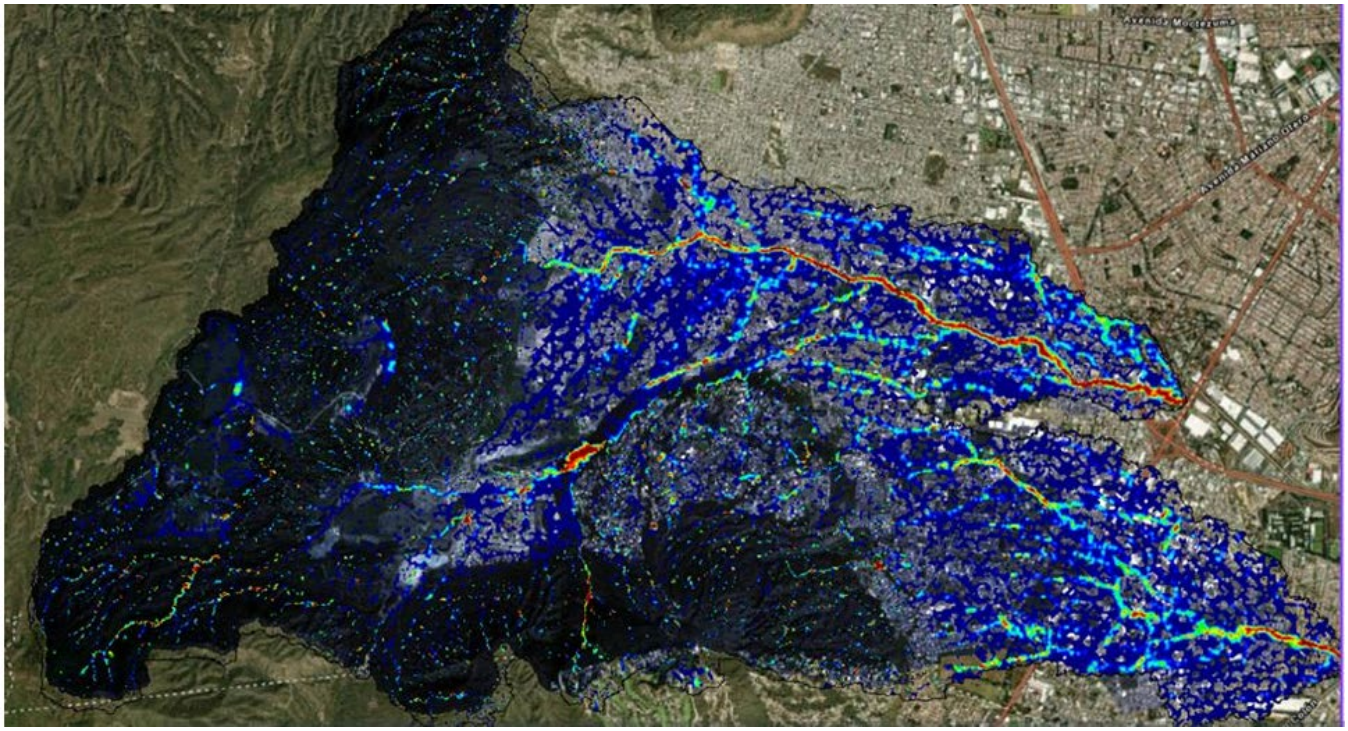


Figura 11: Asignación de rugosidad por tipo de suelo.

Modelación de tormenta TR25 en Iber

La modelación en Iber se realizó solamente en un escenario de 4 horas y un tiempo de retorno de 25. En la figura 12 se puede observar la peligrosidad resultada de este escenario. Se destacan zonas como los arroyos del Garabato, el cual está muy bien definido y con alta peligrosidad, lo cual es lógico por la velocidad y calado del agua dentro de él, sin embargo, también influye en las zonas que lo bordean ya que en lluvias muy fuertes se puede desbordar. Además, en la zona media entre el cerro de Bugambilias y el Bosque de la Primavera se observa un foco rojo donde convergen escurrimientos de la zona alta. Este punto en particular se analizó con detalle ya que ahí se propone la construcción de un parque lineal, el cual corra a lo largo de las faldas del cerro de Bugambilias, y ayude disipar la velocidad de los cauces, para poder

infiltrarse en el subsuelo. Esto no solo aumentaría la recarga de acuíferos, sino que reduciría el riesgo en la zona baja las microcuencas Garabato y Tecolote.



Otra zona de alta relevancia, así como de alta peligrosidad, es la zona baja del arroyo Tecolote, donde confluyen todos los cauces de esta microcuenca, lo cual genera inundaciones de las que ya se tienen reporte. Esta zona también resaltó por la necesidad de intervención con infraestructura que reduzca el desbordamiento natural del arroyo, y capte agua justo antes de su conexión con el arroyo Seco.

Reflexiones PAP

En este ejercicio, deberán redactar entre media y una página sobre los aprendizajes y reflexiones que han obtenido al participar en el proyecto. Pueden abordar aspectos sociales, como el trabajo en equipo o el impacto en las comunidades; ambientales, como la relación del proyecto con la sostenibilidad o la gestión de recursos; y profesionales, como las habilidades adquiridas o los retos enfrentados. La idea es que reflexionen de manera personal y crítica sobre cómo esta experiencia ha contribuido a su formación integral.

Avalos Loaiza Antonio:

Avalos Loaiza Fernando:

Azano Carrillo Yoshiro Susumu:

Camacho Nolazco Luis Angel:

Este semestre ha sido transformador para mí como estudiante de arquitectura, no solo por los conocimientos técnicos adquiridos, sino también por la perspectiva que he ganado sobre los problemas reales que enfrentan las comunidades en nuestra ciudad. Aprender a usar un programa como IBER, que permite modelar el flujo del agua en una zona, ha sido una experiencia enriquecedora. Este software no solo proporciona datos precisos sobre zonas de alta peligrosidad, sino que también nos ayuda a comprender cómo las características del terreno y las cuencas contribuyen a inundaciones y desbordamientos, problemas que afectan gravemente a miles de personas cada año.

Trabajar en el PAP me permitió descubrir la magnitud de la problemática en las cuencas Garabato y Tecolote. Antes de este proyecto, nunca habría imaginado que tantas personas en nuestra ciudad viven en constante riesgo de inundaciones, perdiendo sus pertenencias, su seguridad, e incluso enfrentándose a desplazamientos.

Este semestre me puso en sus zapatos, llevándome a reflexionar profundamente sobre el impacto que nuestras intervenciones arquitectónicas y urbanísticas pueden tener en sus vidas. Este aprendizaje me hizo darme cuenta de la responsabilidad social que tenemos como futuros arquitectos. Entender la realidad de estas comunidades me ha motivado a buscar soluciones que no solo respondan a problemas técnicos, sino que también consideren las necesidades humanas de quienes viven estos desafíos año tras año. Estoy convencido de que proyectos como este PAP son esenciales para formar profesionales comprometidos con la mejora de nuestras ciudades y el bienestar de sus habitantes.

Galindo Namur Sebastián:

Para este PAP tuve que poner en uso todas mis habilidades en cuanto a sistemas de información geográfica, para generar los insumos que el programa de modelación de inundaciones necesitaba para correr. Este proyecto fue particularmente importante debido a que los resultados que obtuviéramos nos iban a servir a nosotros, pero, sobre todo, a actores involucrados en la toma de decisiones en el tema de infraestructura pública y gestión hídrica; así como a los habitantes de la zona donde se podrían implementar estas medidas de mitigación de inundaciones.

