

TERRITORIO SENSIBLE AL AGUA EN QUINTANA ROO

Planificación Territorial
con base en el Sistema Kárstico
de agua subterránea-superficial



Geomática,
Educación y
Ordenamiento
Ambiental

Sostenible es Posible



Con la visión y el apoyo del gobierno del estado de Quintana Roo, a través de la Secretaría de Desarrollo Territorial Urbano Sustentable y la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente, así como la Red Mexicana de Cuencas y la Red Latinoamericana en el Rescate de Ríos Urbanos e investigadores de El Colegio de la Frontera Sur.

Con el visto bueno del gremio de cuencas a través de:



RED
Latinoamericana en el
Rescate de Ríos Urbanos

AUTORÍA

Planificación territorial base vocación natural del sistema hidrológico

M. en Cs. Silvana Marisa Ibarra Madrigal

Diseño en ingeniería civil, modelación hidrodinámica

M.C. David Gustavo Rejón Parra

Ing. Yesenia Nayrovick Hernández Montero

Ing. Javier Rodrigo Nahuat Sansores

Ing. Miguel Ángel Sánchez Quijano

Valoración económica.

M.E.S.P. Roberto Mena Rivero

Gestor Cultural, Ciudadanía & Sostenibilidad.

Arq. Ángel Iván Romero Martínez

AGRADECIMIENTOS

- **Secretaría de Ecología y Medio Ambiente de Quintana Roo**
Biól. Alfredo Arellano Guillermo
- **Secretaría de Desarrollo Urbano y Territorial Sustentable**
Arq. Carlos Ríos Castellanos
- **Comisión de Agua Potable y Alcantarillado**
Lic. Francisco Gerardo Mora Vallejo
Ing. Luis Soberanis Allen
- **Comisión Nacional del Agua**
Q.F.B. José Luis Blanco Pajón
- **El Colegio de la Frontera Sur**
Dra. Nuria Torrescano Valle
Dr. Héctor Hernández Arana
Dra. Amalia Gracia
- **Asociación de Hoteles y Restaurantes de Bacalar**
Lic. Linda Flor Argaez Calderón
- **Unión de Asociaciones de la Sociedad Civil en Bacalar**
A sus miembros
- **Colegio de Ingenieros Civiles de Quintana Roo, Zona Sur A.C.**
Ing. Amir Efrén Padilla Espadas
- **VIMSA**
Arq. Luis Carrión Cuellar
- **GEO alternativa (Geomática, Educación cooperativa y Ordenamiento Ambiental)**
Yessica Osorio Miranda
- **Red Mexicana de Cuencas (REMEXCU)**
Biólogo Eduardo Ríos Patrón (coordinador)
- **Red Latinoamericana de Rescate de Ríos Urbanos**
Mtro. José Luis Romero.
- **Alianza Agroforestería Sintrópica**
Gerardo Villanueva
João Paulo Becker Lotufo Junior
César Claro Trevelin
- **Alianza Acuífero Ancestral & Nacaome Foundation**
Mariana García Solano
- **Termarchitecture (Urban Planning & Architectural Design).**
Permacultor Gerardo Orozco Astigarraga

Este documento se cita de la siguiente manera:

Ibarra-Madrígal Silvana, Rejón-Parra David, Hernández-Montero Yesenia, Nahuat-Sansores Javier, Sánchez Quijano Miguel, Mena-Rivero Roberto, Romero-Martínez Ángel Iván, Ríos-Castellanos Carlos, Arellano-Guillermo Alfredo. (2019). Territorio Sensible al Agua: Principios para la planificación territorial con base en el sistema cárstico de agua subterránea-superficial. Organización de Geomática, Educación y Ordenamiento Ambiental (Geo Alternativa). Bacalar, Quintana Roo. Pp 79. <http://www.geoalternativa.com/acervo3.php> y <https://www.quintanaroo.gob.mx/sedetus>

Contenido

Introducción	9
Funcionamiento natural del territorio en Quintana Roo	10
Planteamiento de la problemática	14
¿Por qué se considera como punto clave las inundaciones y sus efectos?	15
Antecedentes	18
Marco contextual ¿qué impulsó este documento?	19
¿Qué es una Ciudad Sensible al Agua y en qué etapa se encuentra el estado?	20
Congruencia de la Ley de Asentamientos Humanos y Desarrollo y La Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	23
Objetivos del presente documento	24
Método para la generación de los principios para la planificación territorial del sistema cárstico	24
Inundaciones y Establecimiento de Índice de Peligrosidad Local	29
Valoración económica	30
Valor actual de los beneficios de acciones sensibles al agua	30
Identificación de daños	30
Cuantificación de daños	31
Valoración de daños	31
Daños anuales esperados	31
Resultados	32
La línea base	32
Sobre la relación situación urbana/inundaciones	33
Valoración económica de inundaciones y sobre inversión en sistemas de tratamiento primario in-situ	36
Fundamentos para la planificación territorial del sistema cárstico	37
Sistemas constructivos permeables, sensibles al agua	40
Biocanal	40
Jardín de lluvia	44
Pavimentos permeables	49
Decálogo de principios base vocación natural del territorio kárstico.	54
Vinculación de Territorio Sensible al Agua con los objetivos del milenio.	55
Principios para zonas urbanas	58
Principios Sensibles al Agua para Zonas Rurales	67

Manual de Agroforestería Sintrópica en Historieta.	75
Retos y Oportunidades	78
Bibliografía	79
ANEXOS	81
Especificaciones técnicas de las infraestructuras sensibles al agua (infraestructura esponja).	81
Comparativo económico entre un sistema de saneamiento individual (fosa séptica) y global (sistema de alcantarillado por gravedad más planta de tratamiento) 86	
Resultados 107	
Conclusiones 112	
Bibliografía 112	
Valoración de daños por inundación al variar el área permeable de la zona urbana de Bacalar	114
Resultados	131
Conclusiones	137
Bibliografía	138

Índice de figuras

Figura 1 Situación de las corrientes de agua en la Península de Yucatán (PY), que fluyen subterráneamente conformando el Gran Acuífero Maya.	10
Figura 2. Esgurrimiento superficial y subterráneo modelado en la zona de estudio.	12
Figura 3 . Esquema sobre la interacción de los cuerpos de agua subterráneos en la zona de costa y de la formación de la haloclina en la península de Yucatán.	13
Figura 4 Modelo conceptual de vocación natural, elaborada por CICY y ECOSUR.	14
Figura 5 Sitios afectados por inundación y rebosamiento cloacal, registrados en junio 2018 en el Centro Urbano de Bacalar.	16
Figura 6 Modelo conceptual de vocación natural bloqueado por el medio urbano y vulnerable a actividades antropogénicas contaminantes, elaborado por CICY y ECOSUR.	17
Figura 7 Croquis de localización macro del Edo. de Quintana Roo en la República Mexicana (izquierda) y de los municipios de Bacalar y Othón P. Blanco (derecha).	18

Figura 8 Mapa de ubicación y delimitación de los polígonos de ámbito y reserva territorial de los Planes de Desarrollo Urbano de las ciudades de Chetumal y Bacalar; incluye ubicación y manchas urbanas de las localidades en la actualidad.	19
Figura 9 Transición entre fases, desde una ciudad con un sistema proveedor centralizado hacia una ciudad sensible al agua.	21
Figura 10 Imagen satelital con polígono propuesto para el desarrollo del Centro Urbano de 4,000 Ha, se observa el área actualmente urbanizada de 433.78 Ha. 27	
Figura 11 Escenarios de modelación para los polígonos Urbano Construido y Reserva Territorial del PDU Bacalar (coeficientes de escurrimiento en rojo para cada polígono). Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 12 . Escorrentía superficial de Bacalar a Escala 1:20,000.	34
Figura 13 Zonas de reserva territorial, con base en la modelación hidrodinámica Tr 10. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 14 Zona aproximada de recarga de flujos subterráneos de jerarquía local. Elaboración propia con base en información de Sánchez et al 2012 e Ibarra-madrugal 2019.	38
Figura 15 Detalle constructivo de Bio-canal en camellón Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 16 Corte muestra de corredor verde con Jardín de lluvia y pavimento permeable en andadores y Bio-canal en camellón.	43
Figura 17 Vista en planta de Jardín de lluvia. Propuesta de corredor verde con Jardín de lluvia a los costados para la zona 3 establecida en el Reglamento de imagen urbana de Bacalar.	47
Figura 18 Detalle constructivo de jardín de lluvia. Corte muestra para corredor verde con jardín de lluvia y pavimento permeable	47
Figura 19 Detalle constructivo jardín de lluvia, cortes A, B y C.	48
Figura 20 Gráfico de los pavimentos porosos	50
Figura 21 Detalle constructivo de pavimento permeable.	52
Figura 22 Ejemplo de emplazamiento de Jardín de lluvia, Bio-canal y Pavimento permeable en corredor verde.	53
Figura 23 Ejemplo de emplazamiento de Jardín de lluvia, Bio-canal y Pavimento permeable en corredor verde con camellón	53

Índice de tablas

Tabla 1 Variación de CN o relación área verde/área gris en escenarios de desarrollo urbano para Bacalar.	30
Tabla 2 Daños Anuales Esperados	32
Tabla 3 Tiempo de inicio del aumento de escorrentía e inundación según situación urbana.	33
Tabla 4 Componentes del Biocanal	41
Tabla 5 Componentes de Jardín de lluvia.	45
Tabla 6 Componentes de pavimentos permeables	51

Presentación

El presente documento es producto de la iniciativa de diversos sectores por una planificación territorial que considere las características vulnerables del patrimonio natural y cultural de Quintana Roo, cuya sociedad vive sobre uno de los acuíferos cársticos más grandes del mundo. Por ello el estado tiene la oportunidad de distinguirse de otras sociedades por lograr evitar los errores con alto costo socio-ambiental de un desarrollo inercial que altera la conectividad del ser humano, el agua y su territorio, y haber decidido ir en busca de un territorio seguro, benigno y saludable, diseñando principios de innovación. Emitimos el presente gracias la visión y apertura especialmente del gobierno del estado a través de la Secretaría de Desarrollo Territorial Urbano Sustentable (SEDETUS) y de la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente (SEMA), pero también de todos los actores cuyo esfuerzo y dedicación aquí se reconocen.

El propósito es presentar el funcionamiento conectivo socio-ambiental e hidrológico del acuífero cárstico de Quintana Roo, su vocación natural, exponer la problemática que históricamente ha provocado alteraciones hídricas con efectos por inundación en centros de población y contaminación de cenotes, humedales y lagunas; y se presenta la iniciativa internacional llamada Ciudad Sensible al Agua y sus aplicaciones se amplían a todo el territorio, convirtiéndose en una **Iniciativa Intersectorial Territorio Sensible al Agua** que considera no solo lo urbano, sino también lo rural, ofrecemos sistemas constructivos que permiten la recarga al acuífero, proporción de superficie permeable/impermeable para replicar el funcionamiento del sistema cárstico, claves de producción en agroecología sintrópica y corredores bioculturales. Con base en el estudio de caso de Bacalar, se justifica una proporción permeable/impermeables y una distribución urbana útil en la reducción de las inundaciones y la contaminación del agua y el suelo, demostrando además su rentabilidad económica. Por último, se emiten principios fundamentales que sirven a todo el territorio de Quintana Roo en el diseño de sus programas de Desarrollo Urbano Municipal, programas Municipales de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano, reglamentos de construcción, reglamentos de imagen urbana y otros elementos de planificación incluso ejidales, para el resguardo del bien común hoy y en el futuro.

Año 2019.

Introducción

El objetivo de este trabajo es presentar los beneficios de integrar sistemas urbanos y productivos con base en la vocación natural de los sistemas hidrogeológicos, y así sentar los precedentes para orientar el desarrollo territorial de Quintana Roo hacia una visión de Territorio Sensible al Agua.

En particular, en la Península de Yucatán, los sistemas socio-ambientales están sostenidos en la morfología cárstica y se caracterizan por su alta dependencia del agua subterránea, dada la elevada conductividad hidráulica y alta permeabilidad de su suelo (Michener & Lajtha, 2007; Leal-Bautista, 2014).

Los estudios de Cervantes Martínez (2007) y Torres et al. (2019), postulan la alta importancia de la superficie del suelo de la península de Yucatán para la recarga de agua, ya que entre el 80 y 90 % de la precipitación pluvial se infiltra; un porcentaje de ello se evapotranspira gracias a la vegetación, y el otro se recarga al acuífero a través de la matriz rocosa. Posteriormente el flujo de agua se mueve conectando a los diversos ecosistemas, desde las selvas hasta el océano.

El problema a enfrentar es que el diseño urbano predominante en las actuales ciudades de Quintana Roo rompe la conectividad natural del agua precipitada con los estratos cársticos, y altera la interdependencia entre los elementos naturales que hacen funcionar el sistema socioeconómico y ambiental de la región.

En estos trabajos, el equipo de expertos, mediante modelaciones y simulaciones en software especializados en procesos de inundaciones y escorrentías pluviales, demuestra que es posible, y económicamente rentable, mitigar las inundaciones pluviales urbanas, con la ventaja que ofrece la citada metodología basada en los criterios de “Ciudad Sensible al Agua”, pues estas alternativas y acciones son extrapolables y aplicables a todas las zonas urbanizables.

Funcionamiento natural del territorio en Quintana Roo

La dinámica del ciclo del agua (atmosférica, superficial y subterránea), ocurre de forma interactiva y simultánea en la topografía del territorio entre el suelo, el componente geológico y la vegetación; el flujo de agua depende de la continuidad de dichos elementos biofísicos, y especialmente en este tipo de espacios, el agua constituye un agente geológico y gobernador del espacio (Tóth, 1999), configurando un territorio con condiciones que las sociedades determinan en la elección del establecimiento de sus ciudades y actividades productivas, siendo hoy de especial consideración para el desarrollo sostenible (Carrillo-Rivera, Cardona, Huizar-Álvarez, & Graniel, 2008).

En la península de Yucatán (PY), representada en la Figura 1, se encuentra un sistema socioambiental de geología cárstica caracterizado por su interdependencia con el agua subterránea (Michener & Lajtha, 2007; Leal-Bautista, 2014), y que presenta una permeabilidad doble:

- de flujo vertical entre el suelo, la matriz rocosa y la vegetación;
- de flujo horizontal por el sistema de ríos subterráneos, cavernas, fracturas geológicas y escorrentía superficial.

Ello eleva la vulnerabilidad del territorio ante la sequía, las inundaciones, la salinización del agua dulce y la contaminación antropogénica (Graniel, Morris, & Carrillo-Rivera, 1999; Perry, Paytan, Pedersen, & Velázquez-Oliman, 2009).

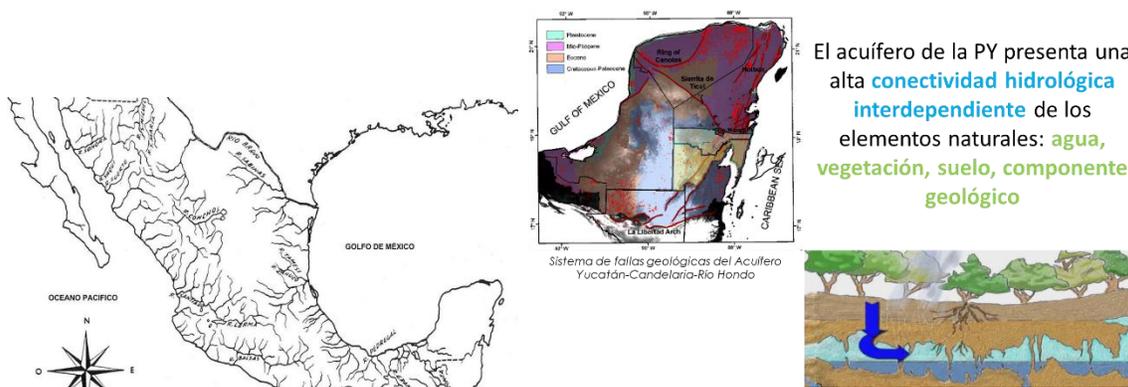


Figura 1 Situación de las corrientes de agua en la Península de Yucatán (PY), que fluyen subterráneamente conformando el Gran Acuífero Maya.

La Península de Yucatán, que alberga en su porción oriental al estado de Quintana Roo, está sobre uno de los acuíferos más grandes y excepcionales del mundo, el cual se extiende hasta países vecinos, Guatemala y Belice. La UNESCO (2015) lo ha denominado acuífero transfronterizo Yucatán-Candelaria-Hondo (ver Figura 1). Su característica más notable es la alta permeabilidad, derivada de procesos de disolución del suelo que establecen cenotes y ríos subterráneos, y ninguna corriente superficial (Figura 1). Incluso contiene uno de los sistemas de ríos subterráneos más complejo y significativo del mundo, Sac Actun, al suroeste de Tulum, caracterizado por 336 km de cavernas horizontales y conductos producto de la carstificación¹ (Kambesis and Coke 2016:185). Se calcula que 4'498,668 de personas habitan en la porción mexicana del acuífero (conteo INEGI 2015), la cuales dependen de ese sistema para su provisión de agua dulce.

Además, al suroriente de este acuífero se encuentra uno de los cuerpos de agua superficial más grande de México, dependiente de una zona de influencia subterránea y también superficial, como se muestra en la siguiente Figura 2; son zonas interrelacionadas en patrones hidrológicos que fluyen de oeste a este y de suroeste a noreste. El nivel piezométrico constituye la zona de influencia subterránea y las líneas en rosa y azul, muestran las corrientes superficiales.

¹ Acción que forma cenotes, cavernas y oquedades a partir de la disolución del suelo calcáreo ante la presencia de agua + dióxido de carbono

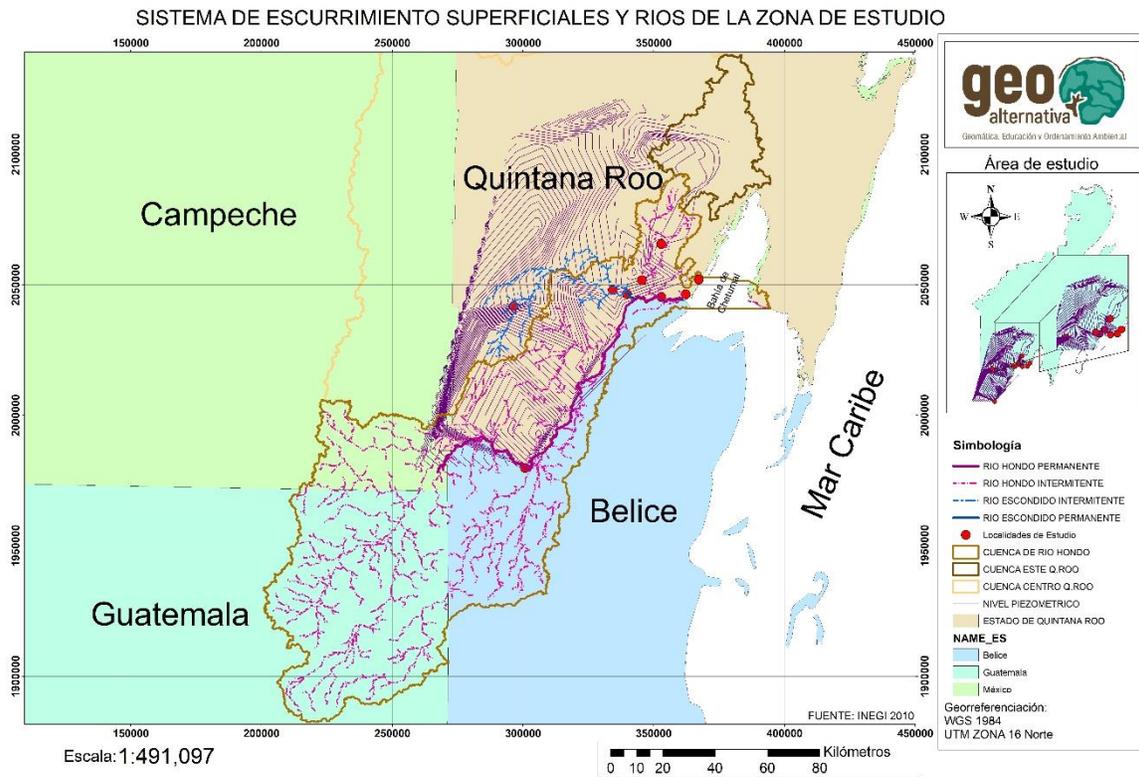


Figura 2. E scorrimiento superficial y subterráneo modelado en la zona de estudio.

Debido a que el acuífero queda delimitado al este, norte y noroeste por el Mar Caribe y el Golfo de México, es notable la intrusión salina debajo de la lente de agua dulce subterránea, fenómeno que se esquematiza en la Figura 3.

Estos dos tipos de agua evitan mezclarse debido a la diferencia de sus densidades: por ser más pesada, el agua salada permanece por debajo del agua dulce, siempre que se permita la recarga de agua infiltrada desde los estratos superiores y no exista un forzamiento externo, como la fuerza de extracción que ejerce el bombeo. A la frontera o fase donde se juntan ambas aguas se le conoce como "la haloclina".

En la península, la ubicación subterránea de la haloclina es variable y cada vez más profunda, conforme se aleja de la línea de costa. Los estudios de la región muestran, de forma aproximada, que en el sur de Quintana Roo, a 2 km de la costa, la haloclina se encuentra a 10 metros de profundidad, que a 20 km de la costa se encuentra a una profundidad de 42 m, y a 60 km de la costa, desciende hasta 90 m.



Figura 3 . Esquema sobre la interacción de los cuerpos de agua subterráneos en la zona de costa y de la formación de la haloclina en la península de Yucatán.

Cenotes, manantiales, selvas, humedales, lagunas de agua dulce y salobre, sabanas, bahías, manglares y hasta los arrecifes de coral del océano, cada uno de los cuales conforman sistemas naturales de por sí complejos en sus procesos, en conjunto conforman un ecosistema natural interconectado por el agua, de la que dependen en cantidad y calidad (Espinoza-Ávalos & IAGH-AHA, 2009) y (Graniel, Morris, & Carrillo-Rivera, 1999) Ver Figura 4 cortesía de ECOSUR y CICY.

Los cuerpos de agua receptores de la escorrentía superficial y de los flujos subterráneos reciben una firma geológica a base de carbonatos (CaCO_3), diluida en el agua desde la matriz rocosa calcárea. Este es el material que produce los característicos colores turquesa del agua de la región, corales y microbialitos que son los organismos fotosintéticos más antiguos del planeta y cuya extensión en la Laguna Bacalar es excepcional, comparada con otros cuerpos lacustres similares a nivel internacional (Gischler et al. 2011 y Centeno et al. 2012).

Los ecosistemas que resultan de este sistema cárstico son un atractivo turístico internacional, con una derrama económica (con tendencia al aumento), que representó para Quintana Roo 8,726 millones de dólares entre enero de 2016 y diciembre de 2017 (SEDETUR, 2018). Es evidente el altísimo interés en su conservación como sustento de tan notable dinámica económica y de desarrollo.

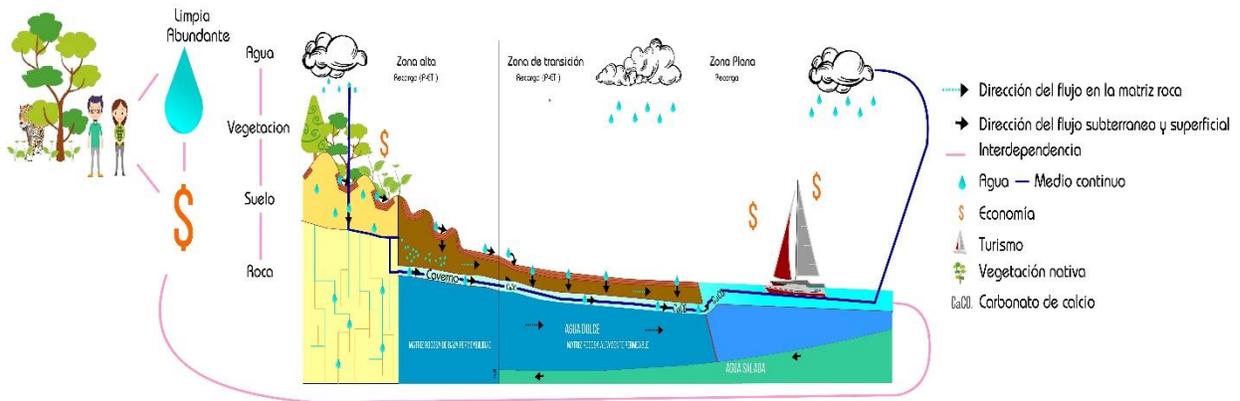


Figura 4 Modelo conceptual de vocación natural, elaborada por CICY y ECOSUR.

Fuente: Ibarra-Madrugal 2019

Planteamiento de la problemática

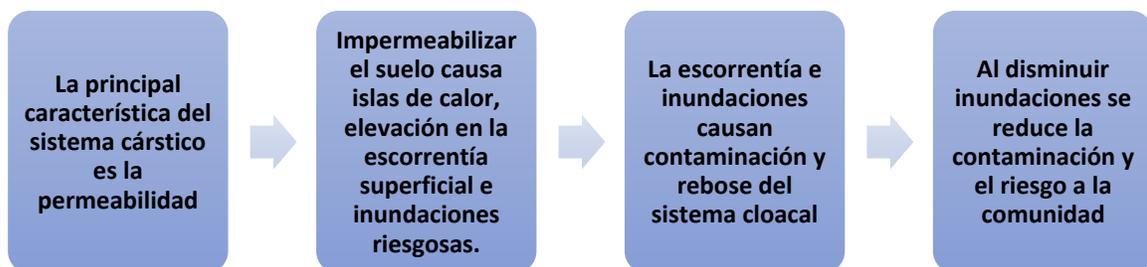
La poca permeabilidad del suelo en las ciudades, derivada del diseño urbano imperante en México y Quintana Roo, provoca una ruptura en la conectividad del agua, alterando la interdependencia entre los elementos naturales, pese a que su estabilidad es la base del sistema socioeconómico y ambiental. Esta deficiencia crea una serie de efectos que degradan todo el sistema natural y artificial, con consecuencias en mayores riesgos de desastres, pérdida en la calidad de vida y daño directo a la economía local.