En el aspecto ambiental creo que el enfoque general de mi proyecto tiene muchísimo sentido, siendo el de cero escurrimientos. De esta manera, el objetivo principal era el de infiltrar la mayor cantidad de agua aguas arriba de las microcuencas, para que las zonas donde vive más gente (aguas abajo) no sufrieran inundaciones ni estuvieran en peligro. Esto me ayudó a comprender que las soluciones ambientales siempre se relacionan con soluciones sociales, y en esta propuesta de infraestructura, considero que es necesario que la universidad colabore con los ciudadanos de la zona y, asimismo, con políticos y secretarias de orden público para llevarse a cabo.

En cuanto a aprendizajes técnicos, puedo decir que mejoré mucho mi comprensión del software de modelación de inundaciones de Iber, ya que al principio no lo dominé bien, pero al final fue una pieza clave para el análisis de resultados del proyecto. Aprendí a asignar perdidas por infiltración, simular lluvias, asignar rugosidad específica a cada uso de suelo de la zona de estudio, y en general, logré correr un modelo de peligrosidad de inundación en las microcuencas del Garabato y Tecolote.

Creo que el reto más grande de este PAP fue el aterrizar las propuestas a algo que se pudiera modelar, ya que considero que tengo poca experiencia en los temas constructivos. Sin embargo, creo que pude compensar a falta de conocimiento en ese tema con mi conocimiento sobre hidrología, por lo que pude detallar bien una metodología que funcionaría para cualquier microcuenca. Además, considero que entendí de primera mano lo serio y respaldado que tiene que ser un trabajo, para que pueda ser tomado en cuenta por instituciones públicas para su implementación.

Maliachi Alvarez André:

Novoa Carrera Eduardo Alfredo:

Soriano Dorta Luis Jaime:

A lo largo del desarrollo de este proyecto, me pude dar cuenta la importancia de abordar problemas desde un enfoque multidisciplinario, donde colaboren profesionales de distintos campos de aplicación profesional y que su conocimiento y experiencia contribuyan a guiar el camino hacia generar una propuesta de solución; además de que su retroalimentación se vuelve valiosa para entender cómo se ve la propuesta fuera de los ojos de quienes la proponen y como tratar de dirigirlo a las personas correctas,

que lo puedan entender de una manera fácil, comprendan la validez y funcionalidad, y sobre todo, lograr un impacto que invite a más personas a contribuir y sumarse al proyecto.

A nivel personal, este proyecto me ayudó a conocer herramientas que eran nuevas para mí y que fue necesario realizar trabajo de investigación independiente, aparte de las asesorías con los tutores e invitados, y que ayuda mucho tener curiosidad y empezar a interactuar con los programas y analizar lo que hace o las respuestas que otorga; ya que al final es una herramienta de apoyo, pero es labor del ingeniero de interpretar, analizar y saber qué resultados otorga y también cuáles son las limitantes.

A nivel profesional, me pude dar cuenta como hay muchas áreas de la ingeniería que aún no son exploradas y que existe poca información disponible o de acceso limitado; y que, al trabajar en algo nuevo, puede llegar un sentimiento de frustración en el que sientes que no avanzas o no logras ver el alcance que puede llegar a tener el desarrollo de metodologías o herramientas nuevas; sin embargo, cuando vas ligando el trabajo que se ha realizado desde el inicio de este PAP con la nueva información que se genera semestre a semestre; todo va cobrando sentido y encaminándose hacia una solución integral.

Considero que este PAP es de mucha importancia y pretende apoyar en la solución al grave problema del agua y como conscientizar a la gente, compañeros profesionales y actores gubernamentales en involucrarse, darle la debida importancia y poder dar empuje a las distintas soluciones propuestas.

Villalobos Romero Emilia Carolina:

Yuen Gutiérrez Eileen Sofia

Referencias

Referencias Marco Teórico

Abellán, A. (2016). *Áreas de biorretención*. Obtenido de SuD Sostenible: http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/areas-de-biorretencion/

Agrawal, A., Pandey, R. S., & Sharma, B. (2010). Water Pollution with Special Reference to Pesticide Contamination in India. *Journal of Water Resource and Protection, 2*, 432-448. doi:10.4236/jwarp.2010.25050

Alcamo, J., Henrichs, T., & Rösch, T. (febrero de 2000). *World Water in 2025.* Obtenido de University of Kassel: http://www.env-edu.gr/Documents/World%20Water%20in%202025.pdf

Arquitectura y empresa. (2021). *Techos Verdes*. Obtenido de Arquitectura y Empresa: https://arquitecturayempresa.es/noticia/techos-verdes

Artmann, M. (2014). *ssessment of Soil Sealing Management Responses, Strategies, and Targets Toward Ecologically Sustainable Urban Land Use Management.* Obtenido de SpringerLink: https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-014-0511-1

Auge, M. (2006). *Agua subterránea, deterioro de calidad y reserva.* Buenos Aires, Argentina: Edición del Autor. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/15908/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Auge, M. (2007). *Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Ciencias Geológicas.* Obtenido de AGUA FUENTE DE VIDA: https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/05/Agua-fuente-de-vida.pdf

Ayuntamiento de Zapopan. (2020). *Ayuntamiento de Zapopan.* Obtenido de Estudio hidrológico detallado del municipio de Zapopan: https://servicios.zapopan.gob.mx:8000/wwwportal/publicfiles/2020-07/Gaceta%20Vol.%20XXVII%20No.%2040%20TIII.pdf

Biswas, A. K. (June de 2006). Water Management for Major Urban Centers. *International Journal of Water Resource Development, 22*(2), 183-197.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez Cendón, E., . . . Coll , A. (19 de Noviembre de 2012). *Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos.*

Obtenido de ELSEVIER España: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131512000454#:~:text=Iber%20es%20un%20modelo%20matem%C3%A1tico,Compostela)%2C%20del%20Instituto%20Flumen%20(

Bourguet, L. (1971). INVENTAIRE INTERNATIONAL DES AMENAGEMENTSD'ALIMENTATION ARTIFICIELLE / DEPOUILLEMENTET SYNTHESE DES REPONSES. International Association of Scientific Hydrology. .

Campos, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico* (3rd ed.). San Luis Potosí: Editorial Universitaria Potosina.

Castillo, J., & Carrasco, A. (2019). *Efecto del agua de mezclado proveniente del subsuelo (nivel freático) y mar en la resistencia a la compresión del concreto. .* Obtenido de Universidad Nacional del Trujillo: https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/12355/Castillo%20D%c3%adaz%2c%20Jhordan%20Martin.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Castro, D., Rodríguez, J., Rodríguez, J., & Ballester, F. (2005). Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). *Interciencia*, 255-260.

CEA. (2011). *GUADALAJARA.* Obtenido de Comisión Estatal del Agua de Jalisco: https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/municipios/guadalajara

Centro Virtual de Información del Agua. (2017). *Visión General del Agua en México*. Obtenido de AGUA.ORG.MX: https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/#:~:text=Anualmente%20M%C3%A9xico%20recibe%20aproximadamente%201,natural%20y%20recarga%20los%20acu%C3%ADferos.

Chahar, B., Graillot, D., & Gaur, S. (2012). Storm-Water Management through Infiltration Trenches. *Irrigation and Drainage Engineering*, 274-281.

Chávez, V. (2021). *Incendios en La Primavera dejan riesgos de inundaciones y lodazales.* Obtenido de El Occidental: https://www.eloccidental.com.mx/local/noticias-incendios-en-el-bosque-de-la-primavera-dejan-riesgos-de-inundaciones-y-lodazales-6609132.html

Clausen, M. E. (2005). *A Field Evaluation of Rain Garden Flow and Pollutant Treatment. Water Air Soil Pollut*. Obtenido de A Field Evaluation of Rain Garden Flow and Pollutant Treatment. Water Air Soil Pollut: https://doi.org/10.1007/s11270-005-8266-8

Comisión Estatal de Agua y Saneamiento. (2007). Manual Técnico del Sistema Hidraúlico de Alcantarillado Sanitario y Pluvial . Guadalajara , Jalisco, México .

Comisión Estatal del Agua. (2012). *Programa Especial 21.Administración y Uso del Agua.* Jalisco.

CONAGUA. (2015). *PMPMS para Usuarios Urbanos de Agua Potable y Saneamiento.* Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2018). *Estadisticas del Agua en México.* SEMARNAT.

CONAGUA. (22 de August de 2019). *Sistema de Información Hidrológica (SIH)*. Obtenido de https://sih.conagua.gob.mx/

CONAGUA. (2020). *Acuíferos Jalisco*. Obtenido de Disponibilidad Aguas Subterráneas Jalisco: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/jalisco/jalisco.html

CONAGUA. (1 de Marzo de 2021). *Calidad del agua en México*. Obtenido de https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua

CONAGUA. (March de 2021). *Calidad del Agua en México*. Obtenido de https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua

Conesa, C., & García, R. (2011). Factores e índices de peligrosidad de las aguas de avenida en cruces de carreteras con ramblas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 195-218.

Craig, J. R., Vaughan, D. J., & Skinner, B. J. (2007). *Recursos de la Tierra.* Madrid: Pearson prentice hall.

Custodio, E. (1996). *HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA. TOMO I.* España: Editorial Omega.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). Hidrología Subterránea. d. Omega.

D´Urquiza, A. (2020). *Modelación Matemática de la Calidad del Agua en Cuerpos Hidrológicos Superficiales.* México: ITESO.

D´Urquiza, A. (2020). *Modelación Matemática de la Calidad del Agua en cuerpos Hidrolpogicos Superfciales.* México: ITESO.

Dávila, R. A., & de León, H. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 63*(3), 463-477.

De la Cruz, U., & Gleason, J. (2018). *Beneficios económicos de implementar un sistema de captación de agua de lluvia en la Universidad de Guadalajara en la Universidad de Guadalajara.* Obtenido de Vivienda Y Comunidades Sustentables, (4), 11–20: https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i4.63

del Puerto, J. A., & Valdés, Y. M. (2021). Peligros ambientales y antrópicos sobre las aguas de la Comuna de Ondjiva, Angola. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 42*(3), 14-28.

Díaz, R. E., Bravo, L. C., Alatorre, L. C., & Sánchez, E. (2013). Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *Investigaciones Geográficas, 82*, págs. 93-103.

Dietz, M. E., & Clausen, J. C. (2005). A Field Evaluation of Rain Garden Flow and Pollutant Treatment. *Water, Air, and Soil Pollution, 167*, 123–138. doi:https://doi.org/10.1007/s11270-005-8266-8

ECOL. (1997). *NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.* Diario Oficial de la Federación.

El Informador. (2019). *El SIAPA repara 10 hundimientos al día*. Obtenido de El Informador: https://www.informador.mx/El-SIAPA-repara-10-hundimientos-al-dia--l201906060001.html

El Informador. (10 de marzo de 2021). *Sin fecha de solución, Gobierno responde a quejas por falta de agua en Guadalajara*. Obtenido de El Informador: https://www.informador.mx/jalisco/Sin-fecha-clara-responden-a-quejas-por-la-falta-de-agua-20210310-0021.html

Espín, P., García, J., & Castillo, L. (13 de Junio de 2016). Obtenido de Estudio de los flujos de contaminación transportados por un sistema de saneamiento y drenaje unitario en tiempo de lluvia para la ciudad de Murcia: https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis_pfc/BN2.pdf

Feingold, D., Koop, S., & van Leeuwen, K. (2018). The City Blueprint Approach: Urban Water Management and Governance in Cities in the U.S. *Environmental Management Springer*, 9-23.

Félix, C. P. (2005). *Riesgo Causado por Inundaciones Pluviales en la Zona de Plaza del Sol.* Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.

Fernández, Á. E., García, M., & Villarroya, F. (2005). Inventario de Experiencias de Recarga Artificial de Acuíferos en el Mundo. *Tecnología y Desarrollo, III*.

Fernández, A., & Du Mortier, M. (s.f). *Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Buenos Aires.* Obtenido de Evaluación de la

condición del agua para consumo humano en Latinoamérica: https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/01_Capitulo_01.pdf

Fletcher, T., Shuster, W., Hunt, W., Richard, A., 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,, 12*(7), 525-542. doi:DOI:10.1080/1573062X.2014.916314

Garzón, A. G. (2020). *COMEII*. Obtenido de Caracterización de una cuenca: principios y métodos : https://www.riego.mx/files/webinars/webinar04.pdf

GEOEX & SIAPA. (2004). Capítulo III. Geología y geofísica del área de estudio. En *Geohidrológico Atemajac-Toluquilla* (págs. III.1-III.34). SIAPA.

GEOEX & SIAPA. (2004). *Capítulo V Hidrología del Área de Estudio.* SIAPA.

GEOEX & SIAPA. (2004). Capítulo XII. Diseño e instalación de un sistema de monitoreo del acuífero. En *Geohidrológico Atemajac-Toluquilla* (págs. XII.1-XII.9). SIAPA.

GEOEX-SIAPA. (2003). Diseño e instalación de un sistema de monitoreo del acuífero. En *Geohidrológico Atemajac-Toluquilla* (págs. 1-9).

Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción+ limpia, 7*(2), 52-73.

GisGeography. (2022). *Sentinel 2 Bands and Combinations*. Obtenido de Sentinel 2 Bands and Combinations - GIS Geography

Gleason, J. (2011). *Hacia una gestión sustentable del agua en la zona conurbada de Guadalajara.* Obtenido de Revista mexicana de ciencias agrícolas, 2(spe1), 113-126: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000700009&lng=es&tlng=es.

Global Water Partnertship. (2013). *GWP in Action 2013 Annual Report*. Obtenido de GWP in Action 2013 Annual Report: https://issuu.com/gwp-publ/docs/gwp_in_action_2013_annual_report

Gobierno de Zapopan. (2020). *DIRECCIÓN DE OBRAS PÚBLICAS E INFRAESTRUCTURA*. Obtenido de Gobierno de Zapopan: https://www.zapopan.gob.mx/wp-content/uploads/2020/08/INVITACIONES_011-20_Censurado.pdf

Gómez Ugalde, S. G., Mora-Flores, J. S., García Salazar, J. A., & Valdivia, A. R. (2012). Demanda de agua para uso residencial y comercial. *Scielo*, 337-342.