En cuanto a la configuración funcional de la hidrología de nuestras ciudades, se puede mencionar las siguientes características:

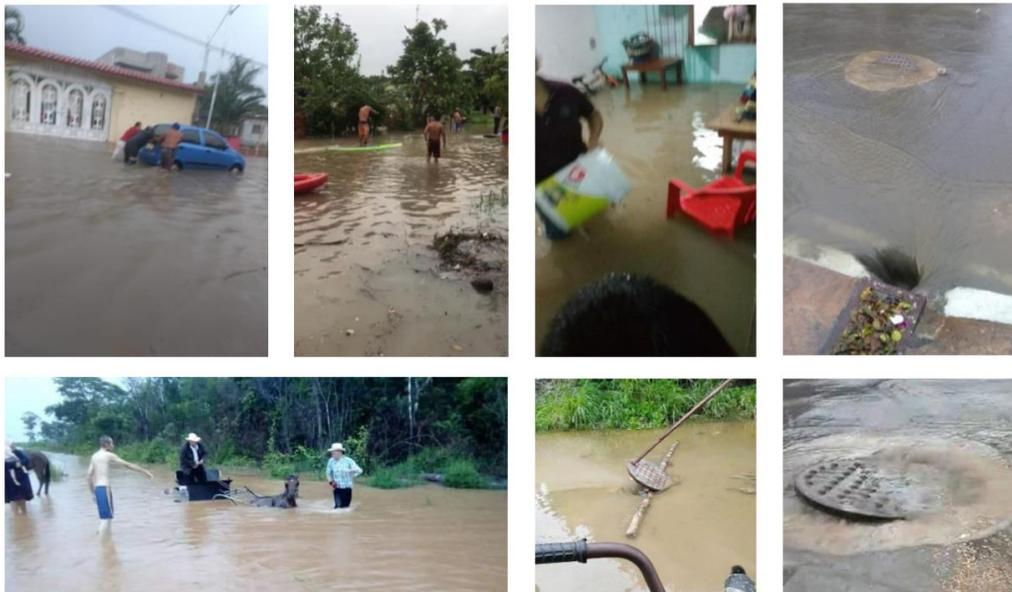
- Alto porcentaje de impermeabilización del territorio con asfalto, concreto y cemento; en consecuencia, se evita el flujo de agua hacia el acuífero, y se producen inundaciones severas (Figura 5). También se ocasiona que fluyan ríos por las calles, que a su paso recogen contaminación y la llevan a los cuerpos de agua que suelen funcionar como atractivos turísticos Figura 6.
- Lo anterior provoca la saturación de las redes de alcantarillado sanitario (que fueron diseñadas sólo para la descarga de agua residual), por lo cual, brotan aguas pluviales-cloacales (Figura 6). Además, se incrementa el efecto de isla de calor y de reflexión solar.
- Extracción de agua del acuífero con el riesgo de salinización del agua dulce por el efecto de succión de los pozos que "llama" o atrae físicamente al agua salada; la mezcla del 5 % de agua de mar con agua dulce inhabilita el agua para cualquier uso humano (Fernández Rubio y Baquero Úbeda 2006).

- Generalizada renuencia social a conectarse al sistema de drenaje de agua negra. En su lugar predomina el uso de fosas sépticas sin mantenimiento, situación que contamina el acuífero, cenotes y cuerpos de agua.
- Debido al relieve carente de elevaciones topográficas significativas, las obras de drenaje pluvial por gravedad deben ser diseñadas considerando velocidades muy bajas de flujo y una descarga ahogada por lo somero del nivel de aguas freáticas. Estas condiciones encarecen la inversión en obras de drenaje pluvial necesarias para desaguar los incrementos y la acumulación de las escorrentías.
- Incremento de residuos sólidos que obstruyen las infraestructuras de drenaje pluvial y contaminan las escorrentías urbanas y con ello, los cuerpos de agua.

¿Por qué se considera como punto clave las inundaciones y sus efectos?



Las lluvias con duración de 30 a 60 minutos son las que arrojan un índice de vulnerabilidad muy alta a las inundaciones en Chetumal (IMTA-CAPA, 2016); lo anterior se reitera con las curvas de “Intensidad, Duración” (IDT) procesadas para el presente estudio a partir de las 21 estaciones meteorológicas, que muestran que la mayor intensidad –con un periodo de retorno de 50 años- es de 490 mm/hora y sucede en los primeros 25 minutos (ese volumen precipitado equivale al doble... de lo que cae todo el año en la ciudad de Torreón, para que el lector se dé una idea del enorme volumen de agua).



MAPA DE INUNDACIONES Y POLIGONOS PROPUESTO DE PRESERVACIÓN DE VEGETACIÓN NATURAL

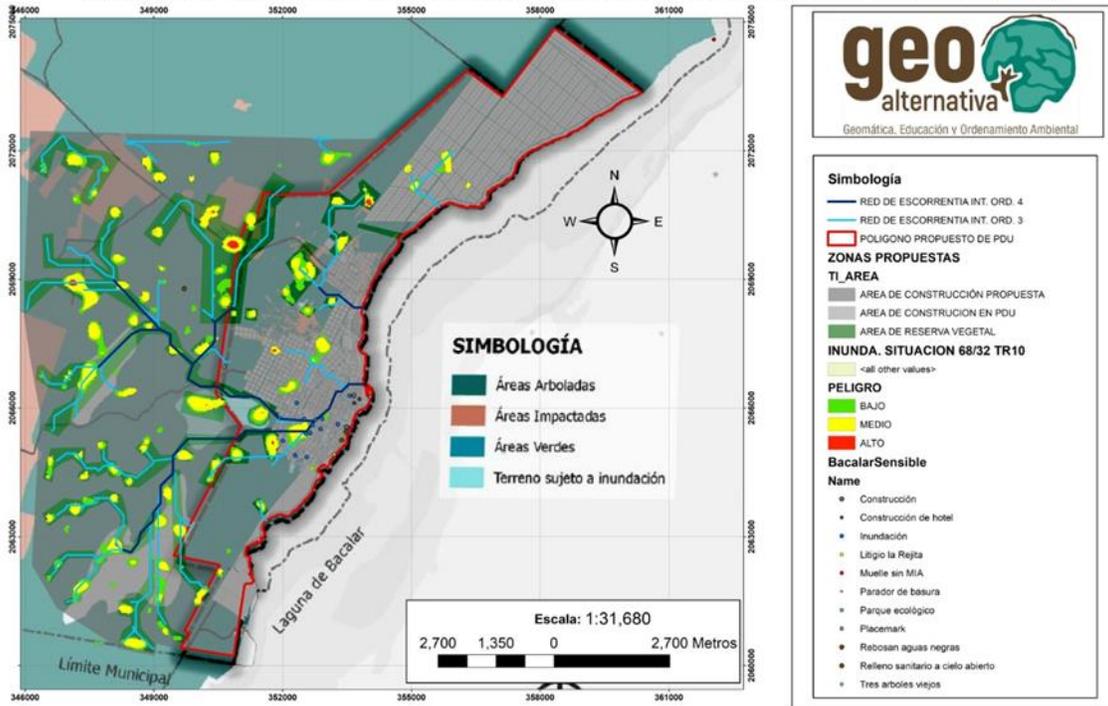


Figura 5 Sitios afectados por inundación y rebosamiento cloacal, registrados en junio 2018 en el Centro Urbano de Bacalar.

Finalmente, la ubicación de los rellenos sanitarios u otros espacios habilitados para el depósito de los residuos sólidos, cercanos a corrientes superficiales o subterráneas, está propiciando la infiltración de lixiviados, que están degradando zonas costeras, lagunares o arrecifales con alto potencial de explotación turística.

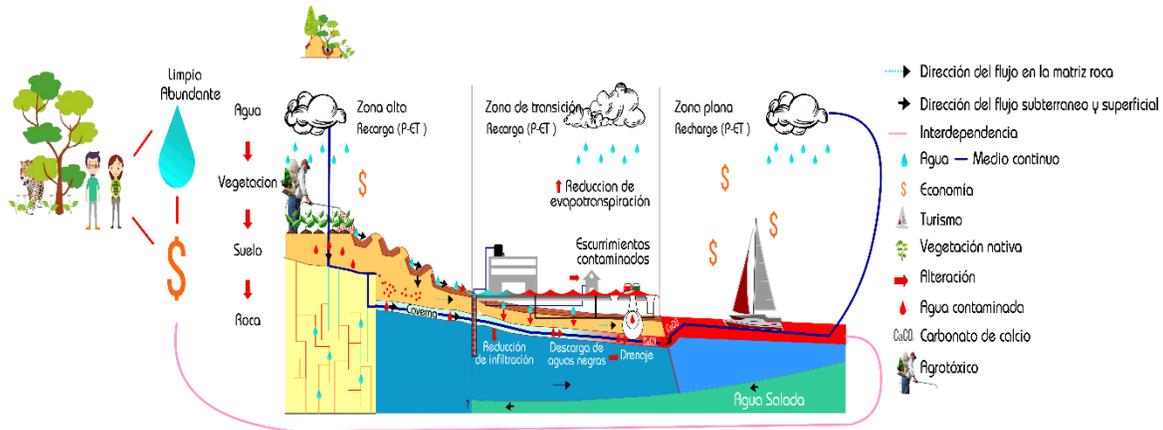


Figura 6 Modelo conceptual de vocación natural bloqueado por el medio urbano y vulnerable a actividades antropogénicas contaminantes, elaborado por CICY y ECOSUR.

Fuente: Ibarra-Madrigal 2019

Para dar solución a dicha problemática, el sector académico enfatiza los beneficios de consolidar los sistemas urbanos y productivos con base en los sistemas hidrológicos (Carrillo-Rivera, Cardona, Huizar-Álvarez, & Graniel, 2008); incluso es un paso fundamental hacia la resiliencia ante el cambio climático (Espíndola, 2014).

Propiciar la conectividad del flujo hidrológico ha sido ya una acción visibilizada en países desarrollados con modelos de urbanismo llamados Sensibles al Agua, una innovación arquitectónica del paisaje que considera múltiples mecanismos y adaptaciones para permitir la filtración y flujo del agua, privilegiando: el conjunto suelo-vegetación, los sistemas de captación y reutilización de agua de lluvia y la recarga de los acuíferos (Gleason-Espíndola, 2016)

Antecedentes

Los principios para la planificación que se emiten en el presente, aplican para el estado de Quintana Roo al sureste de México, especialmente a los municipios de Othón P. Blanco y Bacalar y sus localidades (ver Figura 7 y 8), cuya actividad económica predominante es de servicios institucionales, actividades productivas primarias y turismo (H. Ayuntamiento de Othón P. Blanco, Quintana Roo. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano., 2018).

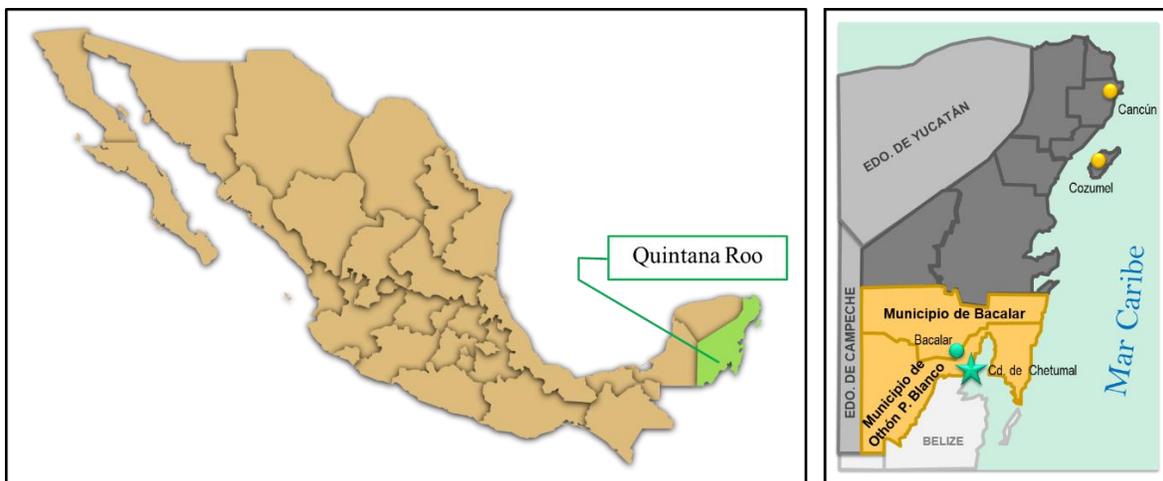


Figura 7 Croquis de localización macro del Edo. de Quintana Roo en la República Mexicana (izquierda) y de los municipios de Bacalar y Othón P. Blanco (derecha).

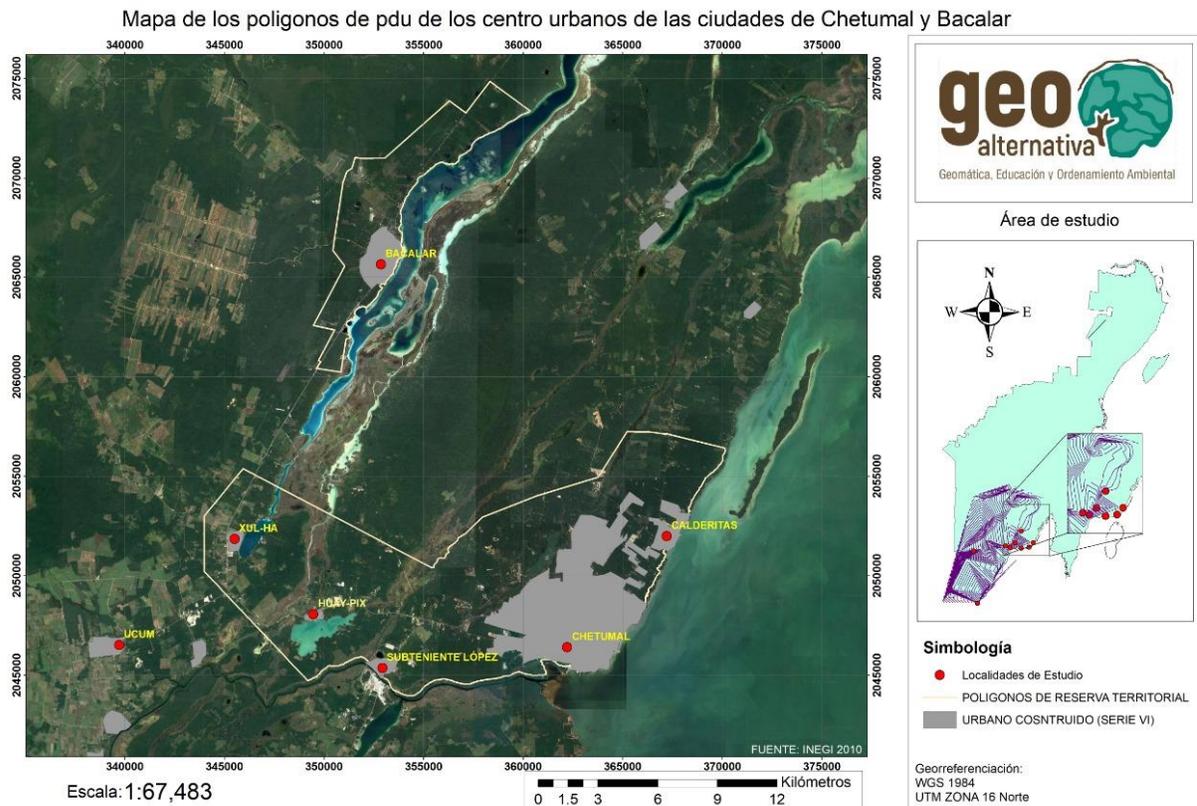


Figura 8 Mapa de ubicación y delimitación de los polígonos de ámbito y reserva territorial de los Planes de Desarrollo Urbano de las ciudades de Chetumal y Bacalar; incluye ubicación y manchas urbanas de las localidades en la actualidad.

Fuente: Elaboración propia con información de (H. Ayuntamiento de Othón P. Blanco, Quintana Roo. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano., 2018), (SEDETUS; H. Ayuntamiento de Bacalar, en prep.) (INEGI, 2016) y (Google; INEGI; DigitalGlobe, 2019).

Marco contextual ¿qué impulsó este documento?

Investigadores del Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), en conjunto con el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), elaboraron en 2018 y 2019 un modelo que ilustra la vocación natural del sistema cárstico (Ibarra-Madrigal, 2019) con base en la definición legal que establece que la vocación natural son "las condiciones de un ecosistema para soportar actividades sin alterar las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que hacen posible el desarrollo del ser humano y los demás seres" (LGEEPA art. 3, fracciones XII y XXXVI).

Basado en ello, la gestión por la planificación territorial y las investigaciones académicas desembocaron en un concepto acuñado a nivel internacional como Ciudad Sensible al Agua (en lo sucesivo CSA) y Diseño Urbano Sensible al Agua (en

lo sucesivo DUSA). Esto fue presentado en el seminario "Planificación territorial sensible al agua" en la ciudad de Bacalar, en octubre de 2018, con la presencia del Centro de Diseño y Comunidades Sensibles al Agua (CESDICOSENA), adscrito al laboratorio de vivienda y comunidades sustentables del CONACyT.

Los acuerdos derivaron en una agenda para esclarecer y especificar las implicaciones aplicadas al sistema cárstico de Quintana Roo gracias a la apertura y visión del gobierno del estado a través de la Secretaría de Desarrollo Territorial y Urbano Sustentable (SEDETUS) y la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente (SEMA) y en apoyo de la Asociación de Hoteles y Restaurantes de Bacalar, GEO A.C. y otros actores del sector sociedad civil.

¿Qué es una Ciudad Sensible al Agua y en qué etapa se encuentra el estado?

Una Ciudad Sensible al Agua es aquella vivible, resiliente, sustentable y productiva que funciona como captadora de agua, provee servicios ambientales e incluye comunidades perceptivas al entorno de la naturaleza, a partir de lo cual se construye un modelo basado en preservar la conectividad del ciclo del agua, lo que deriva en una baja inversión en energía de movimiento de agua por provisión o para su descarga, en implementar estrategias de manejo integral para disminuir la contaminación y las inundaciones, y el efecto es una mejor calidad de vida de las personas residentes (Gleason-Espíndola, 2016).

La International Water Association (*Asociación Internacional del Agua*, en lo sucesivo IWA) ha identificado 4 niveles de acción para la implementación de una CSA: regeneración, diseño urbano sensible al agua, personas sensibles al agua y conectividad del flujo del agua y personas.

A la par, (Brown, Keath, & Wong, 2009) han analizado 6 fases de evolución en una ciudad (ver Figura 9): en las primeras 3 fases se implementa un manejo no integral y no se generan ciudades resilientes: 1) suministro de agua, 2) alcantarillado y 3) ciudad drenada. En cambio, tres etapas más, hablan de una gestión pública más avanzada con una visión integral: 4) ciudad de cursos de agua, 5) ciclo del agua y 6) sensible al agua.

Es factible, entonces, identificar la etapa actual de las ciudades de Quintana Roo y establecer estrategias para lograr un *leappfrogging*, es decir, un salto de las primeras tres etapas a las etapas finales, al implementar nuevas tecnologías e

innovaciones, lo cual suele ser incluso más factible en países en vías de desarrollo que en los desarrollados.

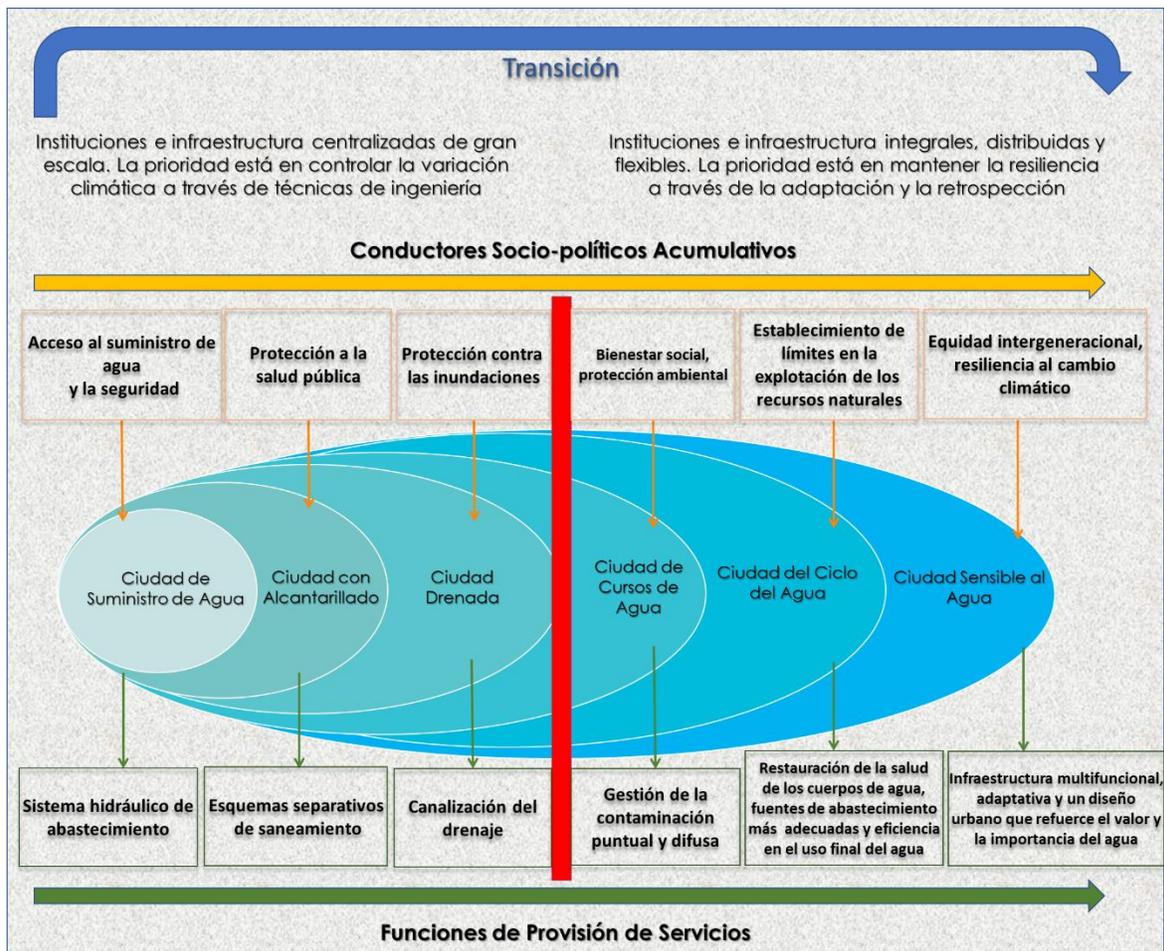


Figura 9 Transición entre fases, desde una ciudad con un sistema proveedor centralizado hacia una ciudad sensible al agua. **¡Error! Marcador no definido.**

Quintana Roo opera actualmente con un fuerte enfoque en las primeras tres fases, un sistema institucional paternalista y centralizado, con una comunidad que espera servicios eficientes, asequibles e incabables, cuya responsabilidad de construcción y gestión recae únicamente en el gobierno. Esto representa grandes inversiones energéticas y económicas para abastecer la demanda, pues se centran los esfuerzos en la implementación de obras hidráulicas que canalizan, transportan, contienen, separan y descargan el agua, pero no alcanzan a dar solución a inundaciones, abasto, sequías y contaminación.

Afortunadamente, es más fácil innovar que restaurar, adaptar territorios cuyas ciudades no están del todo desarrolladas, y así, avanzar rápidamente en el proceso

hacia una CSA² a través del “leapfrogging”: encontrar nuevas formas de diseñar la infraestructura y ser sustentables al implementar nuevas tecnologías, distribuir el territorio urbano, en busca de evitar los errores y limitaciones que representa la ruta convencional de desarrollo en ciudades (ver Figura 9) (Jefferies & Duffy, 2011) y (Brown, Rogers, & Werbeloff, 2016).

De este modo, se trata de diseñar espacios públicos e infraestructura hidrosanitaria con base en el funcionamiento del sistema natural. equilibrar el sistema artificial con espacios en condiciones naturales, aumentar el número de sistemas de tratamiento de agua descentralizados, disponer corredores verdes en red, disminuir la extracción de agua del acuífero y permitir su recarga sin impermeabilizar el suelo, y priorizar la captación de agua de lluvia.

La zona de estudio del presente analiza de forma regional, a pequeña escala, el funcionamiento del sistema hidrológico que abarca los municipios de Othón P. Blanco y Bacalar, pero ofrece aplicaciones prácticas con base en el caso de estudio del Centro Urbano de Bacalar, realizado a una escala de mayor precisión.

En estos trabajos...

Se esclarecieron las aplicaciones del concepto Ciudad Sensible al Agua, con base en la determinación del coeficiente infiltración/escorrentía del sistema cárstico como línea base, se estipularon sistemas constructivos sensibles al agua particularmente para espacios públicos. Se determinó la distribución y proporción de espacios permeables/impermeables, se realizó una valoración económica de continuar con la tendencia en construcción de los sistemas urbanos acostumbrados.

² En estas etapas avanzadas se encuentran ciudades como: Tel Aviv, Israel; Beijing, China; Belo Horizonte, Brasil; Zaragoza, España; Lodz, Polonia; Birmingham, Inglaterra; Hamburgo, Alemania; Dunedin, Nueva Zelanda y Melbourne, Australia. (Brown, Keath, & Wong, 2009).

Congruencia de la Ley de Asentamientos Humanos y Desarrollo y La Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

La planificación territorial sensible al agua impulsa el cumplimiento de la Ley de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano del estado de Quintana Roo, cuya reforma en 2018 tuvo como objetivo fundamental integrar las políticas públicas en materia medioambiental y desarrollo urbano-territorial. Así, de forma conjunta la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente y la Secretaría de Desarrollo Urbano Territorial Sustentable, en coordinación los ayuntamientos municipales y otros sectores sociales, ejercen las disposiciones de dicha ley. En esta ley se determina que el eje vertebral de los instrumentos para la gestión del uso del suelo son el bien común, el medio natural, el espacio público y los equipamientos; la determinación de las normas básicas para la prevención de riesgos con el objetivo de garantizar la seguridad de los habitantes y sus bienes. Esto facilita el derecho de toda persona al disfrute de ciudades sustentables, seguras y resilientes. Se instituye la promoción prioritaria del manejo integral del agua y los recursos naturales, sin rebasar la capacidad de carga, con estrategias que logren la preservación de manglares y cenotes (DOF Art. 3ª Fracción XIV; POE 2018 art. 1,3,7,8 y POE 2001, art. 15)

El Ordenamiento Territorial y el Desarrollo Urbano tenderán a propiciar el bienestar social, instrumentar acciones que permitan centros de población seguros mediante la prevención de la ocupación de zonas de riesgo, proclives a inundaciones, lo que obliga a considerar la vocación del suelo para el cálculo de las áreas urbanizables y áreas de cesión, para lo cual se puede llegar a ejercer la facultad de implementar estrategias de reagrupamiento parcelario. Esto se debe a que son materia de interés metropolitano la restauración y preservación del equilibrio ecológico, la gestión integral del agua y los recursos hidráulicos, incluso el agua potable, drenaje, saneamiento, tratamiento de agua residual, recuperación de cuencas hidrográficas y aprovechamiento de aguas pluviales.