Gómez, E. (5 de septiembre de 2021). *Desbordamiento de arroyo "El Seco" deja 52 casas dañadas en Zapopan*. Obtenido de El Informador: https://www.informador.mx/jalisco/Lluvias-en-Zapopan-Desbordamiento-de-arroyo-El-Seco-deja-52-casas-danadas-20210905-0096.html

González de Vallejo, L. F. (2002). Ingeniería Geológica. Ed. Pearson Educación.

González, J. A. (1974). El sistema de colectores de la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Trabajos presentados para el Gobierno del Estado de Jalisco. Departamento Obras públicas* , 34.

González, P. (2017). *Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna*. Obtenido de Newsletter (camara.cl)

Gorostegui, M. A. (julio de 2021). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, canales y puertos* . Obtenido de Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, canales y puertos : https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/22166/TFG%20Maria%20Antonia%20Arnaiz%20Gorostegui.pdf?sequence=1

GreenForestMéxico. (2018). *Green Forest México* . Obtenido de Geocostales : https://www.greenforestmexico.com/geocostales

Grigg, N. S. (2011). Water Governance: From Ideals to Effective Strategies. *Water International, 36*(7), 799-811. doi:https://doi.org/10.1080/02508060.2011.617671

Henríquez, C., & Azócar, G. (2006). *Revista de geografía Norte Grande, (36), 61-74.* Obtenido de Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile.: https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022006000200004

Hernández-Antonio, A., Mahlknecht, J., Tamez-Meléndez, C., Ramos-Leal, J., Ramírez-Orozco, A., Parra, R., . . . Eastoe, C. J. (2015). Groundwater flow processes and mixing in active volcanic systems: the case of Guadalajara (Mexico). *Hydrology and Earth System Sciences, 19*, 3937–3950. doi:10.5194/hess-19-3937-2015

Hidrología Sostenible. (s.f.). *Sustainable Urban Drainage Systems – SUDS*. Obtenido de Hidrología Sostenible Web Site: http://www.hidrologiasostenible.com/sustainable-urban-drainage-systems-suds/

IGRAC. (2021). *MAR Portal*. Obtenido de https://ggis.un-igrac.org/view/marportal

INECC. (2014). *Ánalisis de la Relación entre Precipitación Máxima Anual, el Cambio de Uso de Suelo y la Respuesta Hidrológica en Cuencas Costeras del Pacífico Tropical Mexicano.* Ciudad de México: SEMARNAT.

INEGI. (agosto de 2010). *Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica* . Obtenido de Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica : http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/PDF/Doc.pdf

INEGI. (2020). *Área Metropolitana de Guadalajara*. Obtenido de https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/guadalajara

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua . (2019). *gob.mx*. Obtenido de Aguas Subterráneas: https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterraneas

Jaafar, H. H., Ahmad, F. A., & El Beyrouthy, N. (2019). *GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design.* (S. Data, Ed.) Obtenido de https://www.nature.com/articles/s41597-019-0155-x

Jennings, A. A., Adeel, A. A., Hopkins, A., Litofsky, A. L., & Wellstead, S. W. (2013). Rain Barrel–Urban Garden Stormwater Management Performance. *Journal of Environmental Engineering, 139*(5), 757-765. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000663

Jiang, Y., Zevenbergen, C., & Ma, Y. (2018). Urban Pluvial Flooding and Stormwater Management: A Contemporary Review of China's Challanges and "Sponge Cities" Strategy. *Environmental Science and Policy*, págs. 132-143.

Kerkez, B., Gruden, C., Lewis, M., Montestruque, L., Quigley, M., Wong, B., . . . Pak, C. (2016). Smarter Stormwater Systems. *Environmental Science & Technology*.

Kuroiwa, J. M. (2002). *Daños a Infraestructuras por Erosión de Cauces y Riberas.* Departamento Académico de Hidráulica e Hidrología. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

KWR. (2020). *City Blueprint*. Obtenido de Water Research Institute: https://www.kwrwater.nl/en/tools-producten/city-blueprint/

Lagos, R. H. (2002). *Línea base de la calidad del agua subterránea en el valle del Yeguare, Honduras.* ZAMORANO. Obtenido de https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2270/1/IAD-2002-T024.PDF

Lekshmiprasad, S., & Mophin, K. (2017). Water Quality Assessmentof Ashtamudi Lake Using Nsfwqi. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 7*, 130-135.

Li, L., Vrieling, A., Skidmore, A., Wang, T., Muñoz, A., & Turak, E. (2015). Evaluation of MODIS Spectral Indices for Monitoring Hydrological Dynamics of a Small Seasonally-Flooded Wetland in Southern Spain. *Werlands Springer*, 851-864.

López, M. (2015). *Riesgo en el piedemonte del gran Mendoza por avance urbano. Argentina*. Obtenido de iempo Y Espacio, (21), 47–57: http://revistas.ubiobio.cl/index.php/TYE/article/view/1739

Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R., & Reyes-Ortigoza, A. L. (2012). Metales Pesados Totales y As en el Agua para Riego de Puebla y Veracruz. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 28*(1), 39-48.

Marcia, S. (2010). *La escasez de Agua en el mundo y la importancia del Acuífero Guaraní para Sudamérica: Relación abundancia- escasez.* Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/44525270/La_escasez_de_Agua_en_el_mundo-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1650868461&Signature=TSFkK3HPCxjQ3W-i5c9Fi100qhF~eF9uknr40YEUnbMuNOAACimxnGflS5TNcuqhZGtC5IkGmV2bbEMIdMTbTlRglxriPwX~NAFdiLCAHmwPp-Fv~IFBsC4P6mGMY

María Paula, C. C., & Jorge, M. X. (2012). *Manual de Agua Subterránea.* Montevideo, Uruguay: Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Obtenido de https://aquabook.irrigacion.gov.ar/files/upload/contenidos/10_2/Manual-de-agua-subterranea-Uruguay.pdf

Maryland Department of the Environment. (2009). Chapter 5 Environmental Site Design. Maryland: Maryland Department of the Environment.

Melendez, I. d. (06 de 09 de 2021). *Vecinos resienten los embates del Arroyo Seco… por tercera ocasión*. Obtenido de udegtv.com/noticias: https://udgtv.com/noticias/vecinos-resienten-embates-del-arroyo-seco-tercera-ocasion/

Miao, S., Chen, F., Li, Q., Fan, & S. (2011). *Impacts of Urban Processes and Urbanization on Summer Precipitation: A Case Study of Heavy Rainfall in Beijing on 1 August 2006.* Obtenido de American Meteorological Society: https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/50/4/2010jamc2513.1.xml

Mijangos, M. A., González, R., Bravo, L. A., Alba, M., & Evans, B. M. (2015). ESTUDIO DE FUENTES DE CONTAMINACIÓN PUNTUAL Y DIFUSA EN LAS SUBCUENCAS DEL

LAGO DE TUXPAN Y RÍO TOMATAL, IGUALA, GRO., MÉXICO. *Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México-UACJ*.

Milenio. (17 de Diciembre de 2017). *Hundimiento del Valle de México es crítico: especialistas*. Obtenido de Milenio: https://www.milenio.com/estados/hundimiento-del-valle-de-mexico-es-critico-especialistas

Molano, L. I. (2016). SISTEMAS DE CONTROL DE ESCORRENTÍA DE AGUAS LLUVIAS: TECHOS VERDES VS. TANQUES DOMICILIARIOS DE ALMACENAMIENTO PARA EL CONTROL DE LA ESCORRENTÍA PLUVIAL EN CIUDADES. Bogotá, Colombia.

Momparlet, S. P. (2008). *Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible (SuDS) Expo Zaragoza*. Obtenido de Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible (SuDS) Expo Zaragoza: http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/33S8-P3-Sara%20PeralesACC.pdf

Morán-Ramírez, J., Ledesma-Ruiz, R., Mahlknecht, J., & Ramos-Leal, J. A. (2016). Rockewater Interactions and Pollution Processes in the Volcanic Aquifer System of Guadalajara, Mexico, Using Inverse Geochemical Modeling. *Applied Geochemistry, 68*, 79-94. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.03.008

Narváez, E. J. (2021). *Manual metodológico de monitoreo para la evaluación de la calidad del agua utilizando el Índice de calidad del agua (ICA) en los jagüeyes del municipio de sabanas de san ángel (magdalena).* Magdalena: Universidad de Magdalena. Obtenido de http://repositorio.unimagdalena.edu.co/jspui/handle/123456789/5903

NASA. (2020). *MODIS*. Obtenido de https://modis.gsfc.nasa.gov/about/

New York State Department of Health. (2017). *Coliform Bacteria in Drinking Water Supplies*. Obtenido de New York State: https://www.health.ny.gov/environmental/water/drinking/coliform_bacteria.htm

Nistor, M. M., Rahardjo, H., Satyanaga, A., Hao, K. Z., Xiaosheng, Q., & Sham, A. W. (March de 2020). Investigation of groundwater table distribution using borehole piezometer data interpolation: Case study of Singapore. *Engineering Geology, 271*. doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105590

Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R., & Doshi, H. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, functions and services. *BioScience*, 823-833.

OCDE. (2018). *Marco de Indicadores de Gobernanza del Agua de la OCDE.* París.

Ogazon, V. C. (25 de 07 de 2021). *Se desborda arroyo en Zapopan y causa daños en siete colonias*. Obtenido de udgtv.com/noticias: https://udgtv.com/noticias/se-desborda-en-arroyo-zapopan-causa-danos-siete-colonias/#:~:text=Una%20fuerte%20tormenta%20en%20los,Zapopan%20de%20Respuesta%20a%20Emergencias%E2%80%9D

Ojeda, C. G. (2016). RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS (Managed Aquifer Recharge). La Serena, Chile.

Oki, T., Entekhabi, D., & Ives, T. (2020). *Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Meguro, Tokyo, Japan.* Obtenido de The Global Water Cycle: https://www.researchgate.net/profile/T-Harrold/publication/260072736_The_global_water_cycle/links/5f1798f4299bf1720d58d0eb/The-global-water-cycle.pdf

ONU. (2012). *Guía ciudadana para la participación incluyente en la gestión del agua.* Ciudad de México.

Organización Meteorológica Mundial. (1994). *Guía de Prácticas Hidrológicas* (5 ed.).

Orozco, M. (15 de July de 2020). Fuerte Lluvia Deja Inundaciones en Plaza del Sol en Guadalajara. *Debate*. Obtenido de https://www.debate.com.mx/guadalajara/Reportan-inundacion-por-lluvias-en-Plaza-del-Sol-en-Guadalajara-20200715-0251.html

Palacios, D. (2017). *Universidad de Guadalajara* . Obtenido de ZMG sobrepasa demanda de agua : https://www.udg.mx/es/noticia/zmg-sobrepasa-demanda-de-agua#:~:text=De%20acuerdo%20con%20datos%20de,y%20aguas%20de%20la%20superficie.

Palansooriya, K. N., Yang, Y., Tsang, Y. F., Sarkar, B., Hou, D., Cao, X., . . . Ok, Y. S. (2019). Occurrence of contaminants in drinking water sources and the potential of biochar for water quality improvement: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1-63. doi:https://doi.org./10.1080/10643389.2019.1629803

Palma, A., Mendoza, A., Cruickshank, C., Villarreal, F., Salas, M., & Val , R. (2014). *Inventario de la Recarga Artificial en México.* Puerto Vallarta: XXIII Congreso Nacional de Hidráulica.

Paus, K., & Braskerud, B. (2014). Suggestions for Designing and Constructing Bioretention Cells for a Nordic Climate. *Water Management and Research*, 139-150.

Peña, C., & Lara, J. (20 de Noviembre de 2012). Obtenido de Tratamiento de aguas de escorrentía mediante humedales artificiales: Estado del arte: https://www.redalyc.org/pdf/911/91126903003.pdf

Perevochtchikova, M. (2009). La Situación Actual del Sistema de Monitoreo Ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, págs. 513-547.

Piguave-Reyes, J. M., Castellano-González, M. J., Macías-Avia, A. M., Vite-Solórzano, F. A., Ponce-Pibaque, M. D., & Ávila-Ávila, J. A. (2019). Calidad microbiológica del agua subterránea como riesgo epidemiológico en la producción de enfermedad diarreica infantil. Revisión Sistemática. *Kasmera, 47*(2), 153-173. doi:https://doi.org/10.5281/zenodo.3556409

Porse, E. C. (2013). Stormwater Governance and Future Cities. *Water, 5*(1), 29-52. doi:10.3390/w5010029

Press, F., & Siever, R. (2001). UNDERSTANDING EARTH. FREEMAN AND COMPANY.

Rascón, L., & Jiménez, A. (2001). *Investigaciones geográficas, (45), 24-38.* Obtenido de Alteración del ciclo hidrológico en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma por la transferencia de agua a la Ciudad de México. : http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112001000200003&lng=es&tlng=es.

Reguillo, R. (1998). *Alteridades, 8(15),35-44.* Obtenido de Semantizarás el territorio: los vecinos de Analco y las explosiones de 1992 en Guadalajara: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74745550004

Rizo, L. D. (2017). *Consideraciones sobre la Calidad del Agua del Río Santiago (México) y Cartografía de Vulnerabilidad a la Contaminación de Acuíferos de su Cuenca, para una Adecuada Gestión y Planificación Hidrológica.* Málaga: Universidad de Málaga.

Rodríguez, J., Rodríguez, J., Ballester, F., & Castro, D. (2005). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)*. Obtenido de Interciencia, 30(5),255-260.: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33910403

Rojas, D., & González, M. (2015). *Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México.* Obtenido de SciELO: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382015000200006&script=sci_arttext&tlng=pt

Román, J. M. (2015). *Telemetría de Estación Meteorológica.* Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Rus Copernicus. (2017). *Burned Area Mapping with Sentinel-2 using snap.* Obtenido de HAZA02_BurnedArea_Portugal_Tutorial.pdf (rus-copernicus.eu)

Sachs, J. D. (2015). *The Age of Sustainable Development.* New York: Columbia University Press.

Salas, C., Coy, D., Acuña, K., Páez, L., & Upegui, E. (2019). *Ambiente y Desarrollo, 23(44).* Obtenido de Crecimiento urbano e impermeabilización del suelo alrededor de la Reserva Forestal Thomas van der Hammen, en la ciudad de Bogotá: https://revistas.javeriana.edu.co/files-articulos/AyD/23-44%20(2019-I)/151561629006/

Sánchez San Román, J. (s.f.). *Conceptos fundamentales de hidrogeología.* Obtenido de Universidad Salamanca: http://hidrologia.usal.es

Scholz, M., & Grabowiecki, P. (2006). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment, 42*(11), 3830-3836. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016

Science for Environment Policy. (2012). *Soil Sealing.* European Commission, Directorate-General Environment . Bristol: University of the West of England.