Con todo ello, la Planificación Sensible al Agua, cuya justificación y método considera el presente documento, apoya a los instrumentos de gestión para el desarrollo metropolitano, que buscan dar cumplimiento a objetivos como el manejo integral y sustentable de los recursos hídricos, la reducción de riesgos que provocan los fenómenos naturales potenciados por el mal manejo del territorio, la promoción de la integración medioambiental sustentable del territorio y el paisaje

-mantener sistemas de corredores biológicos y de preservación ecológica-, todo esto encaminado a construir un entorno humano seguro, saludable, vivible y sustentable (Art. 1, 2, 5, 7, 8, 10, 46, 47, 54, 71).

La Ley General de Equilibrio y Protección al Ambiente (LGEEPA) establece la vocación natural como la base de los procesos que sostienen la vida en sus diversos aspectos; si se desglosan las definiciones de los conceptos mencionados se entiende por

Vocación natural "las condiciones de un ecosistema para soportar actividades sin alterar las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que hacen posible el desarrollo del ser humano y los demás seres" (LGEEPA art. 3, fracciones XII, XIV y XXXVI) (figura 4 y 6).

Objetivos del presente documento

- Facilitar y guiar el desarrollo de elementos Sensibles al Agua en obras estratégicas y distribución de espacios para centros urbanos del sur de Quintana Roo.
- Establecer la proporción área permeable/área impermeable que debe seguirse en la planificación adecuada del territorio, en vías de la disminución de inundaciones y sus efectos en riesgo y contaminación, para lo cual se usa como estudio de caso el centro urbano de Bacalar.
- Brindar principios útiles para la planificación territorial, en vías de salvaguardar la vocación natural del sistema cárstico.
- Mostrar el costo-beneficio de la aplicación de tecnologías y estrategias sensibles al agua, con una valoración económica de las inundaciones y sistemas alternativos de tratamiento de agua.

Método para la generación de los principios para la planificación territorial del sistema cárstico

Se esclarece el concepto Territorio Sensible al Agua derivado del concepto de vocación natural y equilibrio ecológico del sistema kárstico (Ibarra-Madrigal 2019), con enfoque en el área de influencia de la Laguna de Bacalar (Figura 2) y con base en el estudio de caso en el centro urbano de Bacalar, sin embargo, las obras, estrategias y principios aquí enunciados, son aplicables de forma adaptativa a

todo el territorio, y de forma indispensable deben considerarse para las áreas de influencia de las siguientes localidades:

- Calderitas
- Chetumal
- Mahahual
- Álvaro Obregón
- Sergio Buitrón Casas
- Nicolás Bravo
- Javier Rojo Gómez
- Xul-Ha
- Buena Vista
- Huay Pix
- Todo el municipio de Bacalar

Estudio de caso, el centro urbano de Bacalar

El presente ofrece el estudio aplicado al centro urbano de Bacalar planteado sobre la propuesta de PDU (SEDETUS; H. Ayuntamiento de Bacalar, en prep.) como ejemplo de lo que es posible y es debido desarrollar en toda el área; el método en extenso puede consultarse³ pero se exponen aquí los pasos de forma concisa:

- I. Se establecen las definiciones:
 - a. **Proporción área permeable- impermeable suficiente:** se refiere a aquella proporción que, dada su capacidad filtrante, permita evitar inundaciones en 30 minutos de lluvia modelada a un periodo de retorno de 10 años.
 - b. **El área impermeable** se compone del equipamiento urbano o conjunto de inmuebles, instalaciones, construcciones y vialidades que restringen la infiltración del agua de lluvia al subsuelo.
 - c. **El área permeable** se compone por el conjunto vegetación-suelo en su estado natural y por infraestructura urbana sensible al agua, diseñada y distribuida estratégicamente acorde a una modelación hidrodinámica (con detalle en centímetros o milímetros) para conformar una red, en donde se logre la infiltración efectiva del agua al subsuelo.
- II. Cálculo de lluvias y generación de curvas precipitación-duración-periodo de retorno a 2 y 10 años, con información de las estaciones meteorológicas de la CONAGUA.

³ <http://www.geoalternativa.com/acervo3.php>

- III. Determinación del coeficiente de escorrentía con la implementación de un modelo generado por el Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos, el cual depende de las condiciones de retención de humedad edáfica, tipo de suelo y cubierta vegetal. Por medio de la herramienta en línea Green Values™ se estimaron los coeficientes de curvas **CN** que el software IBER reconoce como **coeficiente dinámico de escorrentía**.
- IV. Establecimiento de la línea base de escorrentía en el estado natural del territorio, llamado aquí, **reserva territorial**. Para ello se consideró el uso de suelo (serie VI INEGI) de la zona actualmente no urbanizada (3,565.15 ha) en el polígono de crecimiento que propone el PDU de Bacalar (ver Figura 10) (SEDETUS; H. Ayuntamiento de Bacalar, en prep.)
- V. Construcción de 5 situaciones de diversa proporción permeable/impermeable y con ello se modelan escenarios aplicados al centro urbano de Bacalar.
- VI. Dimensionamiento de 3 sistemas constructivos sensibles al agua, aplicables a las situaciones urbanas mencionadas en el punto anterior (IV).
- VII. Modelación de escenarios de inundación de las 5 situaciones, con y sin sistemas constructivos sensibles al agua, utilizando el software IBER 2.4.3, combinado con el manejo de imágenes ráster y vectoriales, y levantamientos topográficos, con fuentes de información de:
 - a. el Instituto Geográfico Y Catastral del Estado de Quintana Roo (IGECE).
 - b. archivos ASTER (Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) de la plataforma digital de consulta de la NASA.
 - c. levantamientos topográficos realizados en la zona urbana con equipo de nivel y GPS con precisión milimétrica, otorgado por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado, gerencia Bacalar (CAPA, 2019).
 - d. información geográfica de fotogrametría de Google, INEGI y DigitalGlobe escala 1: 20,000 (2018-2019).
- VIII. Comprobación del riesgo de inundación y escorrentía artificial hacia la laguna de Bacalar en los diversos escenarios de modelación.

Dicho mapeo se generó para prevenir que el desarrollo poblacional futuro cause conflicto con las escorrentías generadas por la impermeabilización del suelo, además de propiciar las bases para comprender las regiones de posible inundación que podrían generarse a causa del desbalance hidrológico; también se buscó desarrollar un modelo de ciudad con una distribución y estrategias que permitan la continuidad del ciclo del agua atmosférica-superficial-subterránea y con ello se disminuya la alteración de las características que propician el entorno lagunar, la economía y a la calidad de vida de la población de Bacalar.

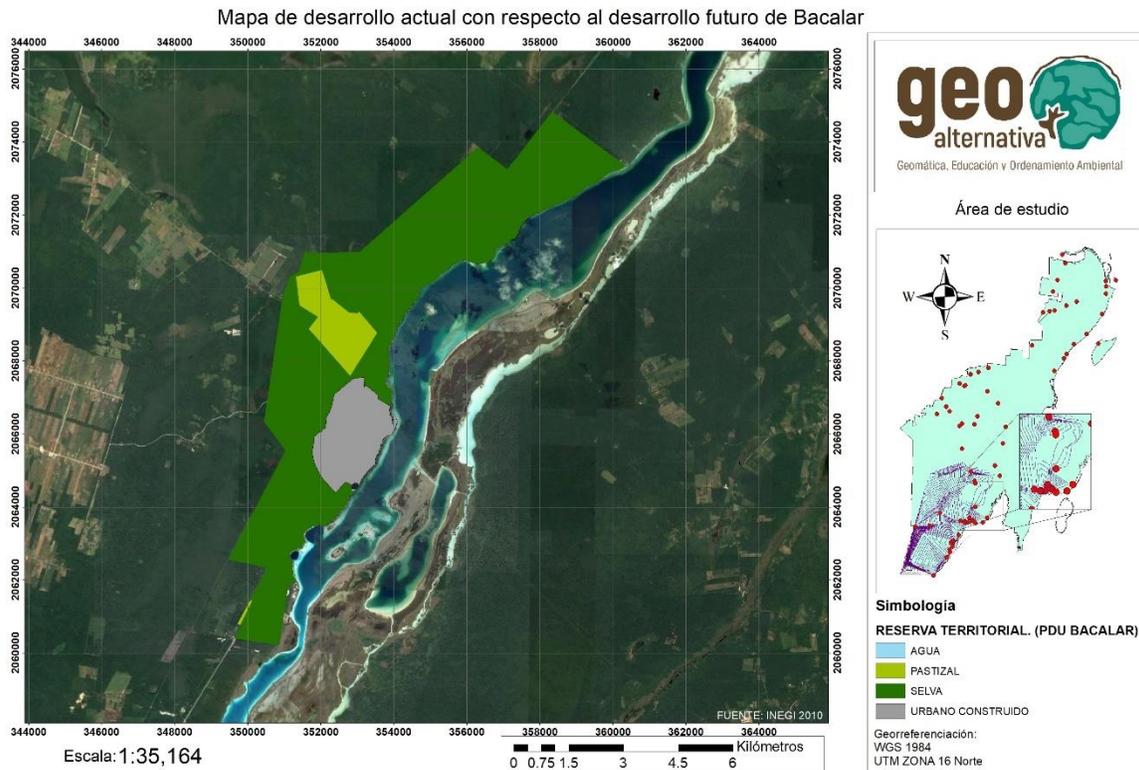


Figura 10 Imagen satelital con polígono propuesto para el desarrollo del Centro Urbano de 4,000 Ha, se observa el área actualmente urbanizada de 433.78 Ha.

Fuente: Elaboración propia con información de (Google; INEGI; DigitalGlobe, 2018-2019), (INEGI; Serie VI, 2010).

En el caso de Bacalar se construyeron ocho escenarios de modelación, a los cuales se colocaron los coeficientes obtenidos de las situaciones urbanas caracterizadas, como se ilustra en la siguiente Figura 11.

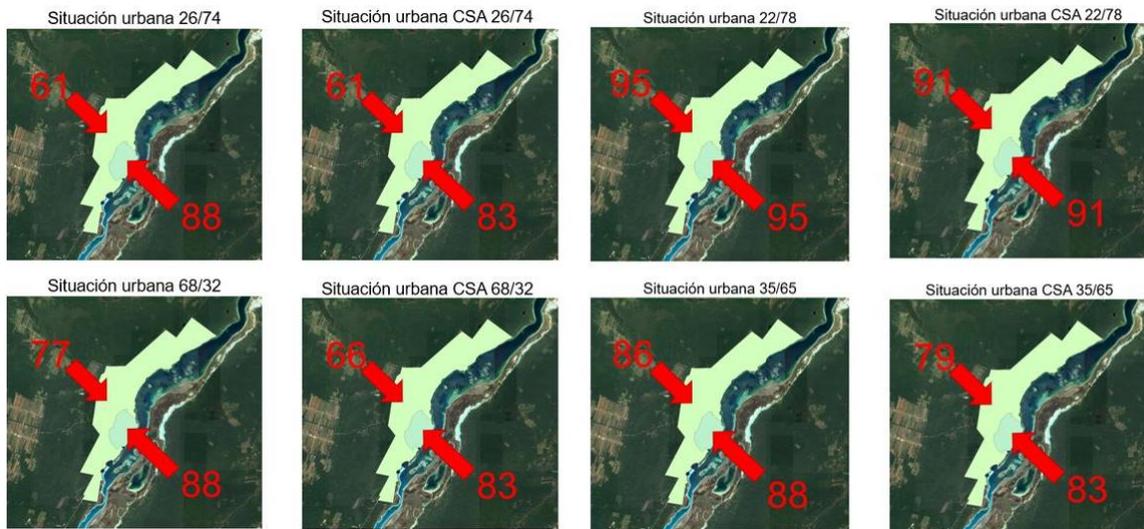


Figura 11 Escenarios de modelación para los polígonos Urbano Construido y Reserva Territorial del PDU Bacalar (coeficientes de escurrimiento en rojo para cada polígono). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11 se muestran los escenarios del área considerada en el PDU de Bacalar, en ella se consideran cuatro 'Situaciones Urbanas', en las que se basan las modelaciones sin infraestructura CSA y con infraestructura CSA, resultando ocho modelaciones en total. Estas se describen a continuación.

Modelo 'Situación Urbana 26/74'	Modelación de dos situaciones con los coeficientes CN=61 y CN=88 del estado actual de desarrollo urbano, que reflejan las condiciones prevalecientes en la reserva territorial y en la zona urbana construida, respectivamente.
Modelo 'Situación Urbana CSA 26/74'	Análogo a la modelación anterior, trabaja con los coeficientes de estado actual de desarrollo urbano y de reserva territorial posteriores a la aplicación de infraestructuras de CSA, CN=61 y CN=83.
Modelo 'Situación Urbana 22/78'	Esta modelación está compuesta por una situación crítica (CN=95), con una proporción 22/78, en la que tanto la zona urbana construida como la reserva territorial se desarrollan desmedidamente sin atender el balance área permeable y área gris.
Modelo 'Situación Urbana CSA 22/78'	Análogo a la modelación anterior, ésta trabaja con una situación crítica posterior a la implementación de infraestructura de CSA (CN=91).
Modelo 'Situación Urbana 35/65'	Esta modelación utiliza dos coeficientes del estado actual de desarrollo urbano, CN=86 y CN=88, el primero refleja la situación en la que la reserva territorial se desarrolla con una proporción 35/65, mientras que el segundo refleja la situación actual de desarrollo urbano con una proporción 26/74.
Modelo 'Situación Urbana CSA 35/65'	Este modelo refleja la situación posterior a la aplicación de las infraestructuras de CSA tanto en la zona urbana construida (CN=83) como en la reserva territorial con proporción 35/65 (CN=79).
Modelo 'Situación Urbana 68/32'	La modelación representa el estado ideal en el que se aplican principios de desarrollo urbano que permitan un desarrollo para la reserva territorial con una proporción 68/32 (CN=77), mientras que la correspondiente a la zona urbana construida es la situación de desarrollo actual no aumenta, sino que se mantiene (CN=88).
Modelo 'Situación Urbana CSA 68/32'	Este modelo considera los mismos criterios que el anterior, pero con la implementación de infraestructuras de CSA, alcanzando un CN=66 para el desarrollo de la reserva territorial y un CN=83 para el desarrollo de la zona urbana construida con aplicación de infraestructura CSA.

Inundaciones y Establecimiento de Índice de Peligrosidad Local

De acuerdo con el fascículo de inundaciones elaborado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED; Salas-Salinas, Marco A.; Jimenez-Espinosa, Martín, 2014), la clasificación más común de las inundaciones es con respecto a su origen o el tiempo que tardan en presentarse sus efectos.

De acuerdo con su origen:

Esta clasificación se refiere a las causas que originaron la inundación. Uno de los tipos más comunes es:

La inundación pluvial: se presentan cuando las lluvias han sobrepasado la capacidad de absorción o infiltración del suelo, por lo que el agua empieza a acumularse, permaneciendo horas o incluso días en el sitio. Se caracteriza por la acumulación del agua de lluvia en la zona donde precipita y por escurrimientos locales.

Una vez que se comienzan a producir inundaciones, sus efectos conllevan diversos grados de peligrosidad, en el presente documento se ofrecen los mapas de riesgo por inundación.

Para esta investigación se utilizaron criterios correspondientes a la pertinencia de la zona de estudio:

Se consideró que de 0 a 0.25m se puede clasificar como encharcamiento, que causa disminución en la velocidad del tránsito vehicular, pero que no provoca pérdida en el valor de los inmuebles ni del menaje.

Peligro Bajo: 0.25m a 0.50m; se consideró su límite inferior en función de las alturas de los predios y banquetas con respecto a las calles para la zona de estudio y su límite superior en la altura del menaje que resulta afectado.

Peligro Medio: 0.50m a 1.50m; se consideró su límite inferior en función del menaje afectado y su límite superior en consideración a la altura promedio de los habitantes de la zona.

Peligro Alto: Mayor a 1.50m; en consideración a que, superado este límite, existe un alto riesgo de que el habitante promedio de esta zona pierda la vida.

Debido a que las precipitaciones producen escurrimientos de baja velocidad, ya que la zona de estudio tiene un relieve sensiblemente plano, prescinde de la variable de velocidad, en la definición de los riesgos.

Valoración económica

El proceso de valoración económica distingue 3 etapas: primero la identificación, segundo la cuantificación y valoración de los daños que se presentarían considerando diversos escenarios (ver Tabla 1) -en los cuales se hace variar la superficie permeable y se considera que el desarrollo del área urbano no tiene acciones para tener una ciudad sensible agua-, y tercero, se consideran para esas mismas variaciones de área su incorporación a sistemas para hacerlas sensible al agua.

Tabla 1 Variación de CN o relación área verde/área gris en escenarios de desarrollo urbano para Bacalar.

Situación Urbana 26/74	Situación Urbana 68/32	Situación Urbana 35/65	Situación Urbana 22/78
CN	CN	CN	CN
61	77	86	95

Fuente: Elaboración propia

Valor actual de los beneficios de acciones sensibles al agua

Para estimar el Valor Actual de los beneficios por las acciones sensibles al agua, se efectuó un cálculo de perpetuidad, considerando que los beneficios por la aplicación de acciones sensibles al agua se mantienen a lo largo del tiempo. Esto se expresa en la siguiente fórmula:

$$VAB = \frac{AAD}{r}$$

Donde VAB es el valor actual de los beneficios, AAD el ahorro anual por daños y r la tasa social de descuento requerida por Secretaría de Hacienda y Crédito Público para evaluar proyectos del sector público.

Identificación de daños

Los daños identificados en una inundación dependen de diversas variables; los identificados en la mayoría de las poblaciones en México (CONAGUA, 2015) son: daño en propiedades y actividades productivas, costos en organismos públicos, terrenos inundables, deterioro de vialidades, Costos Generalizados de Viaje (CGV), ausentismo laboral y escolar, gastos de emergencia y limpieza, costo por

enfermedad y costo por molestias a las personas. Sin embargo, ello implica un estudio detallado del lugar para conocer cuáles son los que se presentan. Debido a que la mayor parte del área de análisis considera una superficie que aún no está poblada, únicamente se estiman los daños en vivienda generados por diferentes tirantes de agua.

Cuantificación de daños

Para la cuantificación de daños se estimó el área afectada por los diferentes tirantes que se forman por la acumulación de agua debido a la variación de la superficie permeable y partiendo de la premisa que de 100% de la superficie a desarrollarse en la propuesta del Plan de Desarrollo Urbano de Bacalar se dividirá en los siguientes aprovechamientos: 60% en edificaciones (edificios y vivienda), 30% en vialidades y 10% en área de donación.

Valoración de daños

La valoración de daños se realizó considerando las ecuaciones propuestas por un grupo de expertos (Ceballos-Bernal, Baró-Suárez, & Díaz-Delgado, 2016), en las que determinan las curvas de inundación-daño para diferentes tipos de vivienda y cuyo resultado se estima en salarios mínimos. Debido a que no se conoce el tipo de vivienda ni demás usos de suelo que se tendrán, se considerarán únicamente viviendas de una planta y la valoración de daños se obtendrá mediante la expresión:

$$DDHmp = 685.51 \ln (h) + 1913.15$$

Donde:

DDHmp: Daño más probable

Ln(h): Logaritmo natural de la altura del tirante (m)

Daños anuales esperados

Los daños anuales, al ser un evento probabilístico, se estimaron, como lo sugiere la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015), como el inverso del período del retorno multiplicado por el costo del daño para cada relación área verde/área gris para ese tipo de lluvia, por lo que en la Tabla 2 se puede observar dicha acción.

Tabla 2 Daños Anuales Esperados

Daños (Millones de SM)	Período de Retorno (Años)	Probabilidad	Daño Anual Esperado
Cifra 1	2	0.5%	Cifra 1 x Probabilidad
Cifra 2	10	0.1%	Cifra 2 x Probabilidad
			Sumatoria

Fuente: Elaboración propia

Resultados

La proporción área permeable/impermeable suficiente, se refiere a aquella proporción que, dada su capacidad filtrante, permita evitar inundaciones en 30 minutos de lluvia.

La línea base

Reserva territorial, conjunto vegetación-suelo en su estado natural con un CN de 61. De las 3,565.15 ha no urbanizadas en el polígono propuesto en el PDU de Bacalar (en prep.), 81.78% es selva, 7.33% es pastizal y 0.02% son superficies de cuerpos de agua, sin superficies impermeables. En esta condición, a un Tr 10, **el proceso de escorrentía mayor a 2 cm e inundaciones tarda 1 hora y 8 minutos.**

Estado actual en la ciudad de Bacalar: 26 permeable/74 impermeable.

Características de la zona urbana en situación actual de Bacalar, extrapoladas a toda la zona urbana proyectada en el PDU (en preparación) con una proporción de 34.52 % permeable y 65.48 % impermeables, arroja un **CN de 88** y el tiempo del **proceso de escorrentía mayor a 2 cm y comienzo de inundaciones es de 16 minutos**, igual para un Tr 10.

Proporción suficiente con base en la vocación natural del sistema cárstico: 68 permeable/32 impermeable.

Esta situación urbana plantea una distribución hipotética con una proporción de 68 % área permeable basadas en reserva territorial + sistemas constructivos sensibles al agua, y 32 % áreas impermeables, lo que arroja un **CN de 77**, que refleja una superficie urbana predominantemente “verde, espaciosa y filtrante”. Ésta sólo puede aplicarse al área no urbanizada actualmente, puesto que en la distribución de espacios urbanos actuales no tiene cabida. **El proceso de escorrentía mayor a 2 cm y comienzo de inundaciones es de 30 min 30 s**, para un Tr 10 años.

Sobre la relación situación urbana/inundaciones

Como es apreciable en la siguiente Tabla 3, de acuerdo con las modelaciones, conforme incrementa el valor del coeficiente de escorrentía CN disminuye el tiempo en que inician las inundaciones.

Tabla 3 Tiempo de inicio del aumento de escorrentía e inundación según situación urbana.

Situación Urbana (SU)	% Área Permeable	% Área Impermeable	CN	Tiempo de inicio de las inundaciones	CN	Tiempo de inicio de las inundaciones
			s/CSA		c/CSA	
Reserva Territorial	(81.78% selva, 7.33% pastizal y 0.02% agua)		61	1 hora 8 min	No Aplica	No Aplica
68/32	67.61%	32.39%	77	20 min 30 s	66	30 min 30 s
35/65	34.52%	65.48%	85	15 min 50 s	79	19 min 10 s
26/74	26.36%	73.64%	88	14 min 10 s	83	17 min 12 s
22/78	22.41%	77.59%	95	10 min 30 s	91	12 min 50 s

Fuente: elaboración propia con base en los escenarios de modelación determinados en la presente investigación.

Mapa de Escurrimiento superficial de zonas externas de la localidad de Bacalar.

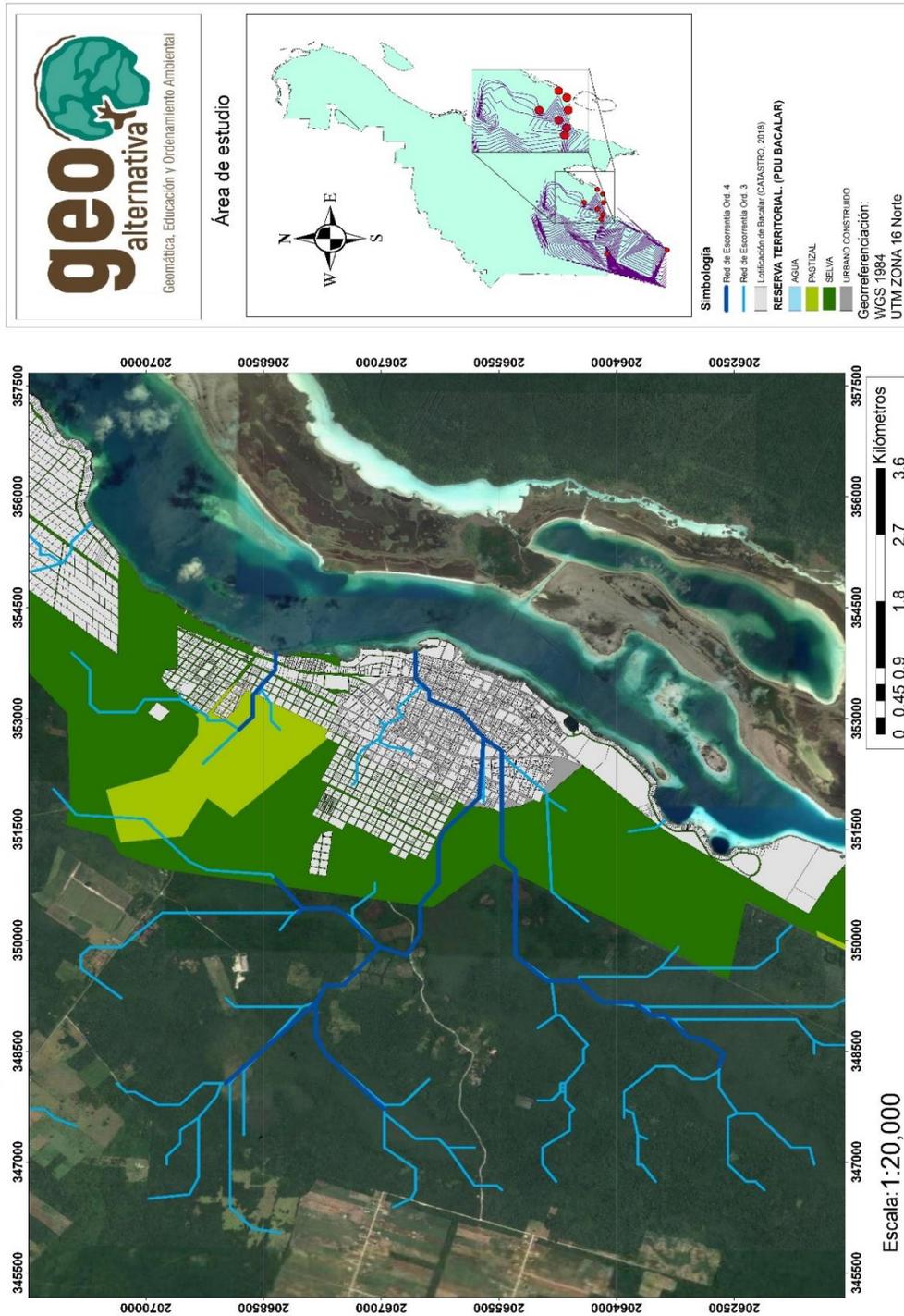


Figura 12 . Escorrentía superficial de Bacalar a Escala 1:20,000.