SEMARNAT. (2014). *6.2.1 Calidad del agua*. Obtenido de El Medio Ambiente en México: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_1.html

Serieys, N. (2004). *Impacto de recarga artificial sobre la calidad del agua en acuíferos sensibles de la Sabana de Bogota*. Obtenido de Universidad de los Andes: https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10445/u251247.pdf?sequence=1&isAllowed=y

SGM. (2020). *¿Qué hacemos?* Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: https://www.gob.mx/sgm/que-hacemos

SIAPA. (2014). *RITERIOS Y LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA FACTIBILIDADES*. Obtenido de SIAPA: https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_5._infiltracion_pluvial.pdf

SIAPA. (2021). *Funciones Públicas*. Obtenido de SIAPA: https://www.siapa.gob.mx/funciones_publicas

Silicani, M. R. (2015). *Diseño, construcción y operación de un lisimetro de bajo costo.* Facultad de Agronomía. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo.

SINA. (2019). *Acerca del SINA*. Obtenido de Sistema Nacional de Información del Agua: http://sina.conagua.gob.mx/sina/

Soto, J. F. (2010). La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ingeniería, Investigación y Tecnología, XI*(2), 167-177.

Suárez, C. (2012). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Guadalajara 2011.* Guadalajara: Universidad de Guadalajara.

Susdrain. (s.f.). Obtenido de Sustainable Drainage: https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/background/sustainable-drainage.html

Susdrain. (2021). *Component: Infiltration trenches*. Obtenido de https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/suds-components/infiltration/infiltration_trench.html

Susdrain/CIRIA. (2014). *Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Flood Prevention*. Obtenido de Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Flood Prevention: https://www.duratex.co.uk/company-blog/industry-news/sustainable-urban-drainage-systems-suds-in-flood-prevention

Tálamo, A., Bermudez, R., Garibaldi, L., & Chavez, A. (2016). *Erosión y escorrentía en respuesta a lluvias simuladas e incendios en bosques secos de montaña. Ciencia del suelo.* Obtenido de SciELO: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672016000100010&lng=es&tlng=es.

Taller botánico. (2020). *¿Qué es y cómo funciona un pozo de absorción?* Obtenido de Taller botánico: https://www.eltallerbioclimatico.com/blog/post/85530/qu-es-y-c-mo-funciona-un-pozo-de-absorci-n

Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2000). *Ciencias de la Tierra* (Sexta ed.). Madrid: Prentice Hall.

Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física.* Pearson Education.

Tinoco, J. (2019). *NIVELES DE CLORO RESIDUAL LIBRE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN UNA INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR EN LA CIUDAD DE CALI EN EL AÑO 2019.* Cali: UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI. Obtenido de

https://repository.usc.edu.co/bitstream/handle/20.500.12421/3262/NIVELES%20DE%20CLORO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Tobias, S. (2013). *Federal Institute of Forest.* Obtenido de Preserving Ecosystem Services in Urban Regions: Challenges for Planning and Best Practice Examples from Switzerland: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3664025/#:~:text=Spatial%20planning%20can%20contribute%20to,compensating%20for%20new%20soil%20sealing

Torres, P., Cruz, C. H., & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 8*, págs. 79-94.

Tráfico ZMG. (2016). *Problema de cada temporal; El negocio de los baches*. Obtenido de Tráfico ZMG: https://traficozmg.com/2016/07/problema-temporal-negocio-los-baches/

UNAM. (2018). *Estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos.* Ciudad de México: Comisión Nacional de los Derechos Humanos.

Ungaro, F., Calzolari, C., Pistocchi, A., & Malucelli, F. (2014). *Hydrol Hydromech.* Obtenido de Modelling the impact of increasing soil sealing on runoff coefficients at regional scale: a hydropedological approach.: https://sciendo.com/abstract/journals/johh/62/1/article-p33.xml

United Nations. (2022). *Normalized Burn Ratio (NBR)*. Obtenido de Normalized Burn Ratio (NBR) | UN-SPIDER Knowledge Portal

United States Geological Survey [USDG]. (s.f.). *El Ciclo del Agua*. Obtenido de USDG Web Site: https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science_center_objects=0#

Vanegas, L. (2017). *POZOS DE INYECCIÓN PROFUNDA: RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS CON AGUAS PLUVIALES Y DISMINUCIÓN DE INUNDACIONES EN EL AMG.*

Vanegas, L., Vargas, D., Ochoa, G., & Grindlay, A. (2022). Flood Mitigation in Urban Areas through Deep AquiferRecharge: The Case of the Metropolitan Area of Guadalajara. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*. doi:https://doi.org/10.3390/ijerph19063160

Vázquez, G. A., Ortiz, J. E., & Lizárraga, L. G. (2020). Efecto de las tecnologías de bajo impacto en el tratamiento del agua de escorrentía urbana. *Vivienda y Comunidades Sustentables, 8*, 103-115.

Vega, I. P. (08 de 05 de 2021). *Construye Zapopan sistema de vasos reguladores en la zonas de Puerta de Hierro y en Perisur, para evitar inundaciones*. Obtenido de udegtv.com/noticias: https://udgtv.com/noticias/construye-zapopan-sistema-vasos-reguladores-zonas-puerta-hierro-perisur-evitar-inundaciones/

Vélez, J., & Botero, A. (2010). *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. .* Obtenido de Scielo Org: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000100006

Vijayaraghavan, K. (2016, May). A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57*, 740-752. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119

Villegas, H. (2008). *Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas (Guías para los asistentes).* Obtenido de Microsoft Word - memoria-curso-jul-2008Editado (sgc.gov.co)

Vörösmarty, C., & Sahagian, D. (2000). *BioScience, Volume 50, Issue 9.* Obtenido de Anthropogenic Disturbance of the Terrestrial Water Cycle: https://academic.oup.com/bioscience/article/50/9/753/269247?login=false

Weigand, P. C. (2012). La Caldera de Coli y su vecina Guadalajara. *Relaciones*, 291-318.

Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). *CIRIA.* Obtenido de The SuDS Manual: http://www.scotsnet.org.uk/documents/nrdg/ciria-report-c753-the-suds-manual-v6.pdf

Xingyu, Y., Fei, Y., & Wenxi, F. (2022). *Estimating the critical shear stress for incipient particle motion of a cohesive soil slope.* Obtenido de https://www.nature.com/articles/s41598-022-13307-w

Zafra, C. A., Temprano, J., & Tejero, I. (2009). Evaluación de la contaminación por escorrentía urbana: sedimentos depositados sobre la superficie de una vía. *Ingeniería e Investigación, 29*.

Zafra, C. A., Temprano, J., & Tejero, J. I. (2007). Contaminación por escorrentía superficial urbana: metales pesados acumulados sobre la superficie de una vía. *Ingeniería e Investigación, 27*.

Zamudio Zavala, P., Mayoral Ruiz, P., & Gómez Mora, I. (2019). *MODELO DE PROFUNDIDAD A LA ROCA BASAL DE LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA (ZMG).* Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C., Monterrey.

Zamudio, P., Vargas, D., & Ochoa, G. (2016). *Correlaciones entre propiedades mecánicas y propiedades físicas en.* Guadalajara.

Zaporozec, A. (1981). Ground-Water pollution and its sources. *GeoJournal, 5*, 457-471. doi:https://doi.org/10.1007/BF02484718

-

Referencias Marco Contextual

- Andreo, B., Vías, J., Durán, J. J., Jiménez, P., López-Geta, J. A., & Carrasco, F. (2008). Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: Application to pilot sites in southern Spain. Hydrogeology Journal, 16, 911-925. https://doi.org/10.1007/s10040-008-0274-5
- Cerdà, A. (1997). Influencia de la litología en los procesos de erosión en badlands. Los casos de Anna (Valencia) y Petrer (Alicante). Pirineos, 149-150(0), 3-20. https://doi.org/10.3989/pirineos.1997.v149-150.124
- FIRCO. (s. f.). Fideicomiso de Riesgo Compartido | Gobierno | gob.mx. Recuperado 28 de septiembre de 2023, de https://www.gob.mx/firco
- Geografía INEGI. (2005). Espacio y datos de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx
- Geografía INEGI. (2014). Espacio y datos de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx
- Geografía INEGI. (2016). Espacio y datos de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx
- Geografía INEGI. (2021). Espacio y datos de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx
- INEGI. (2013, diciembre). SIATL v4 | Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- Planet. (2023). Planet Monitoring—Satellite Imagery and Monitoring. Planet. https://www.planet.com/products/monitoring/
- Pourrut, P. (Ed.). (1995). Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos. Colegio de Geógrafos del Ecuador: Corporación Editora Nacional.
- SIGEA. (2023). Mapa de ordenamiento. https://mapas.semarnat.gob.mx/sigeia/#/sigeia.
- https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/GDL_web.pd
- https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals- Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*11qhxop*_ga*MTgwMTUwNDQ3LjE2OTY1NTAwMTg.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5NzA0NzQxMS4zLjEuMTY5NzA0NzQxOS4wLjA uMA
- https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/programa-sectorial- infraestructura-y-obra-publica_1.pdf
- Gaceta Vol. XXVII No. 40 TIII.pdf

- http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques- de-retencion/

- https://akvopedia.org/wiki/Estanques_de_infiltraci%C3%B3n

Referencias Metodología

- CONAGUA. (2023). *Estaciones meteorológicas* [KML]. https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz
- Davis Instruments. (2023). *WeatherLink Air Quality & Temperature Map*. https://www.weatherlink.com/map
- Geografía INEGI. (2005). *Espacio y datos de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx
- Geografía INEGI. (2014). *Espacio y datos de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx
- Gracia, A., Godé, L., Crego, E., Arrabal, M., Guirado, V., García, G., Lobera, C., González, S., & Martínez, E. (2010). *Riesgos y cuantificación de daños por inundación*.
- PNT (2023). *Plataforma Nacional de Transparencia.* Recuperado el 14 de noviembre del 2023, de https://consultapublicamx.plataformadetransparencia.org.mx/vut-web/faces/view/consultaPublica.xhtml#inicio.
- Hernández, R. (2015). *Desalojan a más de 200 personas por desbordamiento del río Ameca.* Recuperado el 14 de noviembre de 2023, de https://www.cronicajalisco.com/notas/2015/39518.html.
- SIGIEA. (2023). *Sistema de Información Geográfica para la Evaluación del Impacto Ambiental.* Recuperado el 06 de noviembre de 2023, de https://mapas.semarnat.gob.mx/sigeia/#/sigeia.
- Vélez, J., & Botero, A. (2010). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. Obtenido de Scielo Org:http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000100006
- Rojas, D., & González, M. (2015). Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México. Obtenido de SciELO: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382015000200006&script=sci_arttext&tlng=pt

- Susdrain/CIRIA. (2014). Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Flood Prevention. Obtenido de Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Flood Prevention: https://www.duratex.co.uk/company-blog/industry-news/sustainable- urban-drainage-systems-suds-in-flood-prevention
- Suárez, C. (2012). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Guadalajara 2011. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- SIAPA (Servicios de Agua Potable y Alcantarillado). (2014). RITERIOS Y LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA FACTIBILIDADES. Obtenido de SIAPA:
- https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_5._infiltracion_pluvial.pdf
- SEMARNAT. (2014). 6.2.1 Calidad del agua. Obtenido de El Medio Ambiente en México: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_1.htm I
- Science for Environment Policy. (2012). Soil Sealing. European Commission, Directorate-General Environment. Bristol: University of the West of England.

Referencias Resultados

- Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., & Tsuchihashi, R. (2013). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw-Hill Education.
- von Sperling, M. (2016). Stabilization Ponds: Biological Wastewater Treatment. IWA Publishing.
- Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). Wastewater Treatment and Reuse. McGraw-Hill Education.
- Middlebrooks, E. J., & Crites, R. W. (2000). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw-Hill Education.
- Crites, R. W., Tchobanoglous, G., & Ovidio, J. A. (1998). Natural Wastewater Treatment Systems. CRC Press.
- https://patents.google.com/patent/CN211571235U/en?oq=CN+211571235+U
- https://patents.google.com/patent/CN110627313A/en?q=(Novel+rainwater+filtration+system+suitable+for+sponge+city)&oq=Novel+rainwater+filtration+system+suitable+for+sponge+city

- https://patents.google.com/patent/KR102018462B1/en?q=(rain+water+trench)&oq=rain+water+trench
- https://patents.google.com/patent/CN102031768B/en?q=(rain+water+trench+well
-)&oq=rain+water+trench+well
- https://patents.google.com/patent/CN212835459U/en?q=(rain+water+trench+well
-)&oq=rain+water+trench+well
- https://patents.google.com/patent/CN202969202U/en?q=(rain+water+trench+well
-)&oq=rain+water+trench+well&page=1
- https://patents.google.com/patent/KR20090090987A/en?oq=KR2009-0090987A) https://chat.openai.com/c/2711ba0f-264c-460b-961e-c31adb302990
- https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de- abastecimiento-de-agua/red-de-distribuci%C3%B3n-comunitaria
- https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/uso-yo- disposicion-final/pozo-de-absorci%C3%B3
- https://umamexico.com/red-de-parques-sobre-el-rio-tizates/
- https://www.mandua.com.py/un-parque-lineal-para-dar-una-cara-distinta-al-entorno-del-arroyo- lambare-in469
- *Nido de lluvia, una nueva forma de abastecimiento de agua en Jalisco | Gobierno del Estado de Jalisco*. (s. f.). https://www.jalisco.gob.mx/es/gobierno/comunicados/nido-de-lluvia-una-nueva-forma-de-abastecimiento-de-agua-en-jalisco
- Lapointe, M., Rochman, C. M., & Tufenkji, N. (2022). Sustainable strategies to treat urban runoff needed. *Nature sustainability*, *5*(5), 366-369. https://doi.org/10.1038/s41893-022-00853-4
- Jones, J. E., Bisbee, G. D., & Stewart, H. T. (2002.). Innovative Stormwater Treatment Technologies: Best Management Practices Manual. *University of New Hampshire*. https://scholars.unh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1314&context=prep

https://patents.google.com/patent/US11096386B2/en?q=(infiltration+trench%2c+wels%2c+rain+garden)&oq=infiltration+trench%2c+wels%2c+rain+garden