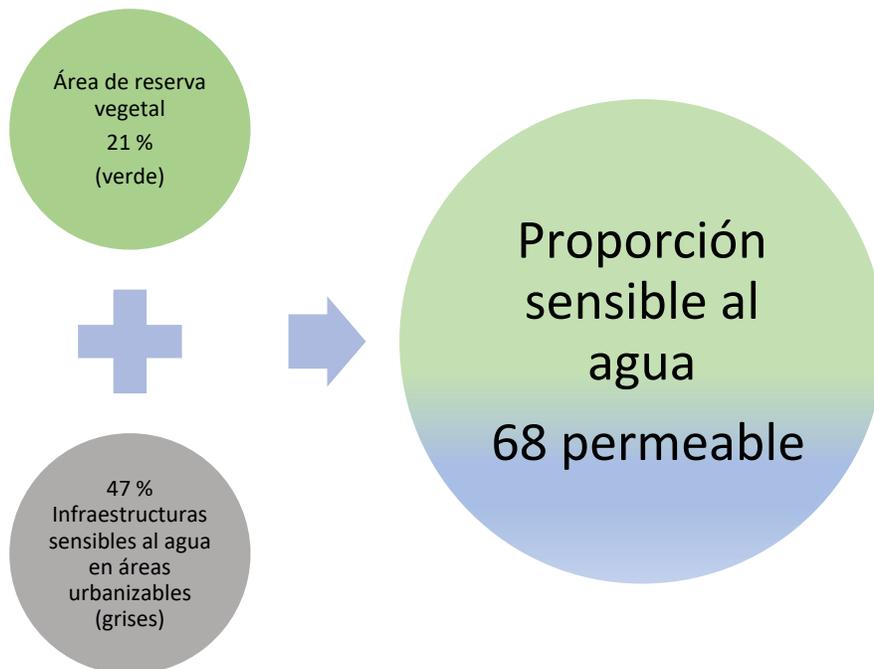
Fuente: Elaboración Propia.

La distribución de los espacios entre lo urbano y el medio natural para lograr una configuración holgada y reticular, es indispensable para la reducción de riesgo de

inundación, encontrar el equilibrio entre las superficies permeables e impermeables.

Además de alcanzar la proporción 68 % área permeable/ 32 % área impermeable, se debe ponderar la distribución de las zonas a urbanizar y las zonas de reserva. Por ejemplo, para el estudio en Bacalar, en el hipotético caso de que el crecimiento urbano fuera hacia el oeste, las líneas de escorrentía que se muestran en la Figura 12 se engrosan en un polígono de inundación posible, y la resultante de la reserva de corredores verdes sería la distribución mostrada en la Figura 13.

Estas áreas de corredor verde representan el 21 % del área total y la urbanización debe entrelazarse con ésta, instalando la infraestructura necesaria para permitir el flujo del agua en la horizontal, con puentes, pasos de agua, palafitos y construcciones sobre pilotes elevados a partir del suelo, etcétera. Y en la vertical hacia el acuífero, asegurando el logro del restante 47 % permeable con infraestructuras sensibles al agua y áreas verdes dentro de los predios particulares.



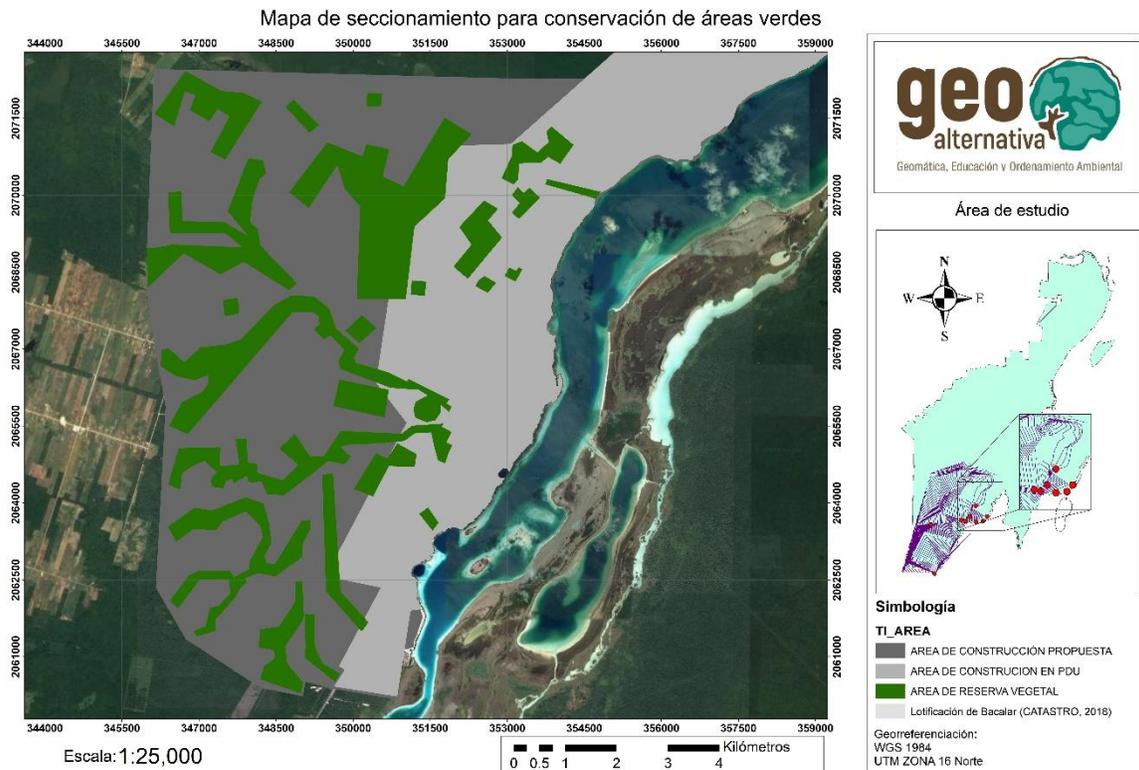


Figura 13 Zonas de reserva territorial, con base en la modelación hidrodinámica Tr 10. Fuente: Elaboración propia.

Valoración económica de inundaciones y sobre inversión en sistemas de tratamiento primario in-situ

Sin acciones para hacer sensible una ciudad al agua, el valor de los daños incrementa si se descuida la relación área verde/área gris esperada para Bacalar.

La implementación de acciones de sensibilidad al agua reduce considerablemente los daños en todos los escenarios realizados.

La relación área verde/área gris que más ahorros genera es 68/32 con 1.11 millones de salarios mínimos al año. Por lo que esa relación pudiera ser la que económicamente sea más conveniente de implementar.

Existirá un daño por las descargas de agua pluvial al sistema de drenaje convencional en tanto la población no sea consciente de ello. Y pudiera ser conveniente analizar sistemas individuales de tratamiento de las aguas residuales, ya que cuando las personas tienen un sistema propio no se incurren en esas prácticas.

Fundamentos para la planificación territorial del sistema cárstico

Cabe reiterar que...

...para el presente se tomó el caso de estudio Bacalar, pero es aplicable por lo menos a zonas urbanizables de los municipios de OPB y Bacalar porque se basan en el funcionamiento del sistema cárstico.

El principio básico para la planificación territorial en el sistema cárstico, es la conectividad estructural y funcional (vertical y horizontal) del agua con la vegetación, el suelo y el componente geológico. Por lo tanto, toda obra o actividad que la altere con contaminación u obstrucción del flujo, es contraria a la vocación natural, y puede causar desequilibrio grave. Se postula entonces lo siguiente:

- El territorio en el sistema cárstico debe ser planificado con una fuerte tendencia al mantenimiento de una relación 68 % área permeable/ 32 % área impermeable, ya que es la proporción suficiente para mitigar las inundaciones y sus efectos en contaminación y riesgos en 30 minutos de lluvia. Si esto se decide en un software de modelación hidrodinámica, deberá ser determinada con base en un periodo de retorno (Tr) de 10 años⁴. Y un coeficiente de escorrentía o número de curva (CN) es de 68 considerando el territorio natural como línea base, esto aplica para la zona de recarga de flujos locales de la Figura 14.

⁴ Se debe considerar lluvias para un periodo de retorno de 10 años analizadas para la modelación de los escenarios. Estos criterios son indicados en el Manual de Agua Potable y Alcantarillado 4 (CONAGUA, 2015), generado por la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), y la Norma Hidrológica del Periodo de Retorno de las Crecientes de Diseño publicado también por CONAGUA en 1996, se tomaron estos porque las estrategias sensibles al agua sirven para liberar la presión que la lluvia ejerce sobre el drenaje de agua negra, desbordándolo.

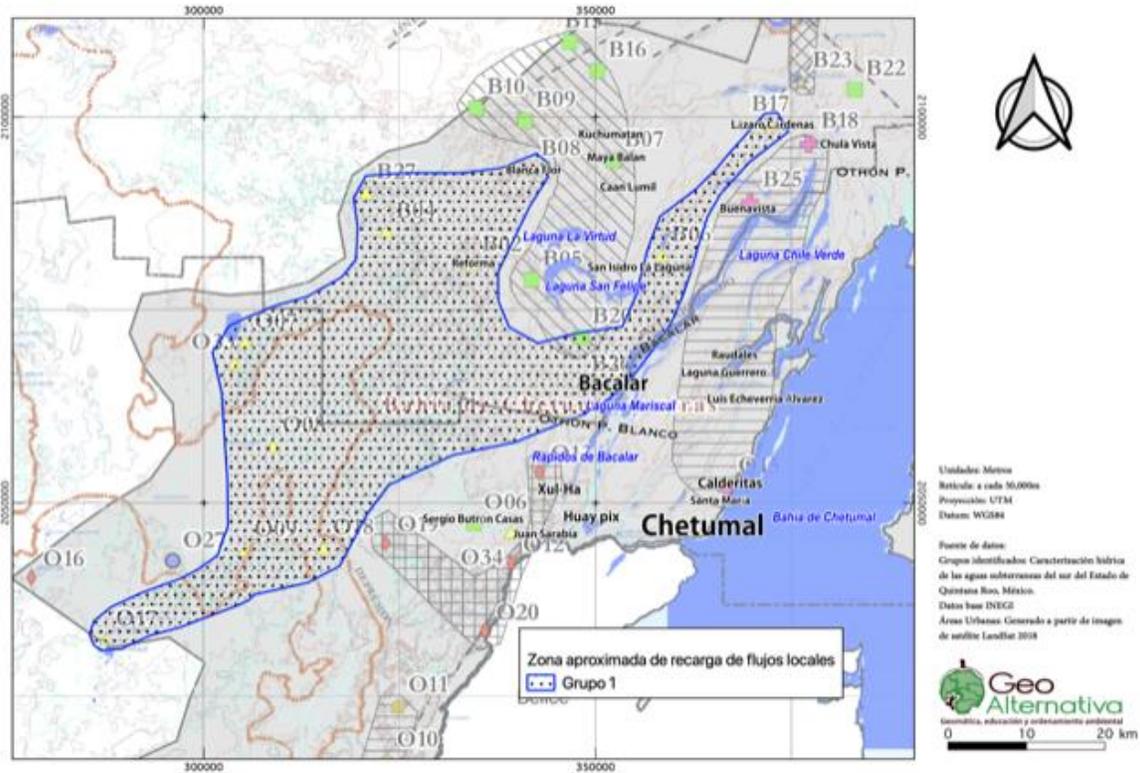


Figura 14 Zona aproximada de recarga de flujos subterráneos de jerarquía local. Elaboración propia con base en información de Sánchez et al 2012 e Ibarra-madrugal 2019.

- Con una proporción de 26.36 % permeable y 73.64 % impermeables, el tiempo del proceso de escorrentía mayor a 2 cm y comienzo de inundaciones es de 14 minutos y 10 segundos, igual para un Tr 10; esto es totalmente incompatible con el sistema cárstico.
- Para el establecimiento de la zonificación en programas de Desarrollo Urbano Municipal, programas municipales de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano, mapas de riesgo y la determinación de zonas metropolitanas así como nuevos centros urbanos, es indispensable el levantamiento topográfico georreferenciado con precisión milimétrica o centimétrica (con base en equipos mecánicos como estación total o tecnología de escaneo Lidar), para generar un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), así como la determinación de las curvas IDT (intensidad-duración-periodo de retorno) de comportamiento pluvial de la zona o región correspondiente; ambos insumos básicos para los programas de modelación hidrodinámica (como el IBER). También la información del suelo servirá para el establecimiento de los coeficientes de escorrentía en cada zona de estudio.

- Lo anterior puede ser logrado al momento de la conversión de la tenencia de la tierra ejidal a propiedad privada, toda vez que se presenta el proyecto de lotificación con levantamiento topográfico al Registro Agrario Nacional o ante las dependencias municipales.
- La distribución de las zonas urbanas debe integrarse a una red de corredores verdes interconectados, específicamente deben ser las líneas de escorrentía que la modelación hidrodinámica arroja. Estos corredores son el conjunto vegetación-suelo en su estado natural. Los estratos arbustivos y herbáceos pueden ser removidos conforme a la ley aplicable, más es indispensable evitar el desmonte del estrato forestal y la compactación, remoción o impermeabilización del suelo.
- Es compatible la infraestructura urbana basada en pilotes para evitar impermeabilización o compactación del suelo.
- Primar la infraestructura que signifique un fuerte fomento a la captación y reutilización de agua de lluvia, tanto a nivel del organismo operador del agua (CAPA) como a nivel vivienda.
- Para las zonas en las cuales ya se tiene el servicio de alcantarillado sanitario y para que la población se conecte a la red, será primordial realizar verificaciones, y en su caso establecer sanciones para quienes no se conecten, o den contrario, conecten sus descargas de aguas pluviales a la red de drenaje sanitario. Sin embargo, para quienes por situaciones técnicas tales como que el nivel de sus instalaciones de aguas servidas al interior de las viviendas, pudiera estar por debajo del nivel del registro instalado por el organismo operador de agua, podrá utilizar un sistema de tratamiento in-situ previamente validado por el H. Ayuntamiento y el Organismo Operador de agua potable y alcantarillado sanitario.
- En las zonas en las cuales ya están habitadas, pero no tienen sistema de alcantarillado sanitario será conveniente que la autoridad municipal obligue a los habitantes a construir algún sistema de tratamiento primario in-situ que haya demostrado su efectividad

Sistemas constructivos permeables, sensibles al agua

Como se comentaba anteriormente, las alternativas elegidas para los centros urbanos de Quintana Roo se muestran en de la Figura 15 a la Figura 24 y son las siguientes:

Sistemas constructivos

- Bio canal
- Jardín de Lluvia
- Pavimento permeable (solo para aumentar la superficie de captación, por si solo no resuelve el problema).

Biocanal

Son jardines sobre un terreno cóncavo para que el nivel de piso sea inferior con respecto a las superficies adyacentes; esto les permite captar el agua de lluvia. Los biocanales pueden construirse sobre espacios puntuales o extenderse a lo largo de un camino para formar canales o arroyos de retención e infiltración de agua pluvial.

Beneficios

- Es una técnica de bajo costo y si se realiza por primera vez sobre un terreno, el valor puede equiparse al de construir calzadas comunes.
- Son de fácil construcción y no es necesario conocimiento técnico avanzado.
- Es versátil para cualquier área permeable.
- Con el diseño adecuado para un conjunto de biocanales, se pueden crear modelos topográficos que mejoren el paisaje del entorno.

Consideraciones

- Cuando no se tenga mucho espacio, será mejor considerar otra alternativa para mitigar la filtración.
- Esta alternativa también es usada para casos domésticos, donde se plantan árboles del tipo frutal para aprovechar la fuente de agua; además de captar, aprovechar e infiltrar aguas grises.
- La parte inferior del biocanal, **no deberá ser compactado**, debido a que perderá porcentaje de la capacidad de infiltración, que también puede aumentar introduciendo plantas como el plátano, macal, etc.
- El suelo producto de excavación, podrá usarse para estructurar el bordo alrededor del biocanal, la que ayudará a dirigir y detener el agua.

- Los bordos deberán compactarse y podrán ser revestidos con rocas o vegetación para evitar la erosión o bien con especies trepadoras como alocaasia odora, epipremnum aureum, etc.
- Las nuevas vialidades deben considerar en su construcción, una membrana impermeable a sus costados salvaguardando la función de infiltración y tratamiento natural de la vegetación y suelos naturales aledaños, esto permitiría que el Biocanal en camellones mantuviera imperturbable su composición natural y evitaría hundimientos.

Mantenimiento

- Mantenimiento rutinario de áreas verdes como podas, deshierbe, riego los primeros 3 años en temporadas secas, entre otros.
- Limpieza periódica de entradas de agua; una vez cada tres meses.
- Limpieza de filtros de sedimentos; dos veces al año.

Componentes

Tabla 4 Componentes del Biocanal

Componente	Necesidad	Medidas	Observaciones
Entradas de agua	Básico	Mín. 40 cm en la base	Necesarias para el acceso de agua a los sistemas constructivos
Filtro de sedimentos	Básico	Mín. 30 cm de radio	Aseguran el funcionamiento a largo plazo
Acolchado	Básico	Mín. 5 cm	Necesario para reducir la evaporación y mejorar las condiciones de la vegetación
Microcuenca	Básico	Mín. 10 cm de profundidad	Es básica para la captación de agua pluvial
Desborde	Opcional	Corte en guarnición: 5 cm por debajo del nivel superior de guarnición Bordo: 10 cm bajo el nivel del margen	Cuando el sistema constructivo se encuentra en línea es necesario dotar de desborde, cuando no, se puede utilizar si se busca tener mayor control del flujo
Bordo	Opcional	Mín. 10 cm de altura sobre el nivel natural del terreno	Necesario cuando el jardín está junto a vialidades con estacionamiento en cordón, para reducir el riesgo de caer en la cuenca. Necesario en sistemas de múltiples microcuencas
Superficies Impermeables	Opcional	NA	Cuando existen, se busca aprovecharlas para incrementar el agua que fluye hacia el sistema. Se conforman para dirigir el flujo de agua hacia la microcuenca.

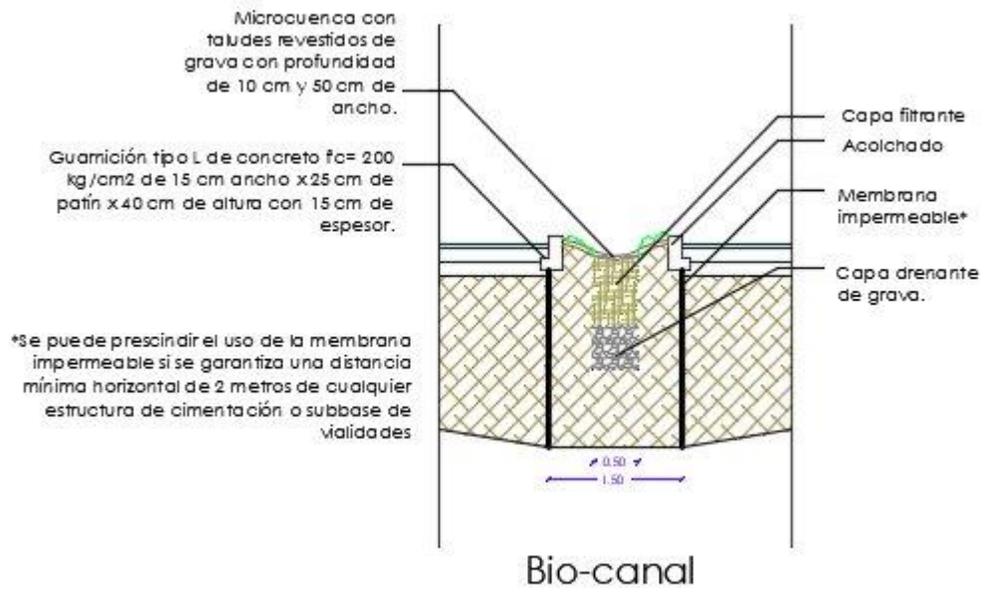


Figura 15 Detalle constructivo de Bio-canal en camellón Fuente: Elaboración propia.

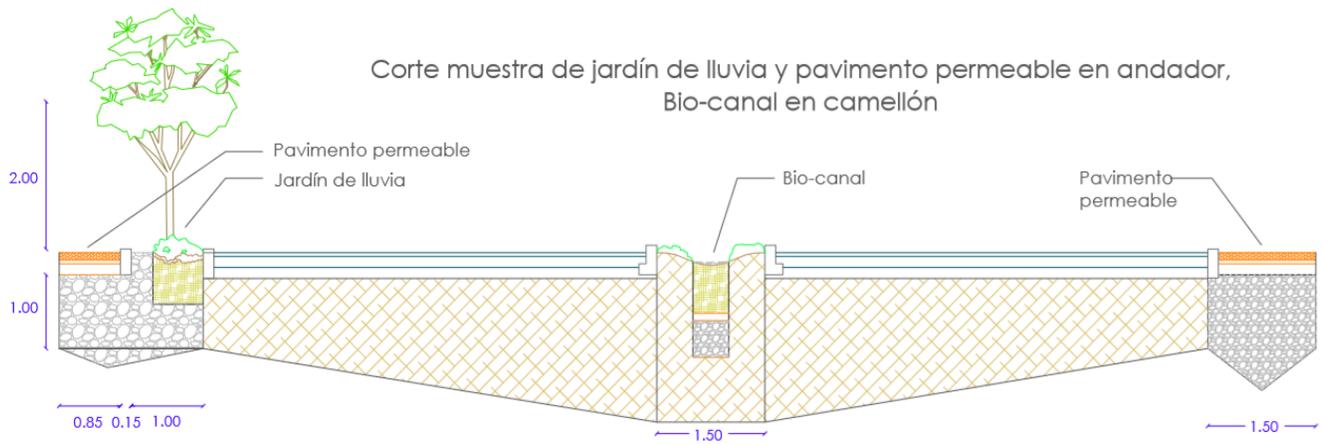


Figura 16 Corte muestra de corredor verde con Jardín de lluvia y pavimento permeable en andadores y Bio-canal en camellón. Fuente: elaboración propia

Jardín de lluvia

Jardines con hendiduras sobre el terreno para alcanzar un nivel menor al de las superficies alrededor y así captar agua de lluvia (escorrentía pluvial). A diferencia del jardín microcuenca, el jardín de lluvia tiene una mayor capacidad de captación de agua de lluvia ya que cuenta con capas permeables en sus niveles inferiores.

Para mejorar la estructura de los suelos excavados, se puede incrementar su capacidad de captación con un jardín de lluvia, que también funciona como biorretenedor que cumple la función de detener los contaminantes y mejorar la calidad del agua que se infiltra. Este proceso se lleva a cabo a través de diferentes mecanismos físicos, químicos y biológicos por las diferentes capas superiores.

Además, estos sistemas pueden dotarse de tubería ranurada en las capas drenantes, lo que permite trasladar el agua a otro sitio o a un sistema de almacenamiento para su uso.

De acuerdo al Manual de lineamiento de infraestructura verde para municipios mexicanos, esta alternativa se recomienda para los casos donde no existe drenaje pluvial o el espacio destinado es pequeño. Además, esta técnica es capaz de recuperar agua con una calidad alta.

Beneficios

- Alto porcentaje de captación y mayores niveles de calidad del agua antes de infiltrarse
- Facilidad de dimensionamiento e instalación con respecto al área o espacio destinado
- Se puede articular con medidas estándar
- Crean una mejora paisajista en la mancha urbana.
- En calzadas, funcionan como barrera entre la escorrentía y los peatones

Consideraciones

- Cuando se ubique a lado de un estacionamiento en cordón, el bordo debe estar continuo a la guarnición para la bajada de peatones del auto.
- Esta alternativa está limitada al ancho de banqueta, ya que se debe respetar el espacio de tránsito, por lo que tiene un mínimo de calzada de 0:80 metros y 1.20 metros de espacio peatonal como mínimo.

Mantenimiento

- Se debe de podar, deshierbar la vegetación en el jardín, además de que los primeros 3 años a partir de su instalación, riego en la temporada de seca.

- Limpieza de entrada de agua, antes y después de la temporada de lluvia en tiempos cortos establecidos.
- Limpieza de los filtros de filtración por lo menos 2 veces al año.

Componentes

Tabla 5 Componentes de Jardín de Lluvia.

Fuente: (Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo, 2017).