- https://patents.google.com/patent/CN111877461A/en?oq=CN111877461A
- Meléndez, V. (2023, 31 agosto). Baja presa Calderón nivel pese a lluvias. *Mural*. Recuperado 2 de octubre de 2021, de https://www.mural.com.mx/baja-presa-calderon-nivel-pese-a-lluvias/ar2666957
- SIAPA. (2021). *¿Qué está pasando con el agua en el AMG?* Recuperado 2 de octubre de 2023, de https://www.siapa.gob.mx/suministro
- IIEG. (2021). *Zapopan, Diagnóstico Municipal*. Recuperado 2 de octubre de 2023, de https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2021/10/Zapopan-1.pdf
- CONAGUA. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero de Atemajac (1401), Estado de Jalisco. Recuperado 6 de octubre de 2023, de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/jalisco/DR_1401.pdf
- 34474270 Rain Water Harvesting and Conservation. (s. f.). Scribd. https://es.scribd.com/doc/128890095/34474270-Rain-Water-Harvesting-and-Conservation
- Perrozzi, A. (2022). Parques inundables: el rol del espacio público en la gestión del agua. Transecto. https://transecto.com/2020/05/parques-inundables/
- Pozos y zanjas de infiltración. (2016, 24 agosto). SuD Sostenible. http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/pozos-y-zanjas-de-infiltracion/
- CityAdapt. (2023, 21 agosto). Pozos de absorción - CityAdapt. https://cityadapt.com/sbn_cityadapt/pozos-de-absorcion/
- Sistemas de captación de agua pluvial y filtración a base de zeolitas – zeolitas. (s. f.). https://zeolitas.mx/sistemas-captacion-pluvial/
- Foley, J., Defries, R., Asner, G., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S., Chapin III, F. S., Coe, M., Daily, G., Gibbs, H., Helkowski, J., Holloway, T., Howard, E., Kucharik, C., Monfreda, C., Patz, J., Prentice, I., Ramankutty, N., & Snyder, P. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science (New York, N.Y.)*, *309*, 570-574. https://doi.org/10.1126/science.1111772

- López, H. E. F., Orozco, C. de la M., Corral, J. A. R., & Durán, Á. A. C. (2013). Efecto De La Cobertura De Suelo De Tres Cultivos Sobre La Erosión Hídrica. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, *XII*(1), 19-25.
- PERCOT. (s. f.). *Pozo de absorción*. Recuperado 8 de octubre de 2023, de https://www.percot.com.mx/
- 何畏洪祖勇王林棋. (2021, julio 20). *CN111733847B - A hydrophobic water guide device for foundation ditch construction—Google Patents*. https://patents.google.com/patent/CN111733847B/en?q=(infiltration+trenches+with+gravel+filters)&oq=infiltration+trenches+with+gravel+filters
- Pourrut, P. (Ed.). (1995). *Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos*. Colegio de Geógrafos del Ecuador: Corporación Editora Nacional.
- SIGEA. (2023). *Mapa de ordenamiento.* https://mapas.semarnat.gob.mx/sigeia/#/sigeia.
- Camarillo, R., Valdés, F., Alonso, J. (2012). *Desarrollo de un sistema hidrodinámico para sistemas de análisis en flujo miniaturizados.* Revista mexicana de ingeniería química. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382012000200009.
- Celdrán, D. (2022). *Acuicultura Simbiótica como Nuevo Paradigma Productivo: Reduciendo Impactos y Aumentando Beneficios.* Avances en Nutrición Acuícola. https://nutricionacuicola.uanl.mx/index.php/acu/article/view/353.
- Crespo, C. (2022). *¿Qué impacto tienen las cremas solares en los ecosistemas?* National Geographic. https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2022/04/que-impacto-tienen-las-cremas-solares-en-los-ecosistemas.
- Dirección General de Obras y Conservación. (s.f.). *Concretos ciclópeos.* Dirección de Planeación y Evaluación de Obras. https://www.obras.unam.mx/pagina/docs/normatividad/construc/espe_gral/estructu/ob_pre/obp_pc01.html#:~:text=El%20concreto%20ciclˊpeo%20se%20elaborar%C3%A1,revolvedora%2C%20o%20suministrado%20de%20planta.
- Holcim. (2013). *Informe de Desarrollo Sostenible 2013.* https://www.holcim.com.co/sites/colombia/files/images/IDS2013-11.pdf.

- MACCAFERRI. (2023). *Gaviones.* https://www.maccaferri.com/mx/productos/gaviones-3/.
- OAS. (s.f.). *Capitulo 8. Definición de llanura de inundación y evaluación del peligro de inundaciones*. https://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea65s/ch13.htm.
- Reel Resilience Network. (2023). *Impactos ambientales y beneficios.* The Nature Conservancy. https://reefresilience.org/es/management-strategies/aquaculture/environmental-impacts-and-benefits/.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). *La acuicultura o acuacultura es el conjunto de actividades, técnicas y conocimientos de crianza de especies acuáticas vegetales y animales.* Gobierno de México. https://www.gob.mx/agricultura/articulos/acuicultura-en-mexico#:~:text=En%20M%C3%A9xico%2C%20ha%20alcanzado%20niveles,osti%C3%B3n%2C%20camar%C3%B3n%20y%20langostino).
- https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/GDL_web.pd
- https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*11qhxop*_ga*MTgwMTUwNDQ3LjE2OTY1NTAwMTg.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5NzA0NzQxMS4zLjEuMTY5NzA0NzQxOS4wLjAuMA
- https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/programa-sectorial-infraestructura-y-obra-publica_1.pdf
- Gaceta Vol. XXVII No. 40 TIII.pdf
- http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques-de- retencion/
- https://akvopedia.org/wiki/Estanques_de_infiltraci%C3%B3n
- https://www.artificialrecharge.co.za/strategydocument/ARStrategySectB.pdf
- https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SIAPA%202014.%20Criterios%20y%20lineamientos%20t%C3%A9cnicos%20para%20%20Infiltraci%C3%B3n%20pluvia l..pdf

- http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00000992.pdf
  https://www.sdgfund.org/sites/default/files/case_study_-_mexico_agua_-_es.pdf
- https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/GDL_web.pd
- https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*11qhxop*_ga*MTgwMTUwNDQ3LjE2OTY1NTAwMTg.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5NzA0NzQxMS4zLjEuMTY5NzA0NzQxOS4wLjAuMA
- https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/programa-sectorial-infraestructura-y-obra-publica_1.pdf
- Gaceta Vol. XXVII No. 40 TIII.pdf

Montejo, E. (2023). La sexta extinción masiva está destruyendo ramas enteras del árbol de la vida. National Geographic en español. https://www.ngenespanol.com/animales/la-sexta-extincion-masiva-esta-destruyendo-ramas-del-arbol-de-la-vida/

- http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques-de- retencion/
- https://akvopedia.org/wiki/Estanques_de_infiltraci%C3%B3n https://www.artificialrecharge.co.za/strategydocument/ARStrategySectB.pdf
- https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SIAPA%202014.%20Criterios%20y%20lineamientos%20t%C3%A9cnicos%20para%20%20Infiltraci%C3%B3n%20pluvia l..pdf
- http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00000992.pdf https://www.sdgfund.org/sites/default/files/case_study_-_mexico_agua_-_es.pdf