Componente	Necesidad	Medidas	Observaciones
Entradas de agua	Básico	Mín. 40 cm en la base	Necesarias para el acceso de agua a los sistemas constructivos
Filtro de sedimentos	Básico	Mín. 30 cm de radio	Aseguran el funcionamiento a largo plazo al retener sedimentos y mantener la permeabilidad
Franja filtro	Básico	Mín. 30 cm de grosor	Ayuda a retener sedimentos y evitar que fluyan fuera del sistema constructivo
Acolchado	Básico	Mín. 5 cm	Necesario para reducir la evaporación y mejorar las condiciones de la vegetación
Microcuenca	Básico	Mín. 10 cm de profundidad	Es básica para la captación de agua pluvial
Capa de sustrato	Básico	30-70 cm	Necesaria para el desarrollo de vegetación. Cuando se plantan árboles el espesor debe ser mayor
Capa drenante	Básico	40-90 cm	El espesor depende de las necesidades de captación y del tipo de suelo. A mayor percolación, menor espesor necesario
Barrera de suelo	Básico	Mín. 2mm de grosor	Se requiere para la funcionalidad a largo plazo del sistema constructivo
Capa impermeable	Opcional	Mín. 1mm de grosor	No es necesaria cuando se determina que no existe riesgo de afectación a estructuras colindantes (mínimo 2m.)
Conducto infiltrante	Opcional	Mín. 20 cm de diámetro	Conveniente para aumentar la velocidad y capacidad de filtración del agua
Desborde	Opcional	Corte en guarnición: 5 cm por debajo del nivel superior de guarnición Bordo: 10 cm bajo el nivel del margen	Cuando el sistema constructivo se encuentra en línea es necesario dotar de desborde, cuando no, se puede utilizar si se busca tener mayor control del flujo

Bordo	Opcional	Mín. 10 cm de altura sobre el nivel natural del terreno	Necesario cuando el jardín está junto a vialidades con estacionamiento en cordón, para reducir el riesgo de caer en la cuenca. Necesario en sistemas de múltiples microcuencas
Superficies Impermeables	Opcional	NA	Cuando existen, se busca aprovecharlas para incrementar el agua que fluye hacia el sistema. Se conforman para dirigir el flujo de agua hacia la microcuenca
Tubería perforada	Opcional	Mín. 7.5 cm de diámetro	A utilizarse cuando se busque recuperar y aprovechar agua de lluvia
Pozo de observación	Opcional	Mín. 5 cm de diámetro y largo de la profundidad máx. de la cuenca	Son necesarios en caso de establecerse un programa de monitoreo

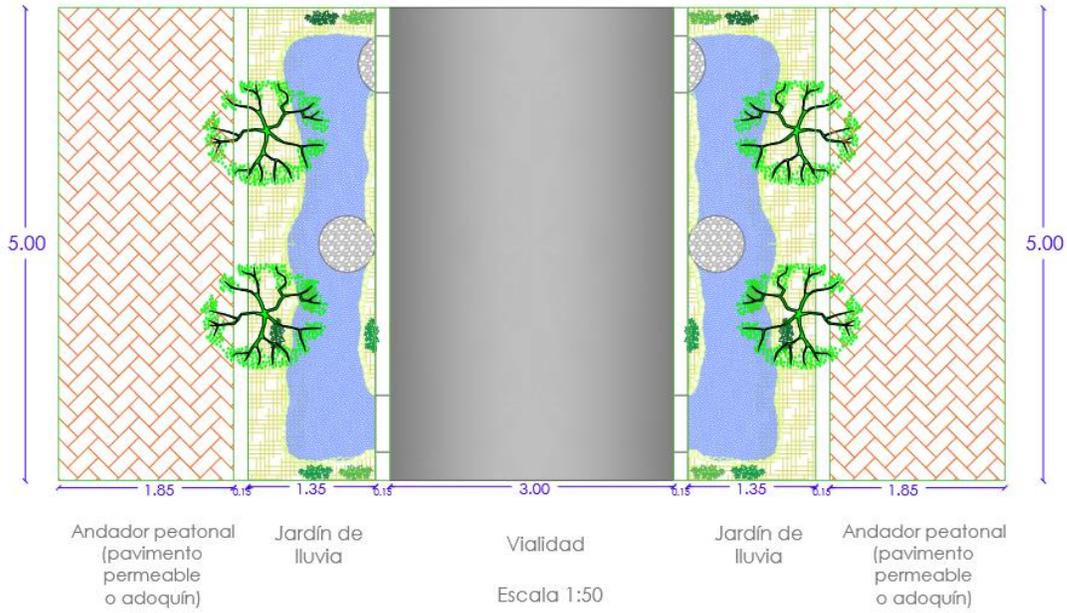


Figura 17 Vista en planta de Jardín de lluvia. Propuesta de corredor verde con Jardín de lluvia a los costados para la zona 3 establecida en el Reglamento de imagen urbana de Bacalar. Fuente: Elaboración propia.

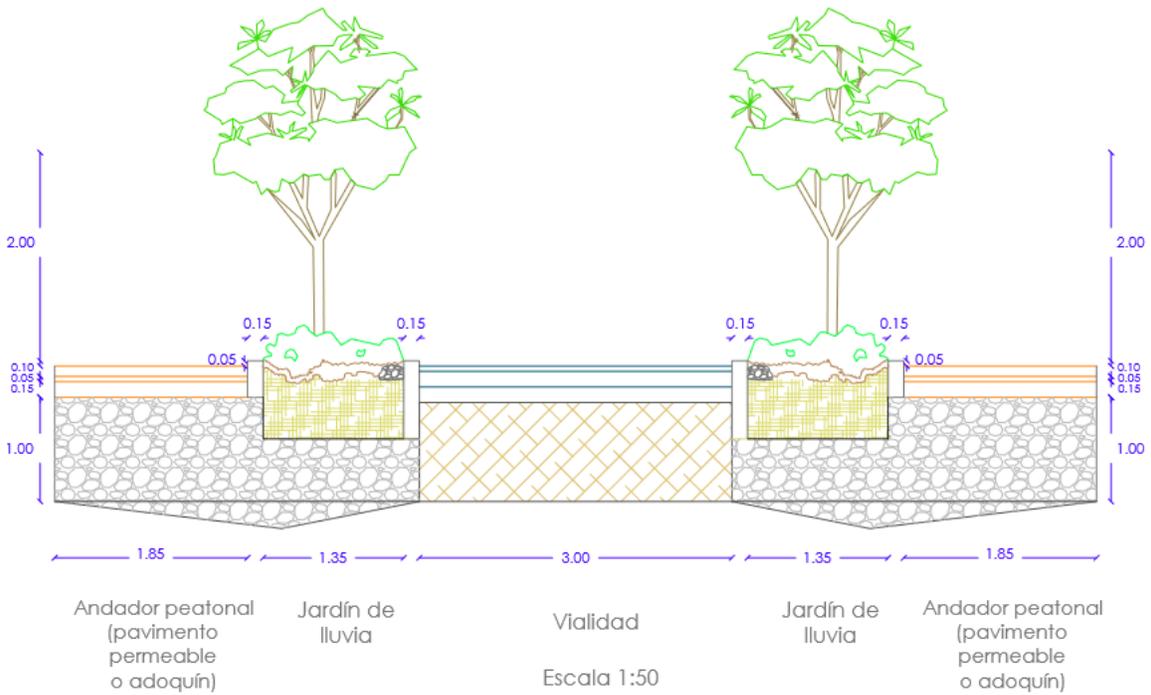


Figura 18 Detalle constructivo de jardín de lluvia. Corte muestra para corredor verde con jardín de lluvia y pavimento permeable Fuente: Elaboración propia.

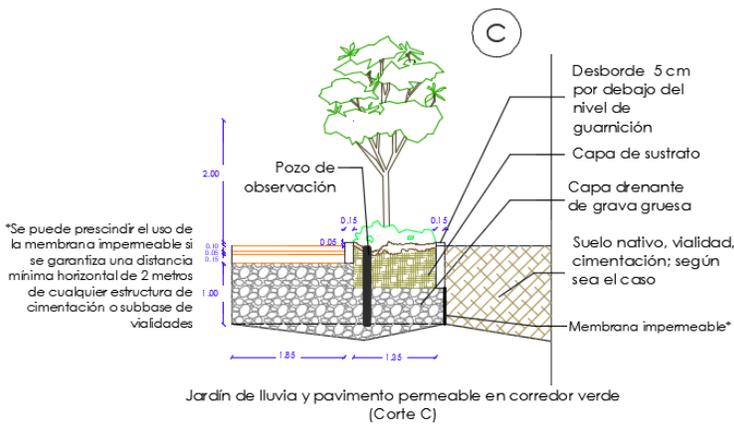
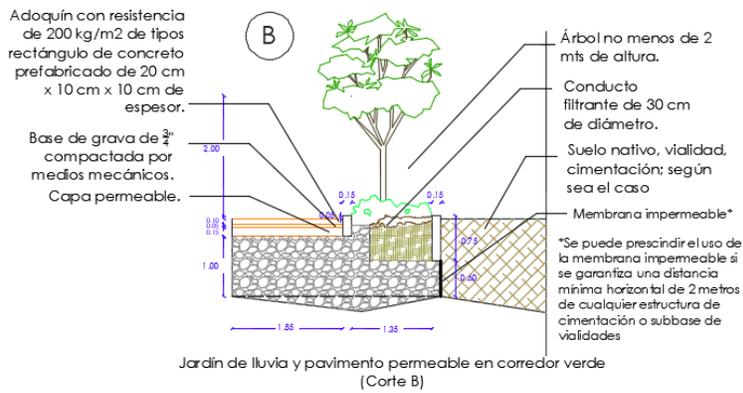
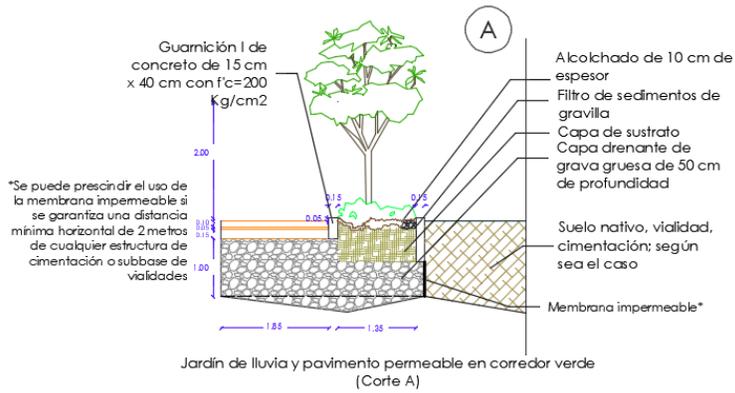


Figura 19 Detalle constructivo jardín de lluvia, cortes A, B y C. Fuente: Elaboración propia.

Pavimentos permeables

A diferencia de los pavimentos tradicionales, los pavimentos permeables están conformados por materiales porosos, los cuales permiten el paso del agua a través del pavimento, lo que permite que el agua se infiltre en el terreno, distribuyéndose a los alrededores irrigando la vegetación, y con ellos, reduciendo el flujo que atraviesa la superficie. Existen diferentes tipos: Concreto asfáltico o concreto hidráulico, modulares o de adoquín. (Espinosa, 2011)

El pavimento poroso trabaja elementalmente, el agua pasa por la capa porosa y ésta se infiltra paulatinamente en una superficie de grava que además funciona como almacenamiento.

Los pavimentos permeables asfálticos, están conformados por una capa asfáltica con agregados gruesos uniformemente graduados, fortificados con fibras de polímeros para resistir la pérdida de vacíos, donde la relación de vacíos debe estar entre el 16% y el 22% para permitir la infiltración. (Espinosa, 2011)

Los pavimentos permeables de concreto constan de una combinación de agregados gruesos de tamaño uniforme con una relación de agua-cemento reducido lo que permite un mayor volumen de vacíos y así incrementar la capacidad de retención del agua pluvial.

Los pavimentos permeables a base de adoquín u otros compuestos tienen la capacidad de filtrar agua pluvial a través de los espacios en sus juntas, adecuadas para estacionamientos, cruces de calles, ya que para este uso no se requiere tanta resistencia de carga. (Espinosa, 2011)

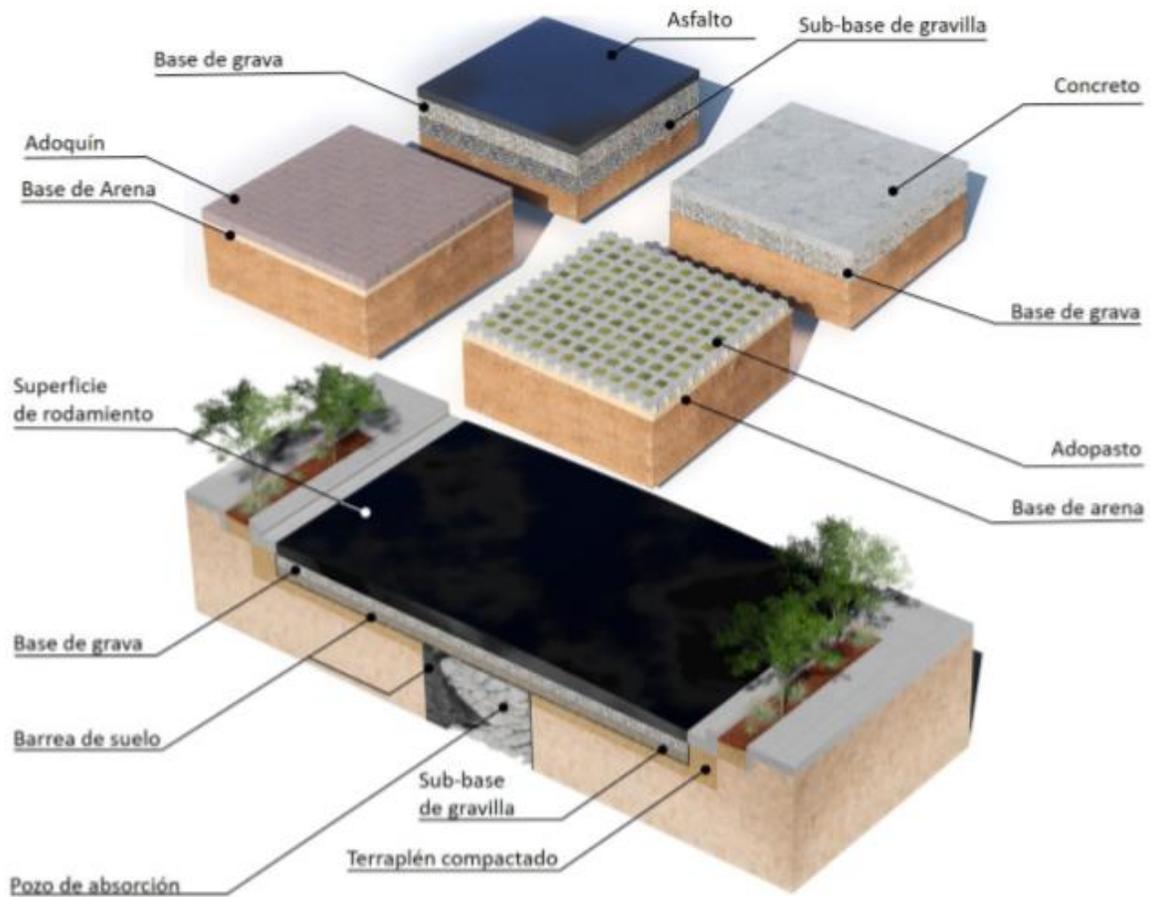


Figura 20 Gráfico de los pavimentos porosos Fuente: Obtenido de: (Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo, 2018)

Beneficios

- No impiden/ obstruyen el paso peatonal o vehicular en donde se encuentran instalados
- Tiene una mejora paisajista en el entorno
- Minimizan el patinaje de los vehículos (acuaplaneo) además de incrementar la adherencia en las llantas con respecto a la superficie.

Componentes

Tabla 6 Componentes de pavimentos permeables.

Obtenido de: (Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo, 2017).

Componentes	Necesidad	Medidas	Observaciones
Superficie de rodamiento a base de concreto asfáltico o hidráulico permeable	de Básico	5-7 cm de espesor para pavimentos asfálticos porosos	Mezcla asfáltica o porosa que permita el paso del agua.
		15-20 cm de espesor en losa de concreto hidráulico permeable	Mezcla de cemento hidráulico, de material abierto y revenimiento cero, agregado grueso y pocos finos.
Estructura pavimento	del Básico	15-35 cm de espesor	20-40% de volumen de vacíos a base de grava de 3/4" y balastro de 1.5 a 3".
Barrera de suelo	Básico	Mín. 2 mm de grosor	Se requiere para la funcionalidad a largo plazo de la técnica.
Pozo de absorción	Opcional	Variable	Pozo relleno de capa drenante de roca mín. 10 cm de diámetro.

Consideraciones

- Colocar pozos de absorción por lo menos a cada 50 metros del pavimento permeable para incrementar la probabilidad de infiltración del agua pluvial y garantizar la estabilidad del pavimento
- En lugares donde no se requiere una alta capacidad de carga como estacionamientos, accesos, residenciales) son ideales
- Debido a la obstrucción de poros que caracteriza a este pavimento, no es conveniente ponerlos en lugares donde la escorrentía es grande
- Si existe riesgo de infiltración lateral hacia los cimientos de una estructura colindante, es necesario incluir un revestimiento con geo membrana lateral

Mantenimiento

- Para los pavimentos de adoquín, limpieza superficial por medio de barrido y desmonte/ poda si es necesario

- Realizar prueba de permeabilidad para pavimentos permeables de asfalto y concreto por lo menos una vez al año, ya que es importante determinar la cantidad de saturación de sólidos en la capa de pavimento. En caso de estar saturada, se deben remover los sólidos de los espacios por medio de barredoras, bombas a presión o aspiradoras.

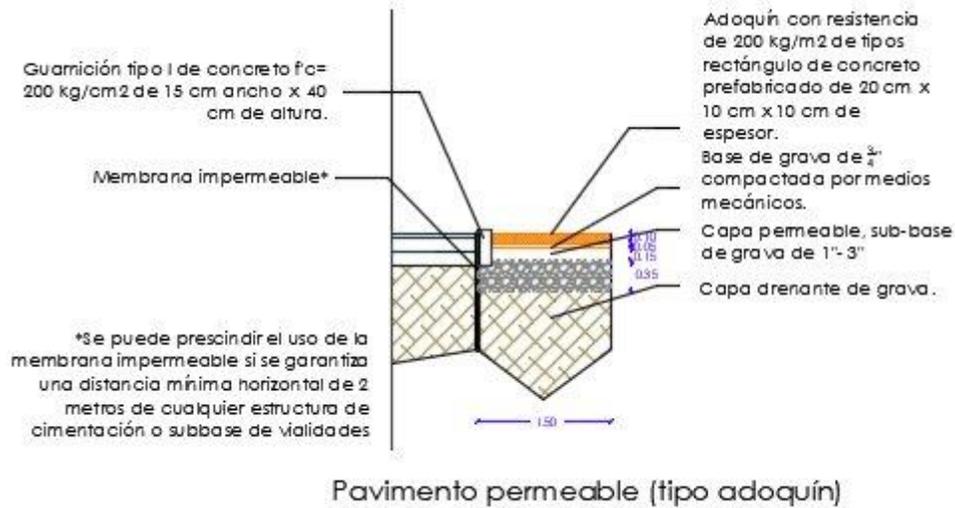
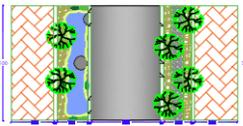


Figura 21 Detalle constructivo de pavimento permeable. Fuente: Elaboración propia.

Ejemplos muestra de corredor verde con aplicaciones de sistemas constructivos sensibles al agua.

Vista en planta. Propuesta de corredor verde con Jardín de Lluvia y Bio-canal con andadores de adoquín en costados para la zona 3.



Andador peatonal (pavimento permeable o adoquín) Jardín de lluvia Vialidad Bio-canal Andador peatonal (pavimento permeable o adoquín)

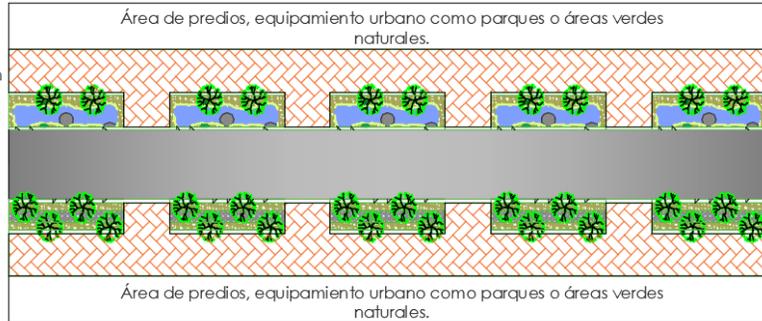
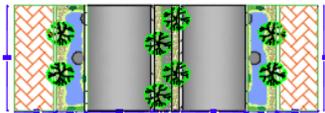
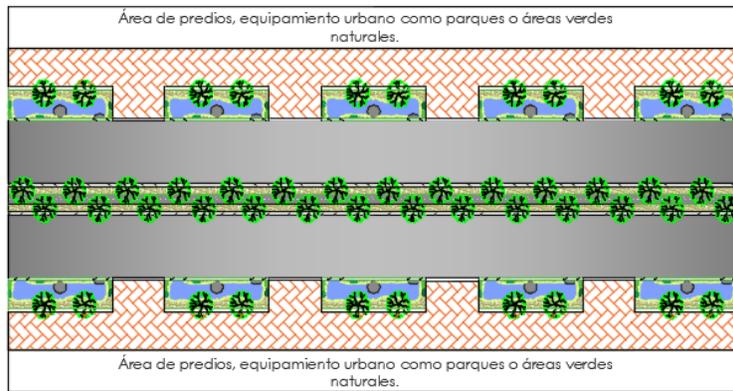


Figura 22 Ejemplo de emplazamiento de Jardín de lluvia, Bio-canal y Pavimento permeable en corredor verde.

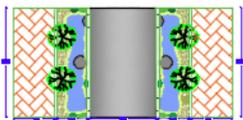
Vista en planta. Propuesta de corredor verde con Jardines de Lluvia a los costados, Biocanal en Camellón y andadores con Adoquín para la zona 3.



Andador peatonal (pavimento permeable o adoquín) Jardín de lluvia Vialidad Biocanal en Camellón Vialidad Jardín de lluvia Andador peatonal (pavimento permeable o adoquín)



Vista en planta. Propuesta de corredor verde con Jardines de Lluvia a los costados y andadores con Adoquín para la zona 3.



Andador peatonal (pavimento permeable o adoquín) Jardín de lluvia Vialidad Jardín de lluvia Andador peatonal (pavimento permeable o adoquín)

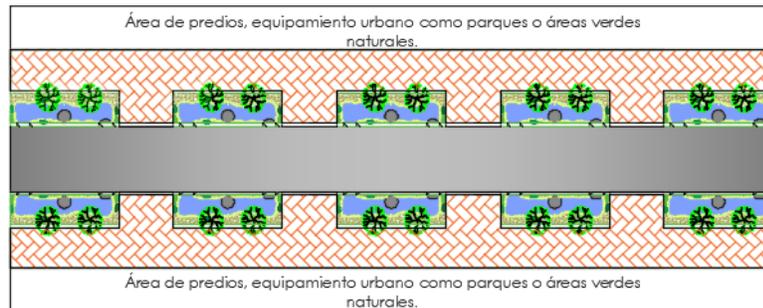


Figura 24 Ejemplo de emplazamiento de Jardín de lluvia y Pavimento permeable en corredor verde.

Decálogo de principios base vocación natural del territorio kárstico.

1. Reconocer que el ciclo del agua es fundamental en la toma de decisiones para sostener un territorio y una sociedad seguros, benignos, sanos y que superen los impactos ambientales recibidos.
2. Ratificar que la superficie y el subterráneo están altamente conectados, siendo estratégico mantener esta conexión y funciones ecológicas en forma, sin impermeabilizar el suelo y sin contaminar.
3. Implementar acciones contundentes en reducir, reciclar y reutilizar los residuos sólidos urbanos, que incluyen la construcción de participación social legítima e informada desde el diseño hasta el monitoreo.
4. No entubar el agua de lluvia, ni de los ríos, por ello, el drenaje pluvial se omitirá y en su lugar es congruente lograr una red estratégica de área verde dentro de las ciudades e infraestructura sensible al agua (de recarga al acuífero)⁵.
5. Mantener una proporción de superficie 68% permeable y máximo 32% impermeable en los centros urbanos, lo cual se logra con el conjunto del suelo-vegetación forestal arbóreo en su estado natural, cimentación en palafitos terrestres y columnas elevadas a partir del suelo, e infraestructura esponja en espacios públicos.
6. Implementar, en la mayor parte del territorio fuera y dentro de la ciudad, la agroforestería sintrópica (combinando árboles nativos maderables, comestibles y productores de biomasa para cosechar agua y abastecer al acuífero.) en combinación con corredores bio-culturales (selva-cultura-agua). Evitamos la promoción de la agricultura en monocultivo y uso de agroquímicos.
7. Buscar que la provisión de agua sea con base en cosecha de lluvia, captándola en espacios impermeables (construcciones). Esto apoyará a evitar intrusión de agua salina, alivia al drenaje cloacal de la presión de la lluvia, disminuye la contaminación de cuerpos de agua y mantiene ecosistemas relacionados.
8. Transitamos a sistemas de tratamiento de agua residual que operen con una reducción de gasto energético al menos del 50% por bombeo del agua. Esto es con infraestructura centralizada y descentralizada y nunca descargamos agua ni lodos sin tratamiento.
9. Considerar a los cenotes, microbialitos y cavernas de disolución cárstica como elementos especiales, por ello, la infraestructura es diseñada con base en estos principios y soluciones de raíz para asegurar su integridad.

⁵ Ibarra-Madrigal Silvana, Rejón-Parra David, Hernández-Montero Yesenia, Nahuat-Sansores Javier, Sánchez Quijano Miguel, Mena-Rivero Roberto, Romero-Martínez Ángel, Ríos-Castellanos Carlos, Arellano-Guillermo Alfredo. (2019). Territorio Sensible al Agua: Principios para la planificación territorial con base en el sistema cárstico de agua subterránea-superficial. Organización de Geomática, Educación y Ordenamiento Ambiental (Geo Alternativa). Bacalar, Quintana Roo. Pp 79. <http://www.geoalternativa.com/acervo3.php>

10. Adecuar los instrumentos de política pública con elementos especiales que consideren el sistema kárstico.

Vinculación de Territorio Sensible al Agua con los objetivos del milenio.

Los objetivos de la agenda 2030 se aprobaron en la Agenda para el Desarrollo a través de 193 Estados Miembros de las Naciones Unidas. La iniciativa Territorio Sensible al Agua se alinea en la dirección en la que se enfoca la agenda 2030, visualizando un territorio sostenible principalmente el 6, 9, 11, 14, 15 y 17.

Objetivo de la agenda 2030	Vinculación con los principios de Territorio Sensible al Agua (TSA)
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 1,2,8 y 9 Reconocemos que el ciclo del agua es fundamental en la toma de decisiones para sostener un territorio y una sociedad seguros, benignos, sanos y que superen los impactos ambientales recibidos. 2. Ratificamos que la superficie y el subterráneo están altamente conectados, siendo estratégico mantener esta conexión y funciones ecológicas en forma, sin impermeabilizar el suelo y sin contaminar. 8. Transitamos a sistemas de tratamiento de agua residual que operen con una reducción de gasto energético al menos del 50% por bombeo del agua. Esto es con infraestructura centralizada y descentralizada y nunca descargamos agua ni lodos sin tratamiento. 9. Consideramos a los cenotes, microbialitos y cavernas de disolución cárstica como elementos especiales, por ello, la infraestructura es diseñada con base en estos principios y soluciones de raíz para asegurar su integridad.

<p>9 INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA</p> 	<p>4. No entubamos el agua de lluvia, ni de los ríos, por ello, el drenaje pluvial se omitirá y en su lugar es congruente lograr una red estratégica de área verde dentro de las ciudades e infraestructura sensible al agua (de recarga al acuífero)</p>
<p>11 CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES</p> 	<p>1. Reconocer que el ciclo del agua debe ser fundamental en la toma de decisiones para sostener un territorio y una sociedad seguros, benignos, sanos y que superen los impactos ambientales recibidos.</p> <p>5. Mantenemos una proporción de superficie 68% permeable y máximo 32% impermeable en los centros urbanos, lo cual se logra con el conjunto del suelo-vegetación forestal en su estado natural, áreas verdes, cimentación en palafitos terrestres y columnas elevadas a partir del suelo e infraestructura sensible al agua.</p>
<p>14 VIDA SUBMARINA</p> 	<p>Los principios Territorio Sensible al Agua están fundamentados en la conectividad de los ecosistemas, sus efectos trascienden de lo local a lo global desde la selva hasta el mar.</p> <p>2. Ratificamos que la superficie y el subterráneo están altamente conectados, siendo estratégico mantener esta conexión y funciones ecológicas en forma, sin impermeabilizar el suelo y sin contaminar.</p> <p>9. Consideramos a los cenotes, microbialitos y cavernas de disolución cárstica como elementos especiales, por ello, la infraestructura considera soluciones de raíz para asegurar su integridad.</p> <p>Así se permite el paso del agua al acuífero, se proveen los carbonatos de calcio útiles para los corales, tortugas y estromatolitos</p>



Promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y frenar la pérdida de la diversidad biológica

6. Implementamos, en la mayor parte del territorio y los espacios verdes en la ciudad la agroforestería sintrópica (sin el uso de agroquímicos ni transgénicos, reforestando con árboles nativos maderables, comestibles y productores de biomasa para cosechar agua y abastecer al acuífero.) en combinación con corredores bio-culturales (selva-cultura-agua). Son congruentes con la vocación del territorio, evitan la desertificación, deforestación, degradación del suelo y pérdida de biodiversidad. Evitamos la promoción de la agricultura en monocultivo y uso de agroquímicos.



La Iniciativa Territorio Sensible al Agua se firma entre los sectores sociales y las instituciones.

10. Adecuamos los instrumentos de política pública con elementos especiales que consideren el sistema kárstico.

Principios para zonas urbanas

Las ciudades en el sistema cárstico de Quintana Roo, para entrar en el esquema de Territorio Sensible al Agua, deben:

Principios sensibles al agua en temas urbanos y turísticos
1. Mantener una proporción de área permeable/área impermeable de 68%/32% para simular las condiciones infiltrantes del sistema cárstico.
2. Incorporar la comprensión del funcionamiento del ciclo del agua en el sistema cárstico, en el plazo inmediato al proceso de planificación territorial
3. Reconocer la necesidad de incorporar estrategias específicas adaptadas a cada situación local y aplicar alternativas estructurales y no-estructurales adecuadas a la vocación del sistema cárstico.
4. En zonas de recarga al acuífero evitar el aumento de la escorrentía pluvial, con una proporción área permeable mínima de 68% o la comprobación de un CN no mayor a 66.
5. Reconocer el valor del recurso agua, asegurar su protección, conservación y potencial reutilización.
6. Considerar el uso de alternativas innovadoras de diseño urbano sensible al agua, tales como jardines de lluvia, bio-canales, pavimentos permeables y cualquier nueva alternativa descentralizada que simule una gestión hídrica parecida al ciclo de agua natural, y utilizando plantas que absorben el agua para eficientar el sistema.
7. Capturar el mayor volumen de escorrentía posible para incrementar la infiltración, respetar la evapotranspiración y disminuir el efecto de isla de calor.
8. Minimizar la perturbación de zonas del conjunto vegetación-suelo en su condición natural.
9. Proveer beneficios paisajísticos con la implementación de alternativas sensibles al agua
10. Cuando se diseñen soluciones sensibles al agua se ha de considerar el área circundante a ellas para integrar dichas soluciones al entorno multicultural.
11. Diseñar espacios recreativos con temática hídrica para que las personas se reconecten con la naturaleza, que les permita disfrutar un ambiente tranquilo y agradable en conocimiento del acuífero sobre el que se encuentran.
12. Proponer desarrollos de clase mundial que permitan holgura y no hacinamiento ni compactación, que en su composición y organización motiven actividades al exterior, conexión social, descanso, ejercicio y amenidad general, con amplias zonas vegetadas y arboladas naturalmente.
13. Considerar las preocupaciones y opiniones de la comunidad en los procesos de planificación.
14. Incrementar/incentivar la investigación en materia de Diseño Urbano Sensible al Agua y aplicaciones en Ciudades Sensibles al Agua.
15. Posicionar a Quintana Roo como un referente mundial en materia de Ciudades Sensibles al Agua, equiparables a los desarrollos turístico culturales en Avalon (en la zona costera de Sydney), Melbourne (zona costera de Victoria, Australia) y los desarrollos de Corea, Costa Rica & Singapur.
16. La vegetación frente de los predios, deberá ser de la región. Los árboles urbanos y en especial los árboles patrimoniales no deben ser derribados, a menos que cumplan alguna de las características contempladas en la Ley del arbolado urbano del estado de Quintana Roo, ni encajonadas en con materiales impermeables que circunden el fuste, deberán mantenerse podada y en óptimas condiciones.
17. En las paredes y techos instalar sistemas de captación y utilización de agua de lluvia. Los edificios amplios ofrecen buena superficie para la captación de agua de lluvia.
18. No se permitirá Instalar gárgolas o canales que descarguen las aguas pluviales a chorros desde las azoteas a la vía pública. En su lugar se deben instalar sistemas de aprovechamiento del agua de lluvia.
19. Deberán evitarse las actividades que ocasionan el deterioro y derribo de los árboles nativos y adaptar la infraestructura urbana a los árboles patrimoniales. Reconociendo los derechos de la Madre Tierra.

20. Para la construcción de camellones en vialidades, es necesario comprobar que el coeficiente de porosidad del suelo sea de 61-62, si esto es así, entonces se deberá privilegiar el resguardo del conjunto vegetación-suelo natural y el nivel de la carretera deber quedar por encima del nivel de suelo del camellón el cual deberá contener entradas de agua provenientes de la vialidad, interrumpidas a cada metro.
21. En camellones de las carreteras federales, deberá respetarse y utilizarse árboles de tronco largo que no interrumpan la visual y una copa abundante para amortiguar los efectos del sol sobre la carretera. La vegetación baja no deberá sobrepasar los 2 metros de altura y deberán colocarse en grupos ya sea de una misma especie o combinados a 5 metros cada uno como mínimo.
22. En camellones de las carreteras locales, deberá respetarse y utilizarse vegetación de altura media hasta 15 metros de altura, su tronco corto de 2 a 3 metros de altura y una copa abundante que reduzca la incidencia solar, estarán dispuestos a una distancia de 10 metros entre especies. Los arbustos a utilizar serán en grupos de una misma especie o mezclados, la distancia entre estos grupos deberá ser de 5 metros como mínimo.
23. En vialidades y camellones del centro suburbano, deberán respetarse líneas continuas de vegetación natural, entendiéndose que el resguardo del suelo es el objetivo principal de esta medida. Solo se permite remover los elementos vegetativos con un diámetro de fuste menor a 20 cm, arbustos, enredaderas que interrumpan la visual; deben resguardarse especies que en su estado adulto presenten troncos de tronco largo y también los de altura media, presenten copa abundante es su estado adulto, por lo tanto, la distancia entre dichas especies será que su estado natural presente.
24. Deberán fomentarse el uso sistemas de almacenamiento, utilización y reutilización de agua de lluvia, que permitan reducir la extracción de agua del acuífero para evitar la intrusión salina.
25. Promover el establecimiento de museos regionales y museos de sitio, zonas de demostración, jardines botánicos y otras instalaciones o exhibiciones similares, destinados a promover la conservación de especies endémicas, la conceptualización del acuífero y sus expresiones, promoviendo el entendimiento del sistema cárstico sobre el que se vive en la región.
26. La construcción de vías de comunicación aledañas, colindantes o paralelas al flujo de un humedal costero deberá incluir drenes y alcantarillas mínimo a cada 20 metros que permitan el libre flujo del agua y de luz. Se deberá dejar una franja de protección de 100 m (cien metros) como mínimo, la cual se medirá a partir del límite del derecho de vía al límite de la comunidad vegetal, y los taludes recubiertos con vegetación nativa que garanticen su estabilidad.
27. La planeación urbana tendrá como propósito generar condiciones de bienestar social y garantizar un uso adecuado de los espacios urbanos y el funcionamiento de la ciudad como espacio habitable, económica y ecológicamente sustentable, con base en la vocación natural del territorio para garantizar la vida en condiciones óptimas de sucesivas generaciones. La implementación de Centros Culturales con visión al medio ambiente, darán garantía transgeneracional y educativa por medio de la participación ciudadana en actividades culturales.
28. Se utilizarán ecotecnias, tecnologías y sistemas constructivos sensibles al agua para la captación y aprovechamiento del agua pluvial como jardines de lluvia, camellones filtrantes y biocanales, así como el tratamiento de las aguas residuales y residuos sólidos, como los humedales, los sistemas descentralizados de tratamiento de agua, la creación de composta a partir de los desechos orgánicos.
29. A lo largo de todas las banquetas del centro urbano y suburbano se deberán instalar unidades de jardines de lluvia, cada unidad separada entre sí por 2 m y con entradas de agua desde la vialidad aledaña. Cada unidad de Jardines de Lluvia debe tener un ancho mínimo de 80 cm y una longitud máxima de 5.50 m. por una profundidad de 1.20 y construirse con los materiales señalados en el presente documento.
30. Las autoridades estatales y municipales, en coordinación con los ejidos y propietarios de la tierra del deberán designar un mínimo de 68% de área permeable (área verde natural + infraestructura sensible

- al agua) que permita la recarga de la lluvia hacia el subsuelo y el acuífero y evitar el efecto de la isla de calor.
31. Las banquetas deberán ser construidas con materiales permeables: empedrado, ecocreto, ecocreto con piedra caliza, ecocreto lavado, ecocreto lavado con arena silica, ecocreto lavado con fibra de coco, concreto estampado. Se debe evitar la instalación de concreto de baja permeabilidad, previa autorización de la Dirección.
 32. En la zona suburbana, las vialidades orientadas de hacia los cuerpos de agua deberán incluir bio-canales con un desnivel de 10 cm por debajo del nivel de la vialidad, ancho de 1.5 m con una pendiente hacia el centro del bio-canal de 1:5 y una profundidad de 1.40 m. Las vialidades con la misma orientación en las demás zonas deberán tener canaletas en forma de “U” a base de piedra de bola de 40 cm de ancho y 30 cm de profundidad. En zonas donde exista vegetación, estas deberán contar con drenes naturales de 70 cm de ancho por 60 cm de alto a base de malla geotextil y grava de ¾.
 33. Vialidades, banquetas, estacionamientos, espacios públicos, deben contar con infraestructura Sensible al Agua que evite el aumento de la escorrentía superficial al retener e infiltrar un volumen del agua pluvial.
 34. Toda la infraestructura Sensible al Agua debe contar con los materiales y sistemas constructivos especificados en el presente documento para asegurar un coeficiente de infiltración mínimo del 62 % en la capa superficial y uno del 30 % en su capa profunda.
 35. Las guarniciones deberán tener un ancho de 10 cm y una altura de la misma dimensión, en su diseño se deberá incluir las entradas de agua pluvial a las infraestructuras Sensibles al Agua, con dimensiones de 60 cm de ancho en un ángulo de 45° así como desbordes con salida de 60 cm de ancho en un ángulo de 45° con 5 cm por encima del nivel de vialidad.
 36. Las banquetas deberán tener una pendiente del 5% dirigida hacia las canaletas en forma de “U” a base de piedra bola, el área ajardinada o bien hacia la vialidad, o el bio-canal, según corresponda.
 37. El ancho mínimo de las calles de ambos sentidos será de 6 metros, mientras que para las de un solo sentido será de 3 metros. Las calles de doble sentido deberán contar con camellones que tengan bio-canales en su centro y la pendiente de 5% esté redirigida hacia éstos.
 38. Todas las vialidades deberán tener una pendiente del 5% hacia el centro, donde están los bio-canales en camellones, si no fuera el caso, que la pendiente esté dirigida hacia los jardines de lluvia destinados para este fin.
 39. El proyecto de todo tipo de vías deberá respetar la traza urbana tradicional e histórica de la población y en las vialidades donde sea factible se propiciará hacerlas peatonales, promoviendo la formación de secuencias y recorridos atractivos, integrando paisaje, perspectiva y funcionalidad. Las vialidades que sean incorporadas a las trazas urbanas, deberán cumplir con las normatividades y especificaciones, de conformidad al Código Administrativo del Estado Quintana Roo y además de considerar camellones con bio-canales y jardines de lluvia y redirigir la pendiente hacia éstos.
 40. El trazo de nuevas vialidades deberá considerar camellones con Bio-canal en todas las nuevas vialidades.
 41. Las vialidades que conecten las zonas urbanas y suburbanas con los cuerpos de agua deberán ser de ecocreto o de hidrocreto, permitiendo la filtración somera del agua. En su conexión con la banqueta, el bordo deberá disponer rampas de entrada de agua pluvial a 45° hacia un jardín de lluvia constituido por una franja de vegetación nativa de la región cuya longitud deberá ser de hasta 5.50 m. y ancho mínimo de 0.80 m. y la pendiente en favor de la dirección de la escorrentía, al centro deberá ser reforzada con un conducto infiltrante, y al final contendrá un desborde 5 cm debajo del nivel de guarnición.; en algunos casos esta franja podrá alcanzar un ancho máximo de 1.20 metros, esta morfología deberá ir a los costados de la vialidad peatonal. Respetando como distancia mínima para el tránsito vehicular 4.50 metros. De igual forma deberá llevar banquetas de 1.20 metros de ancho a

base de ecocreto o pavimentos permeables. La forma de la canaleta y franja vegetal deberán ser orgánicas de acuerdo al anexo al Reglamento, a excepción de las banquetas.

42. Los Programas de Desarrollo Urbano municipales deben considerar la recreación de las vialidades que vayan a ser incorporadas a las trazas urbanas para que en distribución y dimensiones consideren la inclusión de camellones con biocanales y jardines de lluvia, lo anterior en donde por tenencia de la tierra sea factible aún la donación de espacios para uso público. En donde la tenencia de la tierra no lo permita debido a la avanzada privatización y pulverización de la tierra deberán establecerse mecanismos administrativos y legales que tiendan a la reincorporación de espacios para uso público.

43. Las nuevas vialidades deben considerar en su construcción, una membrana impermeable a sus costados salvaguardando la función de infiltración y tratamiento natural de la vegetación y suelos naturales aledaños, esto permitiría que el Biocanal en camellones mantuviera imperturbable su composición natural y evitaría hundimientos.

44. Las áreas verdes urbanas deberán ser regadas preferentemente con aguas residuales tratadas, reduciendo el consumo de agua de primer uso para este fin, siguiendo lo dispuesto por la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1197, o aquella aplicable en relación al reúso en servicios al público en contacto directo.

45. En las zonas aledañas a áreas naturales protegidas de cualquier categoría, determinar un área de amortiguamiento que asegure la conectividad dentro de las zonas urbanas, en conexión con las áreas verdes de los asentamientos.

46. En las etapas de crecimiento de la mancha urbana considerada por el PDU, para mitigar el aumento de la temperatura y la sensación térmica en las zonas urbanas, mejorar el paisaje, proteger las zonas de infiltración de aguas y recarga de mantos acuíferos, favorecer la función de barrera contra ruido, dotar espacios para recreación y mejoramiento de la calidad de vida de los ciudadanos en general, los fraccionamientos deben incorporar áreas verdes con el conjunto vegetación-suelo en su estado natural y determinados con base en una modelación hidrológica. Estas áreas verdes además contribuirán con el Sistema Municipal de Parques, de conformidad con la normatividad vigente en la materia.

47. Aquellos proyectos que cuenten con plantas de tratamiento de aguas residuales deberán utilizar preferentemente agua residual tratada para el riego de áreas verdes, funcionamiento de inodoros, mantenimiento de las instalaciones y limpieza, cumpliendo con los parámetros establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-199.7

48. En México los PDU en general se establecen mínimos de AV/Hab en $9\text{m}^2/\text{hab}$, pero este parámetro no responde a condiciones climáticas como la regulación del clima o el manejo de escorrentías.

49. El manejo integral de residuos sólidos se efectuará... (no sólo la disposición final) de acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003 promoviendo implementación de programas de reciclaje En el diseño y construcción de los sitios de disposición final de Residuos Sólidos Urbanos se deberán colocar en las celdas para residuos y en el estanque de lixiviados, una geo membrana de polietileno de alta densidad o similar, con espesor mínimo de 1.5 mm. Previo a la colocación de la capa protectora de la geo membrana se deberá acreditar la aprobación de las pruebas de hermeticidad de las uniones de la geo membrana por parte de la autoridad que supervise su construcción.

<p>50. Se tendrán que definir normas de construcción para asentamientos humanos, infraestructura y equipamientos que tomen en cuenta el riesgo de Fenómenos hidrometeorológicos, reducción de riesgos de desastres considerando las metodologías de adaptación y reducción basado en Ecosistemas y la implementación de infraestructura verde urbana basados en el Diseño Urbano Sensible al Agua</p>
<p>51. Los proyectos en los que se requiera el manejo de materiales peligrosos o se generen residuos en grandes cantidades (27.3 kg/día), deberán establecer un plan de manejo adecuado de los residuos sólidos que considere: Reducir el volumen de residuos sólidos generados, a través de la adquisición de productos a granel y con un consumo mínimo de envases para disminuir la producción de los residuos sólidos.</p> <p>52. Reutilizar, a través de la sustitución de artículos desechables por otros reutilizables, como pilas recargables, jaboneras rellenables, bolsas de tela para la ropa sucia, entre otros. Reciclar, haciendo una clasificación de los residuos sólidos en el momento que se produce. Recuperar artículos como el papel, el vidrio, el aluminio y el plástico. Transformando los restos de comida, las hojas y los restos de plantas en abono orgánico. Disponer de un lugar seguro e higiénico para el acopio de residuos. Dicho plan deberá presentarse como anexo al estudio de impacto ambiental o documento técnico unificado aplicable al proyecto.</p>
<p>53. Los nuevos desarrollos inmobiliarios deben construir sistemas de tratamiento de sus aguas.</p> <p>54. Las aguas residuales deben tratarse y evitar descargarse hacia la playa, el mar, cenotes, ríos, humedales; en su lugar debe reutilizarse en riego o producción de áreas verdes cumpliendo con los parámetros la NOM-003-SEMARNAT-1997 o verterse al drenaje municipal de acuerdo a la NOM 002 SEMARNAT 1996.</p>
<p>55. Toda obra urbana, suburbana y turística deberá contar con sistemas de captación y reutilización de agua de lluvia, la traza de caminos deberá dejar espacio para jardines de lluvia que permitan la recarga al acuífero, así como evitar mezclar el agua de lluvia con el drenaje sanitario.</p>
<p>56. En la elaboración del Programa de Desarrollo Urbano se deberán reconocer que el 100% de la superficie del centro de población es zona de recarga al acuífero dada su condición cársica e instrumentar lineamientos para resguardar esta condición, así como también la vocación natural de las áreas con procesos ecológicos y ecosistemas relevantes tales como dolinas, cenotes y humedales. Entonces implementar diseños urbanos sensibles al agua</p>
<p>57. Se deberá contar con áreas acondicionadas para almacenar temporalmente los residuos inorgánicos dispuestos de acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003</p>
<p>58. Los asentamientos humanos deberán respetar la conectividad de los cauces de agua tanto subterránea como superficial, evitando infraestructura urbana impermeable u obstructora de flujos tanto verticales como horizontales de agua en zonas federales, inundables, escorrentía perene o temporal. Resguardando como mínimo una proporción del 68 % área permeable y 32 % área impermeable.</p>
<p>59. No se permite asentamientos humanos sobre zonas de riesgos de acuerdo al resultado de las modelaciones hidrodinámicas que muestren las trazas de los flujos y zonas de inundación.</p>

60. Considerar un parámetro mínimo de área permeable por los nuevos fraccionamientos de acuerdo a las condiciones climáticas e hidrológicas locales, en caso de no contar con información particular determinada con una modelación hidrodinámica y alta precisión topográfica, la proporción área permeable/área impermeable deberá ser de 68/32.
61. Las plantas de tratamiento de aguas servidas deberán contar con un sistema para la estabilización, desinfección y disposición final del 100% de los lodos de acuerdo con las disposiciones de la NOM-004-SEMARNAT-2002. (Residuos líquidos) y preferentemente optar por los sistemas combinados de tratamiento de agua que reducen en más del 90 % la generación de lodos residuales
62. En los proyectos comerciales los estacionamientos deberán contar con áreas verdes en forma de camellones continuos cuya estructura funcione como jardines de absorción de lluvia y sitios de recarga al acuífero y deberán respetarse los árboles naturales y evitar colocar pavimento de baja permeabilidad.
63. En las zonas urbanas, independientemente del proyecto de que se trate, se deberá garantizar en todo momento la permanencia de palmas a partir de 1 metro de altura, así como los árboles nativos mayores a 3 metros de altura y/o 25 centímetros de diámetro del tronco a 1.30 metros de altura. Previo al inicio de las actividades de desmonte se deberán marcar los troncos a fin de que puedan ser identificados y se protegerán sus raíces para evitar que sean afectadas por la maquinaria durante los trabajos.
64. La construcción de obras e infraestructura para el drenaje pluvial deberán ser evitadas. En lugar de ello contemplar las recomendaciones del modelo Ciudad Sensible al Agua y el máximo histórico de tormentas atípicas para la zona.
65. La construcción o rehabilitación de vialidades deberá garantizar la permanencia y conectividad de las corrientes superficiales, sub superficiales y subterráneas de agua sean estas de régimen temporal o permanente. Para ellos se deben incorporar los jardines de lluvia, bio-canales, pavimentos permeables y promover evitar la remoción de la vegetación natural
66. La superficie máxima de desplante por cabaña será de 40 m ² . Las cabañas serán de hasta 2 niveles, con diseños que se integren al paisaje con materiales de la región y técnicas tradicionales de construcción apropiadas para la región, preferentemente integrar sistemas de permacultura, se deberá aplicar infraestructura bioclimática y ecotecias tales como generación alternativa de energía, captación de agua de lluvia y manejo integral de residuos. El diseño deberá contar con la validación de la Secretaria de Turismo Estatal, de conformidad a lo establecido en el reglamento de la Ley Estatal de Turismo.
67. En el desarrollo de los proyectos turísticos, se deberán mantener los ecosistemas excepcionales tales como formaciones de selvas subperennifolias, manglares y cenotes, entre otros; así como las poblaciones de flora y fauna incluidas en la NOM-ECOL-059-SEMARNAT-2010. Alrededor de los cenotes, accesos a cuevas y cauces de ríos subterráneos se deberá mantener inalterada la vegetación natural, adecuar los proyectos a los elementos naturales como la topografía, en caso de autorizarse la construcción de infraestructura esta deberá ser elevada si está en zonas inundables. En su caso, la autoridad ambiental federal determinará la superficie que podrá ser aclareada, conservando los árboles con altura de más de 1.30 m y mayores a 10 cm de diámetro a la altura del pecho.

<p>68. Cuando no existan los servicios municipalizados de tratamiento y disposición de aguas residuales en proyectos o desarrollos turísticos, ecoturísticos, éstas aguas residuales deberán ser manejadas, tratadas y dispuestas por el promovente, de acuerdo a la normatividad ambiental. El nivel de tratamiento depende del tamaño del proyecto y se ajustará a lo establecido a continuación: Casas habitación y hoteles/cabañas de entre 1 y 10 unidades: Fosas sépticas prefabricadas o sistemas de bio digestores (NOM-006-CONAGUA-1997). Fraccionamientos residenciales y hoteles / cabañas entre 11 y 50 unidades: Plantas de tratamiento secundario; y Fraccionamientos residenciales y hoteles / cabañas de más de 50 unidades: Plantas de tratamiento terciario, basados en nanotecnologías, que garanticen de manera cuantificable la reducción de hongos, virus y bacterias patógenas. Todos los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales deberán acatar la Normatividad aplicable. No se permite la construcción y/o uso de fosas sépticas simples. Y deberá evitarse a toda costa la descarga a cuerpos de agua o el manto freático para ello, el agua residual podrá ser reutilizada en el mismo predio, ya sea para riego, producción de huertos o reuso en baños y actualizar los sistemas de ósmosis inversa a nanotecnologías que den una garantía para evitar la creación de agentes patógenos dentro de las tuberías.</p>
<p>69. Las actividades de turismo alternativo, en especial eco alojamientos, que se desarrollen en sitios sin cobertura de la red de drenaje municipal o cuya red de alcantarillado no cuente con sistemas de tratamiento de aguas residuales, deberán contar con un sistema de tratamiento de aguas residuales cuyo efluente cumpla, con los parámetros establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997. Dicho efluente deberá ser reutilizado en los procesos de operación como riego de áreas verdes, funcionamiento de inodoros, mantenimiento de las instalaciones y limpieza. Y su actualización a nueva infraestructura de vanguardia basada en la nanotecnología, como ozono, floculante, activadores cuánticos, electrolisis, biomagnetismo, etc que permitan el flujo de agua de calidad, agua activada y agua viva.</p>
<p>70. En las áreas verdes y jardinadas, no deberán utilizarse agroquímicos. Deben reemplazarse por los métodos y productos naturales de control de plagas o fertilización, con la finalidad de resguardar la oligotrofia del agua en el sistema cárstico según la definición de dicho término en la NMX-AA-157-SCFI-2012</p>
<p>71. El diseño y desarrollo de los proyectos turísticos deben asegurar el mantener de manera prioritaria ecosistemas tales como humedales, selva baja caducifolia y selva media subcaducifolia, e integrar zonas de reserva de área verde y permeabilidad a razón del 68 % permeable/32 % impermeable</p>
<p>72. Solo deberán utilizarse especies nativas para las áreas verdes que se construyan como parte del proyecto y está prohibido el uso de especies consideradas como exóticas e invasoras. Así mismo, en caso de que estas ya existan deberán eliminarse los ejemplares de dichas especies de forma paulatina y según el programa de jardinado.</p>

<p>73. No se permite la disposición de materiales de construcción ni residuos derivados de estas o de excavaciones y rellenos sobre la vegetación nativa, áreas naturales, de reforestación, de arborización, Zona Federal Marítimo Terrestre, cursos o cuerpos de agua.</p>
<p>74. Para el manejo del agua pluvial se deberá dejar áreas verdes que sirvan de jardines de lluvia para filtración al acuífero, se instalarán sistemas de captación y utilización de agua de lluvia la cual no se combinará con el agua de drenaje residual, si se está a 400 metros o menos, de un cuerpo de agua se deberá construir infraestructura de retención de suelo y contaminantes, trampas de grasas y sólidos en los sitios del terreno donde se conduzca la escorrentía como gaviones u otros que garanticen la retención de sedimentos o contaminantes, el sistema en su conjunto deberá evitar en gran medida aumentar la escorrentía y disminuir la recarga al acuífero. Para el segmento de agua que no haya sido posible captar, utilizar, filtrar, podrá ser dispuesta en cuerpos de aguas superficiales, pozos de absorción o en el mar únicamente con la aprobación de la Comisión Nacional de Agua de conformidad con la normatividad aplicable.</p>
<p>75. En el desarrollo u operación de cualquier tipo de proyecto se debe evitar y prevenir el derrame al suelo o cuerpos de agua de combustibles, lubricantes, grasas, aceites, pinturas u otras sustancias potencialmente contaminantes. De igual manera, se deberá disponer de manera adecuada de materiales impregnados con estas sustancias o de sus recipientes.</p>
<p>76. La infraestructura de movilidad debe evitar el uso de combustibles cuya huella ecológica tenga relación con la expansión de la agricultura en motocultivo, deforestación masiva y uso de agroquímicos.</p>
<p>77. Los desarrollos turísticos deberán implementar sistemas de captación de agua de lluvia para aprovechamiento y uso humano.</p>
<p>78. Los desarrollos turísticos de cualquier tipo deberán instalar tecnologías de bajo consumo, que permitan disminuir el consumo de agua en relación con equipos tradicionales, ya sean regaderas ahorradoras, grifos con temporizadores de cierre automático, inodoros de bajo consumo, mingitorios cero consumos, entre otros como baños secos, sistemas de bioclimática, considerando lo establecido en la NMX-AA-157-SCFI-2012.</p>
<p>79. No se deberán construir y/o instalar barreras de contención de playas, dunas costeras y humedales.</p>

80. No se permite modificar el contorno costero, eliminar manglar y pastos marinos, alterar la calidad del agua, ni hacer relleno del litoral rocoso para el caso de andadores de acceso a la costa y asoleaderos con piso de arena deberán instalarse con principios de bio-construcción, adaptados al terreno **muy importante la cimentación en palafitos terrestres y columnas elevadas a partir del suelo, e infraestructura “esponja” sensible al agua**, en espacios públicos.

81. No se permite modificar las islas de mangle ni los estromatolitos.

82. Queda prohibida la construcción de infraestructura en ecosistemas vulnerables o de alto valor escénico, cultural o histórico

Principios Sensibles al Agua para Zonas Rurales

Cuando se habla de que el acuífero de la Península de Yucatán es altamente vulnerable a la contaminación, se refiere al “potencial de pérdida de la calidad del agua subterránea con efectos dañinos en el ser humano y los demás seres vivos” (Pérez-Ceballos & Pacheco-Ávila, 2004), se debe precisar que existen diversas formas de contaminación: la directa y la difusa, rural y urbana.

Sobre las actividades rurales productivas, para satisfacer la industria agroalimentaria que se lleva a cabo en la zona de estudio, en algunos casos de forma mecanizada, hay dos que sobresalen por su magnitud e intensidad: a) la zona cañera y b) la zona de la comunidad menonita⁶; la primera consta de 22,000 hectáreas de cultivo de caña asociado al Ingenio San Rafael de Pucté (Vargas-Hernández, 2015) y la segunda, ubicada al oeste de la laguna Bacalar, es una comunidad cuya organización sociocultural se basa en la agricultura, pero con sistemas que derivan en la degradación del territorio y sus bienes naturales (Vargas y García 2017). Ambos campos de cultivo se desenvuelven bajo el esquema productivo mecanizado y de insumos tecnológicos con base en semillas mejoradas y el uso de diversos agroquímicos (Godínez 2016) consistentes en contaminantes orgánicos persistentes (COP’s) (organoclorados, organofosforados y piretroides)

⁶ Entre los años 2000 y 2005 una comunidad procedente de Little Belize y Shhipyard logra la sesión de derechos ejidales por 5,000 ha las cuales convierten luego en ejido llamado Salamanca, a partir de ellos se ha venido dando una dinámica de Cambio de Uso de Suelo lícito como ilícito: en 2003 logran la autorización de cambio de uso de suelo (CUS) de 960 ha y comienzan el desmonte, comienzan los trámites para el CUS de 2,500 ha más la cual declinan ante los altos costos de pago de compensación (25 m.d.p.) y comienzan a realizar los desmontes de forma ilícita (Vargas y García 2017).

(Vargas-Hernández, 2015), incluso forman parte de paquetes tecnológicos distribuidos por agentes gubernamentales.

Los COP's se caracterizan por ser móviles y persistentes, viajan por el agua, el suelo y el aire, y causan un deterioro en el acuífero que puede ser irreversible ya que no existen técnicas efectivas de remediación de suelo o agua una vez que dichos compuestos se han lixiviado y viajan por las diversos componentes ambientales interconectados entre sí: suelo-zona vadosa-subsuelo-matriz rocosa-agua- pozos de bombeo-ingesta-cadena trófica; todo termina contaminado por dispersión de los COP's en todos los elementos del sistema conectivo (Vargas-Hernández, 2015), lo que vulnera la salud humana y del resto de los seres vivos, pues son compuestos de difícil degradación, altamente tóxicos, mutagénicos y teratogénicos, que causan alteraciones de funciones reproductivas y metabólicas. Los organofosforados son altamente tóxicos, inhiben el sistema antioxidante.

Se ha podido determinar de forma precisa, que estos compuestos viajan de sur a norte en la zona cañera, es decir, de la zona de abasto del ingenio hacia el río Hondo (límite internacional México-Belice) y hacia la laguna de Xul Ha-Bacalar; también han sido encontrados en pozos agrícolas y de abasto (Leal-Bautista, 2014; Vargas-Hernández, 2015); en el caso de las tierras de la comunidad menonita, viajan de oeste a este, hasta la laguna Bacalar.

Dado lo anterior y por considerarlo de extrema importancia para el resguardo de la interdependencia funcional de los elementos naturales, se presentan a continuación algunos principios para la operación en el campo, reconociendo que esta información puede ser ampliada en futuras investigaciones.

Principios Sensibles al Agua en temas rurales
83. Las Agroindustria y cultivos mecanizados no deberán utilizar agroquímicos prohibidos por el Convenio de Estocolmo y el de Rotterdam. Así mismo su uso debe apegarse a las consideraciones de la Guía de Plaguicidas y regularse de forma especial en zonas de importancia para la filtración de agua al acuífero, aunque estén autorizados emitida por la CICOPLAFEST y los demás lineamientos que esta Comisión señale.
84. Con el objetivo de minimizar la fragmentación de los ecosistemas y mantener corredores biológicos se deberá sistemas agrosilvopastoriles.
85. Todos los residuos del sector agrícola, como residuos de cosecha, entre otros deberán de ser sometidos a procesos de composteo y/o biodigestión.

86. Se debe privilegiar el uso de humus de lombriz y otros abonos y mejoradores orgánicos de suelo sobre el uso de productos agroquímicos usados como mejoradores de suelo y fertilizantes
87. Aplicar el mulcheo natural en los cultivos que sean posibles para el control de la erosión del suelo y apoyar el control de malezas.
88. Aplicar la rotación de cultivos, de tal forma que en las unidades de producción agrícola con monocultivos permanentes y semipermanentes se deben realizar rotaciones por hasta 3 ciclos de cultivos intercalados; deberán además contemplar el manejo integral de malezas, plagas y enfermedades, el ahorro de insumos y la aplicación de prácticas de conservación de suelos.
89. Debe hacerse un uso sustentable de las áreas de cultivo, a través de prácticas agroecológicas que permitan un aprovechamiento permanente y más eficiente de los recursos naturales
90. Se debe considerar la creación y el mantenimiento de cercas vivas usando especies nativas.
91. Se deben implementar prácticas agroecológicas que prevengan la erosión del suelo.
92. Quedan prohibidas las actividades de utilización confinada, liberación experimental, liberación en programa piloto y de liberación comercial de Organismos Genéticamente Modificados (OMG's) dentro de la superficie que regula el presente Ordenamiento Ecológico Local, toda vez que se considera que tales actividades atentan contra la diversidad biológica, atentan contra la sanidad animal de las actividades pecuarias y agrícolas; y constituyen un peligro de daño irreversible
93. Se deben instalar sistemas de riego de bajo consumo de agua y promover la implementación de nanotecnologías que pueden garantizar el aumento productivo y de crecimiento, en plantas y animales, por medio de agua activa y agua viva, así mejorarán los parámetros de crecimiento por el uso de agua viva y oxigenada.
94. Regular el uso de plaguicidas químicos en zonas de recarga al acuífero, ya que la actividad agrícola se puede realizar con un enfoque libre de agroquímicos, basándose en el uso óptimo de los recursos naturales, diversificación de cultivos y fertilizantes de origen natural. E
95. El uso de garrapaticidas o de otros compuestos químicos para el control de parásitos y enfermedades en el ganado, deberá hacerse en sitios previamente autorizados para ello y conforme los principios del Manejo Integrado de Plagas (MIP) definido en la NMX-ZZ-159-SCFI-2012
96. Los nuevos proyectos pecuarios deben considerar alternativas silvopastoriles y agroforestales, así como la reconversión de la ganadería a ganadería estabulada.

97. Las áreas de estabulación para ganado deberán evitar filtraciones al subsuelo y contaminación de los escurrimientos superficiales
98. Implementar sistemas agroforestales y Agroforestería Sintrópica (manual de agroforestería sintrópica pág. 73) permitiendo su autorregulación, con el uso de diversas especies nativas, de árboles maderables, frutales, hortalizas y ganado en semi-estabulación intensiva, disponiéndolos en zonas estratégicas con poda selectiva permitiendo el paso de luz, pero generando biota natural reincorporando microorganismos al suelo.
99. La poda se debe triturar en partes, lo más pequeñas posibles y se reincorpora al suelo en camas para generar micro ecosistemas, estas camas pueden ser del suelo hacia arriba o excavar.
100. Antes de implementar uso agrícola, es necesario hacer un análisis de las propiedades del suelo y árboles susceptibles a poda, y propiciar las condiciones deseables con el mínimo movimiento del suelo para evitar su compactación y pérdida de microorganismos.
101. Para retención de humedad en el suelo de los cultivos, se debe diseñar canales de infiltración de forma estratégica conforme la escorrentía del lugar, esto produce una cuenca artificial que absorbe agua y nutrientes como alternativa de transformación de cultivos tradicionales (monocultivo y desmontado).
102. Las camas se deben componer de materia seca y especies que pueden retener agua, como el uso del tronco de las plantas partidas a la mitad.
103. Cambiar la práctica de rosa, tumba y quema por rosa, tumba y pica o rastroja.
104. Hacer uso de especies nativas para generar simbiosis entre individuos, evitar competencia y aprovechar, por ejemplo, la fijación de nitrógeno de forma natural.
105. Construir sistemas de captación de agua de lluvia en las parcelas para implementar un sistema de riego que evite la implementación de pozos.
106. Hacer camas de materia orgánica densa antes de iniciar el cultivo y se deberán usar abonos orgánicos como estiércol, composta y bocashi.
107. Buscar nichos de mercados que sean factibles en la cadena de valor, evitando intermediarios aportando un valor agregado a su producción, generando redes de productores, de semillas y de comercialización.
108. Practicar la rotación de cultivos y métodos que conservan los bienes naturales. Como métodos de vanguardia basados en la Agroforestería Sintrópica (Manual de agroforestería sintrópica, pág. 73) como medio para la recuperación de la biomasa en zonas deforestadas.

109.Los residuos sólidos y líquidos deben pasar por un proceso de transformación en biodigestores para la correcta producción de gas natural y fertilizantes orgánicos.
110.Los sistemas de riego deben disminuir el uso de agua, siendo adaptable el riego de microaspersión y por goteo que es localizado y tiene una eficiencia mayor comparado con el rodado.
111.Modificar las prácticas agrícolas convencionales en la caña de azúcar, ampliando su sistema de corte en verde y sustituir la quema por la reincorporación de la biomasa al suelo.
112.Implementación de cultivos intensivos y reforestación de áreas impactadas por actividad antropogénica.
113.Aprovechar la vocación forestal del estado de Quintana Roo con planes de manejo sustentables, con la combinación de cultivos.
114.Se debe integrar infraestructura que facilite la entrega de residuos orgánicos domésticos y comerciales; un bote que se recoge cada dos días y se intercambia por uno limpio.
115.Construir un centro de separación y reciclaje de residuos sólidos urbanos para complementar el basurero municipal con composteo y generando empleos que se dediquen a separar y manejar la basura como punto Zero Waste y sus estándares internacionales de manejo de residuos.
116.Reforestar espacios sin producción con especies maderables locales como la caoba y el cedro
117.Generar empresas forestales y de producción in situ, en lugar de extraer madera, promover productos terminados de venta local y permitir la comercialización de guano.
118.Permitir los espacios de producción con cierto número habitantes para la preservación del ecosistema natural.
119.Establecer alternativas a la ganadería con especies nativas rentables como tepescuincle, venado, pavo de monte etc.. en sistemas estabulados intensivos y extensivos que consideren liberación de una parte de la población para reintroducción a su ecosistema.
120.Fomentar e implementar asesorías demostrativas con prácticas alternativas de agricultura orgánica y biodinámica.

121.Implementar el cultivo de especies maderables nativas para uso maderable, incrementando la biomasa y servicios ambientales.
122.Sustituir el suministro forrajero a la ganadería en estabulación intensiva, por especies proteicas que no requieren un sistema mecanizado de riego, ni fertilizantes, como la moringa oleífera, (que aporta el 30% de proteína) y el Ramón, Brosimum alicastrum
123.Implementar Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA) con especies nativas y/o endémicas como el Tapir mesoamericano (Tapirus bairdii) parte fundamental de la cadena alimenticia del Jaguar.
124.Utilizar técnicas de control biológico y de feromonas para evitar el uso de pesticidas por ejemplo, usando captura espía como las mariquitas, Coccinellidae.
125.Utilizar especies forestales maderables de poco requerimiento de agua, especies como caoba, teka y con uso de la asociación de cultivos.
126.Combinar sistemas agrícolas, con senderos interpretativos y UMA de diversos tipos con especies nativas de animales y plantas.
127.Fomentar el turismo de naturaleza entrelazado con la producciones agroecológicas y forestales
128.Producir local y vender local, eso disminuye energía, costos y beneficia la economía de forma endógena.
129.Producir papaya, nopal, aguacate nativo, a través de la asociación de cultivos.
130.Evitar el monocultivo, transitar a sistemas agroecológicos , agroforestería sintrópica y de permacultura.
131.Incorporación de materia orgánica y rastrojos en la misma parcela para conservar la humedad del suelo.
132.Los sistemas pecuarios en los que cada productor tenga mínimo 1 ha de forraje de corte para ensilar y conservar para el periodo de estiaje.

133.No hacer uso de semilla patentadas. Sí conservar semillas nativas, a través de ferias de intercambio donde por cada 1 kg se devolverán 5 kg de semilla nativa. Así como construir bancos colectivos de semillas distribuidos por cada tres comunidades.
134.Generar zonas de producción de insumos para otros sistemas agroforestales como la implementación de lombricomposta.
135.Es deseable que la composta provenga de la recolecta de los residuos orgánicos de zona urbana, negocios como: restaurantes, hoteles, carnicerías, hogares; parque y jardines.
136.Prohibir la quema de hojarasca y residuos o desperdicios domésticos, pues éstas son útiles como biomasa para el compostaje.
137.Construir un sitio estratégico con las escuelas, crear fuertes campañas de sensibilización, capacitación y comercialización para lograr la separación secundaria de los residuos urbanos.
138.Se prioriza la utilización de los biofertilizantes para la nutrición de las plantas y el control integrado de plagas.
139.Establecer parcelas biodiversas para 1.- disminuir el requerimiento de fertilización 2.- optimiza el uso del espacio, favorece la formación y esterilización del suelo. 3 - controlar y/o disminuir el impacto de plagas. 4- fomentar la reproducción de insectos polinizadores
140.Diseñar las parcelas de forma integrada, considerando la topografía del sitio, de manera que la hidrología del terreno aproveche la lluvia para el riego.
141.Implementar el sistema agroforestal (SAF), el sistema Agroforestería Sintrópica Urbana (ASU)(manual de agroforestería sintrópica pág. 73), el sistema Agroforestería Sintrópica Rural (ASR) y el sistema milpa (MIAF) intercalada con árboles frutales.
142.Transformar las áreas agrícolas convencionales, con asesoramiento para los campesinos, implementando la producción orgánica, el forraje verde hidropónico en tiempo de canícula para disminuir y optimizar el uso de agua.
143.Impulsar la producción para el auto consumo, haciendo uso de la tierra destinando un 95% para conservación y 5% para el sustento de las familias, y conservación de las selvas.
144.Promover el uso de sistemas integrales como el sistema acuaponia de recirculación de agua y combinación de producción de hortalizas y peces, disminuyendo el consumo y contaminación de agua.

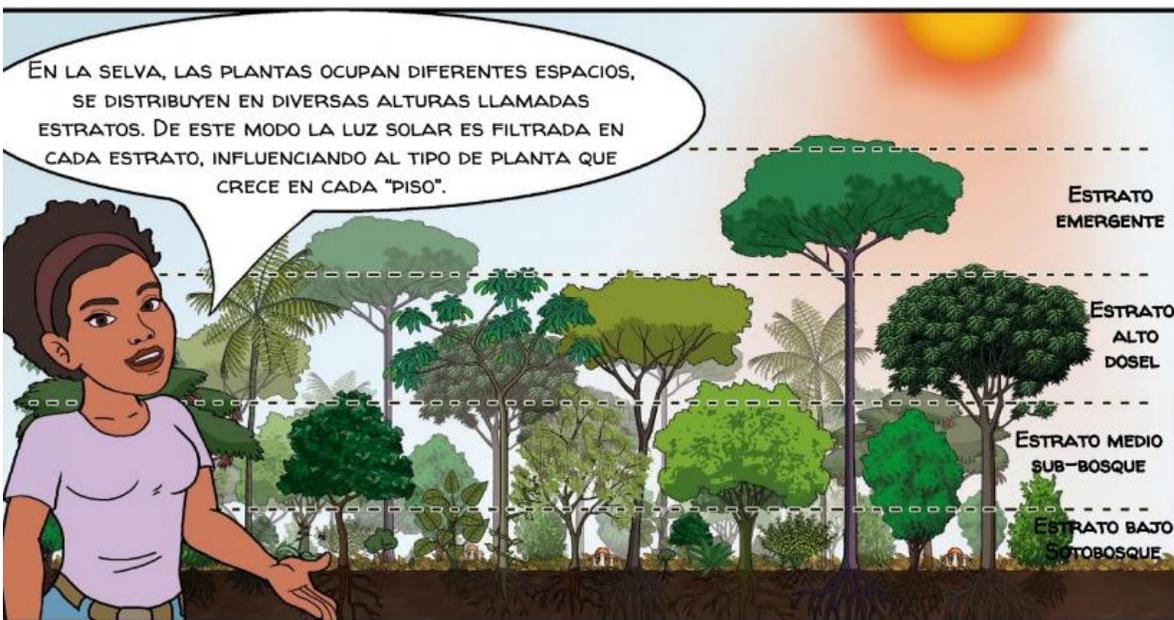
Manual de Agroforestería Sintrópica en Historieta.

La agroforestería es el término utilizado para los sistemas y las tecnologías de uso de la tierra y producción de comida sin usar venenos y mejorando el medio ambiente. En estos sistemas se combinan plantas leñosas perennes con cultivos agrícolas o animales en la misma parcela de tierra; diversifica y sustenta la producción para incrementar los beneficios económicos, sociales y ambientales de los usuarios. **El manual de agroforestería sintrópica se encuentra en extenso en agroflorestaemquadrinhos.wordpress.com**

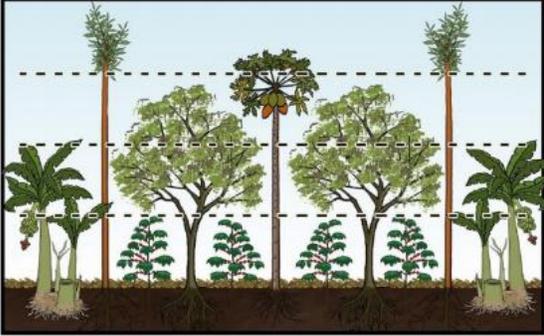
Su cita bibliográfica es Becker Lotufo Junior Joao Paulo & Cesar Claro Trevelin, (2019). Agroforestería en Historieta, un pequeño manual práctico.



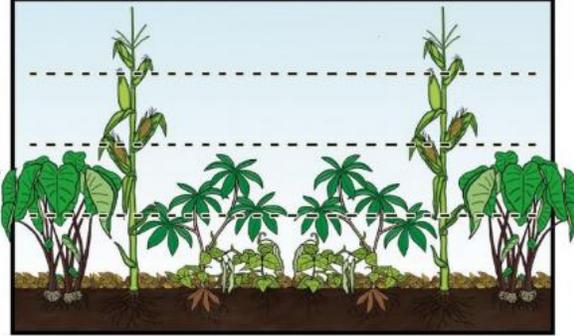
ESTRATOS Y SUCESIÓN



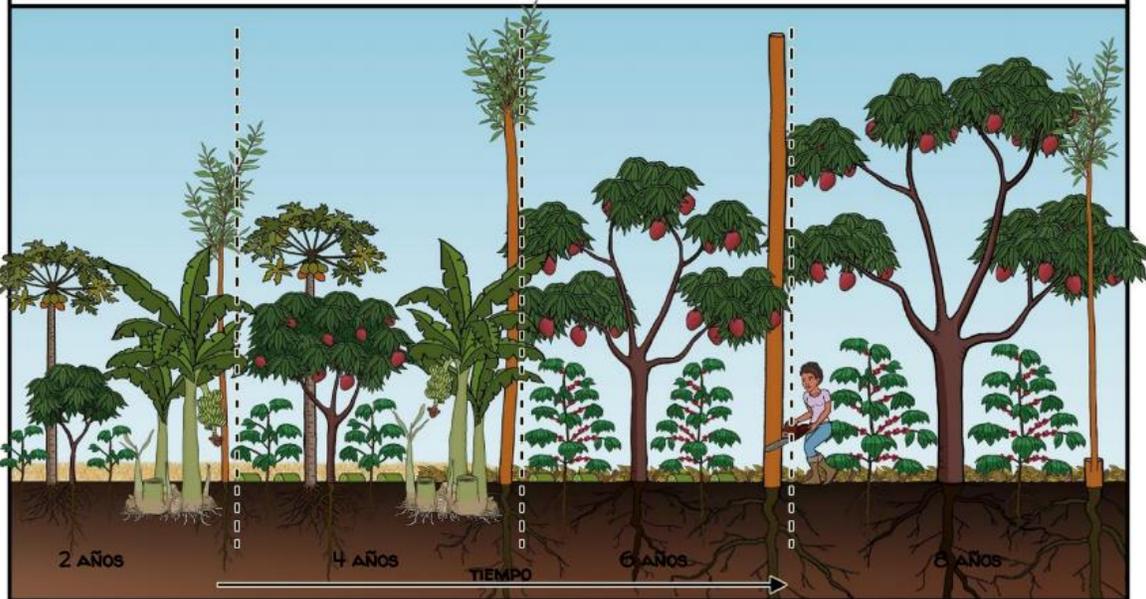
CUANDO PLANTAMOS CON AGROFORESTERÍA SEGUIMOS ESA MISMA ORGANIZACIÓN.



ÉSTA LÓGICA TAMBIÉN PUEDE SER APLICADA A LOS MÁS DIVERSOS CAMPOS DE AGRICULTURA Y HORTICULTURA.



Á LO LARGO DEL TIEMPO, EL AGRICULTOR PUEDE OPTAR POR MANEJAR EL LUGAR, ESCOGIENDO LAS PLANTAS QUE ÉL PREFIERA Y COLOCAR LAS PODAS EN EL TERRENO COMO FERTILIZANTE. DE ESTA MANERA EL AMBIENTE SE ENRIQUECE Y CRECEN OTRAS PLANTAS.



Retos y Oportunidades

Retos:

1. Aunque existe apoyo legal e institucional para las alternativas descentralizadas, su implementación es limitada
2. Mantener una proporción de espacios naturales sin perturbación durante la planeación del ordenamiento territorial requiere la implementación de mecanismos para que la tenencia de la tierra lo permita.
3. Salvo el presente, existen insuficientes manuales de diseño, guías metodológicas y normas nacionales que sustenten la implementación de las alternativas propuestas
4. Los planeadores están acostumbrados a las propuestas convencionales. Cambiar el enfoque hacia un sistema de gestión descentralizado es complicado y requerirá cambios en los programas de ordenamiento.
5. Los profesionales involucrados en la planeación de ciudades y gestión hídrica desconocen las ventajas de un sistema descentralizado.
6. La gestión convencional de agua pluvial mantiene el agua fuera de la vista de los habitantes, lo que impide que adopten un papel activo, que se involucren y adquieran un compromiso en la problemática hídrica.
7. Falta de pertenencia socio cultural y amor al agua como fuente de ingresos y forma de vida.
8. El avance en la pulverización de la tierra a través de la lotificación que no es congruente con el territorio es uno de los más importantes retos.

Oportunidades:

1. Realizar más investigaciones en materia de costos y desempeño individual de las alternativas, reforzando el apartado técnico
2. Actualizar el programa de ordenamiento territorial, incluyendo los principios mencionados anteriormente, incentivando la reducción o mantenimiento de escorrentía pluvial a través de la conservación de áreas verdes naturales
3. Promover la elaboración de guías metodológicas, pruebas piloto y manuales de uso y diseño de alternativas sensibles al agua
4. Establecer el ordenamiento territorial actualizado como parámetro obligado para los nuevos desarrollos y finalmente, modificar programas de desarrollo urbano
5. Llevar a cabo talleres que involucren a todas las partes: profesionales, comunidad, iniciativa privada e instituciones de gestión, para educarlos en las ventajas del sistema propuesto
6. Presentar las ventajas y el funcionamiento de las alternativas en los talleres dirigidos a la comunidad, de este modo involucrar e incentivar la participación ciudadana en el cuidado del recurso y el entorno.
7. La implementación debe ser a nivel Cultural para que los habitantes lo absorban como parte de sus hábitos y costumbres. Conformando así arraigo y pertenencia a las Aguas y su simbiosis financiera, ambiental y turística.

Bibliografía

- Armitage, N., Fisher-Jeffes, L., Carden, K., Winter, K., Naidoo, V., Spiegel, A., . . . Coulson, D. (2014). *Water Sensitive Urban Design (WSUD) for South Africa: Framework and Guidelines*. Cape Town: Urban Water Management Research Unit.
- Becker-Lotufo, J. P., & Claro-Trevelin, C. (2019). *Agroforestería en Historieta, un pequeño manual práctico*. Obtenido de agroflorestaemquadrinhos.wordpress.com
- Brown, R. R., Keath, N., & Wong, T. H. (2009). Urban water management in cities: historical, current and future regimes. *Water Science & Technology*, 847-855. doi:10.2166/wst.2009.029
- Brown, R., Rogers, B., & Werbeloff, L. (2016). *Moving toward water sensitive cities: A guidance manual for strategists and policy makers*. Clayton: CRC for Water Sensitive Cities.
- Carrillo-Rivera, J. J., Cardona, A., Huizar-Álvarez, R., & Graniel, E. (2008). Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in México. *Environmental Geology*, 303-319. doi:10.1007/s00254-007-1005-2
- Ceballos-Bernal, A. I., Baró-Suárez, J. E., & Díaz-Delgado, C. (2016). Estimación de pérdidas económicas directas provocadas por inundación. Aplicación de las curvas inundación-daños en países en desarrollo. *Investigaciones Geográficas. Instituto Interuniversitario de Geografía. Universidad de Alicante.*, 169-180.
- CENAPRED; Salas-Salinas, Marco A.; Jimenez-Espinosa, Martín. (2014). *Inundaciones (Versión Electrónica)*. Ciudad de México: CENAPRED.
- Centeno, K. M., Legendre, P., Beltrán, Y., Alcántara-Hernández, R. J., Lidström, U. E., Ashby, M. N., & Falcón, L. I. (2012). Microbialite genetic diversity and composition relate to environmental variables. *Federation of European Microbiological Societies, Blackwell Publishing Ltd.*, 724-735.
- CONAGUA. (2015). *Libro 4: Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado (Vol. 4)*. CDMX: CONAGUA.
- CONAGUA. (2015). *Metodologías de Evaluación Socioeconómica y Estructuración de Proyectos de Inversión (Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento, Mejoramiento de Eficiencia y Protección a Centros de Población)*. México: SEMARNAT.
- Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities. (6 de Diciembre de 2017). *Why a water sensitive city?* Obtenido de *What is a water sensitive city?*: <https://watersensitivecities.org.au/what-is-a-water-sensitive-city/>
- Espinosa, M. L. (2011). *Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano*. Bogotá.
- Espinoza-Ávalos, J., & IAGH-AHA. (2009). *El sistema ecológico de la Bahía de Chetumal/Corozal: costa occidental del Mar Caribe*.
- Fernández Rubio R, Baquero Úbeda JC. 2006. Acuíferos Kársticos Costeros. Introducción a su

- conocimiento. :60–97. <https://docplayer.es/65514343-Key-words-karst-hydrogeology-coastal-aquifers-sea-water-intrusion-corrosion-brackish-spring-water-protection.html>.
- Gischler E, Golubic S, Gibson MA, Oschmann W, Hudson JH. 2011. Microbial Mats and Microbialites in the Freshwater Laguna Bacalar, Yucatan Peninsula, Mexico. Springer Berlin Heidelberg. p. 187–205. [accessed 2017 May 11]. http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-10415-2_13.
- Gleason-Espíndola, J. A. (2016). *Gestión y planeación del sistema hidrosanitario del Área Metropolitana de Guadalajara: un reto hacia la sustentabilidad*. Guadalajara, Jalisco, México: Universidad de G.
- INEGI; DigitalGlobe. (09 de febrero de 2019). Imagen satelital 2018-2019.
- Godínez CV. 2016. Vulnerabilidad socioambiental y economías campesinas: La experiencia menonita en Quintana Roo en el sur de México. El Colegio de la Frontera Sur.
- Granier, C. E., Morris, L. B., & Carrillo-Rivera, J. J. (1999). Cases and solutions: Effects of urbanization on groundwater resources of Mérida, Yucatán, México. *Environ. Geol.*, 37. Recuperado el 27 de Mayo de 2017, de <http://usf-reclaim.org/wp-content/uploads/2014/04/EffectsofUrbMexico.pdf>
- H. Ayuntamiento de Othón P. Blanco, Quintana Roo. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. (2018). *Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López-Huay Pix*. Othón P. Blanco, Quintana Roo: SEDATU. Recuperado el 15 de Septiembre de 2018, de <http://www.opb.gob.mx/portal/wp-content/uploads/transparencia/93/l/f/PDU2018/PDU%20integrado%2019012018-publicacion%20digital.pdf>
- Ibarra Madrigal, S. M. (2019). *Estrategias de comunicación para el Ordenamiento Ecológico Territorial en el sistema kárstico de Bacalar (Tesis de maestría)*. Chetumal, Quintana Roo: El Colegio de la Frontera Sur.
- IMTA-CAPA. (2016). *Estudio Geohidrológico en el Acuífero de Chetumal, Quintana Roo*. Ciudad de México: IMTA.
- INEGI. (2016). *Carta de uso de suelo y vegetación, serie VI*.
- Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo. (2017). *Manual de Lineamientos de Diseño de Infraestructura Verde para Municipios Mexicanos*. Hermosillo, Sonora.
- Jefferies, C., & Duffy, A. (2011). *The SWITCH transition manual*. UK: University of Abertay Dundee.
- Kambesis, P. N., & Coke IV, J. G. (2016). The Sac-Actún System, Quintana Roo, México. *Boletín Geológico y Minero (Tomo 127)*, 177-192.
- Leal-Bautista, R. M. (2014). *Reporte final del proyecto "Determinación de agroquímicos lixiviados en la zona cañera de Quintana Roo"* (Vol. 1). (D. R. Bautista, Ed.)
- McDonald, R., & Shemie, D. (2014). *Urban Water Blueprint: Mapping conservation solutions to the global water challenge*. Washington, D.C.: The Nature Conservancy.

- Michener, R. H., & Lajtha, K. (2007). *Stable isotopes in ecology and environmental science*.
- NASA. (2004). *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). Raster*. United States of America: N.A. Administration Ed.
- Pérez-Ceballos, R., & Pacheco-Ávila, J. (2004). Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Redalyc*.
- Perry, E., Paytan, A., Pedersen, B., & Velazquez-Oliman, G. (2009). Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and hydrogeology. *J. of Hydrol.*(367), 27-40. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.026.
- Rosado-Varela, Á. A., & Medina-Argueta, G. (2014). Ciclo de vida turístico de Bacalar, Pueblo Mágico, Quintana Roo. *Sistema de Información Científica. Teoría y Praxis (15)*, 96-120.
- SEDETUR. (2018). *Indicadores turísticos de Quintana Roo*.
- SEDETUS; H. Ayuntamiento de Bacalar. (en prep.). *Programa de Desarrollo Urbano del Centro Urbano de Bacalar*. Secretaria de Desarrollo Territorial Urbano Sustentable.
- Tóth, J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeol. J.*(7), 1-14. doi:10.1007/s100400050176
- Vargas-Hernández, A. A. (2015). *Impacto de compuestos orgánicos persistentes (COP's) en la Zona Sur del Acuífero de Quintana Roo, México*. Cancún: CICY.
- Vargas GC, García OM. 2017. Apropiación y manejo de recursos para la agricultura. Colonias menonitas en Quintana Roo. SER Migrante.

ANEXOS

Especificaciones técnicas de las infraestructuras sensibles al agua (infraestructura esponja).

Jardín de lluvia

Especificaciones descriptivas

	Jardín de lluvia
UNIDAD DE MEDIDA	PIEZA
DESCRIPCIÓN	
<p>Jardines con hendiduras sobre el terreno, de manera que éstos alcancen un nivel menor a la de las superficies aledañas para captar agua de lluvia (escorrentía pluvial) por medio de las capas permeables en los niveles inferiores que lo conforman. Este sistema tiene la función de biorretenedor, de modo que detiene los contaminantes para mejorar la calidad del agua que se infiltra; esto se logra a través de diferentes mecanismos físicos, químicos y biológicos por las diferentes capas superiores.</p> <p>Estas estructuras también pueden dotarse de tubería ranurada ubicadas en las capas drenantes, lo que permite el traslado del agua a otro sitio o su almacenamiento para su uso.</p>	

PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Delimitación del área de influencia por medio de cal sobre el suelo y pintura en banquetas y guarniciones 2. Se evalúa la infiltración, por medio de una prueba de percolación 3. Excavación por medios manuales 4. Se incorpora la membrana impermeable sobre los lados donde sea necesario (si es el caso) 5. Posicionamiento e instalación del pozo de visita (si es el caso) 6. Configuración de la capa drenante 7. Montaje de la tubería perforada (si es el caso) 8. Instalación de la barrera de suelo geotextil (si es el caso) 9. Estructuración e instauración del conducto filtrante 10. Colocación de la capa sustrato 11. Estructuración de la microcuenca 12. Configuración del bordo 13. Revestimiento de taludes con roca con un mínimo de 10 cm de diámetro 14. Conformación del filtro de sedimentos 15. Colocación de la franja filtro 16. Sembrado de vegetación y estructuración de los espacios para cada planta 17. Revestimiento con acolchado 18. Ensayo de funcionamiento 	
TOLERANCIAS PARA ACEPTACIÓN	
ENSAYOS A REALIZAR	
Evaluación de la infiltración del sitio por medio de una prueba de percolación	
MATERIALES	
<ul style="list-style-type: none"> ● Gravilla de ¾" ● Grava gruesa de al menos 10 cm ● Hojarasca o corteza de la zona triturada ● Sustrato de suelo (Luvisol) ● Grava de 1'-3' ● Guarnición y desborde de concreto 	
EQUIPO	
Herramienta menor	
MANTENIMIENTO	
<ul style="list-style-type: none"> ● Se debe de podar, deshierbar la vegetación en el jardín, además de que los primero 3 años a partir de su instalación, riego en la temporada de seca ● Limpieza de entrada de agua, antes y después de la temporada de lluvia en tiempos cortos establecidos ● Limpieza del filtro de sedimentos por lo menos 2 veces al año. 	
DESPERDICIOS	MANO DE OBRA
Incluidos:	Incluida:
REFERENCIAS Y OTRAS ESPECIFICACIONES	
<ul style="list-style-type: none"> ● Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para Municipios Mexicanos 	

<ul style="list-style-type: none"> • Unidades de medida según lo define el artículo 5, segundo párrafo de la Ley Federal de Metrología y Normalización
MEDIDA Y FORMA DE PAGO La unidad de medida será por pieza, considerando como pieza todas aquellas partes que lo conforman y tienen un propósito en la pieza para su correcto funcionamiento integral. Tomando consideración de los diferentes procedimientos necesarios para su correcta colocación, instalación y funcionamiento
NO CONFORMIDAD En caso de no conformidad con estas especificaciones, durante su ejecución ó a su terminación, las obras se considerarán como mal ejecutadas. En este evento, el Constructor deberá reconstruirlas a su costo y sin que implique modificaciones y/o adiciones en el plazo y en el valor del contrato

Especificaciones funcionales

Entre los componentes que distinguen a esta estructura, se mencionan los siguientes:

Componentes	Medidas	Observaciones	Función
Entradas de agua	0.60 m de ancho, con bordos a 45°	Deben de estado colocadas a 15 cm del inicio de la unidad y 15 cm antes del fin de ésta.	Acceso de entrada a la microcuenca
Filtro de sedimentos	0.60 m de ancho 0.30 m de largo	A base de gravilla de la región, debe de cubrir la entrada de agua	Retención de los sedimentos, para mantener la permeabilidad de la infraestructura
Franja-filtro	Variable, figura irregular	Debe delimitar la microcuenca, está formada a base de piedra de la región	Ayuda a retener los sedimentos y que éstos fluyan fueran
Acolchado	0.10 m de espesor	Formado por piedra "tipo granson" como se le conoce en la zona, son gravas de entre los 3.5- 10 mm	Reduce la evaporación e impide que el sustrato de suelo se erosione
Microcuenca	Dimensiones variables, desarrollada a lo largo del jardín	Delimitada por piedras de la zona	Captación y concentración del agua pluvial
Capa de sustrato	0.70 m de profundidad, 1.50 m de ancho y 5 m de largo	Compuesta por Luvisol, sustrato local	Para el desarrollo de la vegetación
Capa drenante	0.60 m de profundidad x 1.50 m de ancho x 5 m de largo	Compuesta por piedra gruesa local de 1'-3' de diámetro, con 20%-40% de vacíos	Captación y filtración del agua
Barrera de suelo geotextil polyester (si aplica)	1.50 m de ancho x 5 m de largo	Debe considerarse el espacio del conducto filtrante	No permite la mezcla de las diferentes porosidades entre una capa y otra
Membrana impermeable (si aplica)	60 cm de profundidad x 5 m de largo	Debe colocarse en el(los) lado(s) donde se pretenda	Protección para las infraestructuras de

		proteger las estructuras aledañas de la humedad.	cimiento aledañas a ésta
Conducto infiltrante	0.30 m de diámetro x 0.70 m de alto	Compuesto por piedra gruesa local de 1'-3' de diámetro	Aumenta la velocidad e infiltración del agua
Desborde	0.05 m de alto x 0.60 cm de ancho	Guarnición de concreto	Para liberar presión del agua a la infraestructura
Bordo	0.30 m de largo por 0.05 m de alto	Ubicado solo en el lado donde se encuentren la entrada y salida, en los espacios que nos pertenezcan a la microcuenca	Para reducir el riesgo de caer en la cuenca
Pozo de observación	0.05 m de diámetro x 1.30 m de alto	Ubicada fuera de la microcuenca	Para la revisión y registro de monitoreo

Bio-canal

Especificaciones descriptivas

	Bio-canal
UNIDAD DE MEDIDA	Metro lineal
DESCRIPCIÓN	
Son jardines sobre un terreno cóncavo para que el nivel de piso sea inferior con respecto a las superficies adyacentes para captar agua de lluvia. Las microcuencas pueden construirse sobre espacios puntuales o extenderse a lo largo de un camino para formar canales o arroyos de retención e infiltración de agua pluvial.	
PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Delimitación del área de aplicación por medio de cal en el suelo pintura en banquetas y guarnición 2. Estimación de la infiltración por medio de una prueba de percolación 3. Excavación y estructuración de la microcuenca 4. Recubrimiento de taludes con roca de mínimo 10 cm de diámetro y membrana impermeable (si es el caso) 5. Conformación del filtro de sedimentos 6. Plantación de vegetación 7. Recubrimiento con acolchado 8. Prueba de funcionamiento 	
TOLERANCIAS PARA ACEPTACIÓN	
ENSAYOS A REALIZAR	
Evaluación de la infiltración del sitio por medio de una prueba de percolación	
MATERIALES	
<ul style="list-style-type: none"> ● Grava gruesa de al menos 10 cm ● Hojarasca o corteza de la zona triturada ● Sustrato de suelo (Luvisol) ● Grava de 1'-3' ● Entradas de agua con guarnición de concreto 	

EQUIPO Herramienta menor	
MANTENIMIENTO <ul style="list-style-type: none"> ● Mantenimiento rutinario de áreas verdes como podas, deshierbe, riego los primeros 3 años en temporadas secas, entre otros. ● Limpieza periódica de entradas de agua; una vez cada tres meses ● Limpieza de filtros de sedimentos; dos veces al año. 	
DESPERDICIOS Incluidos:	MANO DE OBRA Incluida:
REFERENCIAS Y OTRAS ESPECIFICACIONES <ul style="list-style-type: none"> ● Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para Municipios Mexicanos ● Unidades de medida según lo define el artículo 5, segundo párrafo de la Ley Federal de Metrología y Normalización 	
MEDIDA Y FORMA DE PAGO La unidad de medida será por pieza, considerando como pieza todas aquellas partes que lo conforman y tienen un propósito en la pieza para su correcto funcionamiento integral. Tomando consideración de los diferentes procedimientos necesarios para su correcta colocación, instalación y funcionamiento	
NO CONFORMIDAD En caso de no conformidad con estas especificaciones, durante su ejecución o a su terminación, las obras se considerarán como mal ejecutadas. En este evento, el Constructor deberá reconstruirlas a su costo y sin que implique modificaciones y/o adiciones en el plazo y en el valor del contrato	

Especificaciones funcionales

Entre los componentes que distinguen a esta estructura, se mencionan los siguientes:

Componentes	Medidas	Observaciones	Función
Entradas de agua	0.60 m de ancho, con bordos a 45°	Deben estar a cada metro	Acceso de entrada a la microcuenca
Filtro de sedimentos	0.50 m de ancho, longitud variable	A base de gravilla de la región	Retención de los sedimentos, para mantener la permeabilidad de la infraestructura
Franja-filtro	Variable, figura irregular	Debe delimitar la microcuenca, está formada a base de piedra de la región	Ayuda a retener los sedimentos y que éstos fluyan fueran
Acolchado	0.10 m de espesor	Formado por piedra "tipo granson" como se le conoce en la zona, son gravas de entre los 3.5- 10 mm	Reduce la evaporación e impide que el sustrato de suelo se erosione
Microcuenca	0.50 m de ancho, largo variable	Revestida con gravilla de la región y acolchado	Captación y concentración del agua pluvial
Capa de sustrato	0.70 m de profundidad, 0.50 m de ancho y largo variable	Compuesta por Luvisol, sustrato local, en ambos lados de la microcuenca	Para el desarrollo de la vegetación

Capa drenante	0.60 m de profundidad x 0.50 m de ancho y largo variable	Compuesta por piedra gruesa local de 1'-3' de diámetro, con 20%-40% de vacíos	Captación y filtración del agua
Barrera de suelo geotextil polyester (si aplica)	0.50 m de ancho y largo variable	Debe ir entre las capas que componen a la infraestructura	No permite la mezcla de las diferentes porosidades entre una capa y otra
Membrana impermeable (si aplica)		Debe colocarse en los lados donde se pretenda proteger las estructuras aledañas de la humedad.	Protección para las infraestructuras de cimiento aledañas a ésta

1 Comparativo económico entre un sistema de saneamiento individual (fosa séptica) y global (sistema de alcantarillado por gravedad más planta de tratamiento)

1.1 Sistema de Saneamiento comunitario

Antes de profundizar en el concepto de saneamiento de aguas residuales, es preciso comprender que aquellas aguas procedentes de uso determinado del agua natural son consideradas como residuales. De manera puntual, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura o FAO, por sus siglas en inglés, definen como agua residual a:

“Toda agua que no tiene valor inmediato para el fin para el que se utilizó ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella. No obstante, las aguas residuales de un usuario pueden servir de suministro para otro usuario en otro lugar”.

En su mayoría, las aguas residuales urbanas provienen de servicios domésticos y públicos, así como limpieza de locales y drenado de aguas pluviales.

Los sistemas de saneamiento comunitarios, o saneamiento centralizado, operan particularmente en áreas con alta densidad poblacional, debido a que la tecnología de tratamiento y recolección de aguas residuales suelen ser costosos para su construcción. En particular, este tipo de saneamiento debe considerar la reutilización y aprovechamiento de los subproductos generados. De igual forma, antes de aplicar el sistema de saneamiento comunitarios es preciso tomar en cuenta las estrategias y tecnologías, convencionales y no convencionales, con las que se dispone (CONAGUA, 2015).

El Saneamiento comunitario se caracteriza por recorrer distancias grandes en su zona de recolección, además de encontrarse a una mayor profundidad respecto al nivel de suelo, debido a que los colectores utilizados suelen ser de mayor tamaño. Por otra parte, este tipo de sistema aumenta en gran medida el riesgo de impacto a la red, debido a las altas probabilidades de averías o problemas de conducción, además de requerir una inversión adicional para redes auxiliares y una mayor capacidad de bombeo para conducir las aguas residuales hasta la planta, derivando en costos de inversión y conducción altos (Wilderer, 2001).

Otro rasgo de importante mención es el referente a la conducción pues es en esta etapa en la que se lleva a cabo una dilución de aguas residuales que contienen diversas concentraciones de patógenos y compuestos tóxicos de tal forma que se convierte en un sistema no sustentable, si no es diseñado y operado de manera adecuada (Crites, 1992).

1.2.1. Saneamiento de aguas residuales (AR).

En palabras textuales de la junta municipal de agua potable y alcantarillado de Mazatlán (JUMAPAM), se define al saneamiento de aguas residuales como:

“La herramienta fundamental utilizada dentro de las acciones para controlar la contaminación del agua, ya que a través de ellos se mejora la calidad de las aguas residuales proporcionando la posibilidad de su reutilización y la protección de los cuerpos receptores y la salud pública.”

Históricamente, en sus principios el tratamiento de aguas estaba dirigido a evitar problemas con la industria y la agricultura, más que a los problemas relacionados con la salud pública. Más adelante, al tomar relevancia la importancia de los altos índices de enfermedades relacionado a patógenos en cuerpos de agua potable, se comenzaron a idear nuevos métodos de tratamiento intensivo que posteriormente se verían aplicados. De modo que dio inicio al estudio de la precipitación química, digestión de lodos, filtración de aguas residuales y finalmente al desarrollo del proceso de lodos activado, llevado a cabo en 1912 (CONAGUA, 2015).

Por su parte, la organización mundial de la salud (OMS) considera que el saneamiento es fundamental para la salud pública. Con el fin de no exponer a la población a los residuos que se genera, por lo tanto, es preciso mejorar el acceso a los servicios de saneamiento básicos, así como gestionar correctamente las instituciones responsables para asegurar en su totalidad la cadena de saneamiento.

Cuando se aborda el tema del saneamiento de aguas residuales suele considerarse únicamente a la etapa de tratamiento y depuración, sin embargo, este proceso es realmente un sistema integrado por varios componentes (Sánchez, 2019). Inicia principalmente en la captación y conducción de AR a través de un intrincado sistema de alcantarillas denominado ‘red de drenaje urbano’, más tarde, según sea el caso, pasará o no por estaciones de bombeo encargadas de elevar la carga de presión por medio de sistemas mecánico, con el objetivo de alcanzar satisfactoriamente la planta de tratamiento, lugar donde comienzan los procesos de depuración y clarificación de residuos, así como la disposición de productos derivados.

En apartados posteriores se procederá a detallar cada uno de los componentes y procesos que integran el saneamiento de AR.

1.2.2. Sistemas de Alcantarillado.

Los sistemas de alcantarillado sanitario se componen principalmente de una red de tuberías de gran diámetro, el cual permite una gran flexibilidad en la operación del sistema, es definido principalmente por los parámetros que inciden directamente el caudal tales como la densidad de población y la proyección futura. A través de estas tuberías se deberá evacuar en forma eficiente y segura las aguas residuales domésticas, de establecimientos comerciales y, en su caso, aguas pluviales hasta una planta de tratamiento, para finalmente depositarse a un sitio de vertido.

El tipo de alcantarillado que se decida utilizar para cada proyecto, dependerá plenamente de las características del medio físico del asentamiento, así como por las condiciones económicas del proyecto (CONAGUA, 2015).

Un sistema de drenaje sanitario puede ser clasificado en sistemas convencionales y no convencionales de alcantarillado. Dentro de la clasificación de 'drenaje convencional' suelen encontrarse aquellos que en su mayor extensión transportan AR por acción de la gravedad, apoyados por estaciones de bombeo, únicamente en puntos cuya naturaleza topográfica complican el acceso. Es en esta clase donde se ubican los sistemas de drenaje sanitario y drenaje Pluvial, o bien, el alcantarillado mixto (CONAGUA, 2015).

Por el contrario, los sistemas de 'drenaje no convencional' surgen como respuesta a la dificultad de la aplicación de un alcantarillado tradicional; este tipo de sistemas suelen ser más flexibles. El drenaje por vacío es un ejemplo de este tipo, el cual retiene los sólidos de los efluentes de la vivienda por medio de una cámara colectora o un tanque séptico, mientras que el agua es transportada a un alcantarillado convencional de tuberías con diámetro más pequeño, como el utilizado en un alcantarillado convencional (CONAGUA, 2015).

1.1.2.1 Drenaje por gravedad.

Los sistemas tradicionales o convencionales suelen ser los de mayor uso para la recolección de AR y funcionan principalmente por medio de gravedad a través de sistemas de tuberías que van desde la descarga domiciliaria hacia una planta de tratamiento.

En general este sistema es confiable y no genera costos adicionales por consumo de energía eléctrica, sin embargo, necesita de un entorno topográfico que proporcione pendientes adecuadas para asegurar el flujo, si bien el operador puede apoyarse de excavaciones profundas para lograrlo, debe considerar que en algún punto de la red se verá con la necesidad de contemplar una estación de bombeo en caso de no conseguir las condiciones adecuadas, lo que se verá reflejado en el incremento de costos de construcción y de operación de la red de drenaje. Además, ofrece la posibilidad de manejar, de forma conjunta, aguas pluviales y AR al mismo tiempo, ver Imagen 1.

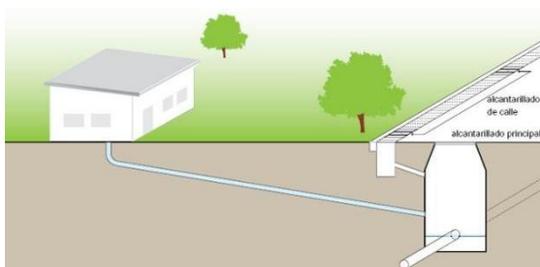


Imagen 1. Sistema de alcantarillado convencional combinado.

Fuente: Adecuación propia.

Por otro lado, también existen ciertas limitaciones en la implementación de este sistema, dado que requiere mucho tiempo para conectar las tomas domiciliarias y si las condiciones del terreno no son las propicias pueden resultar difícil y costoso. Se debe mencionar que el efluente y lodos de los interceptores requiere tratamiento secundario, o en su caso, una descarga apropiada.

Este tipo de drenaje suele utilizarse con plantas de tratamiento centralizados capaces de recibir grandes volúmenes de AR.

Una consideración importante si se pretende transportar aguas pluviales por el sistema de alcantarillado, es el de tomar en cuenta la colocación de rebosaderos de alcantarillado con el objetivo de evitar la sobrecarga hidráulica en plantas de tratamiento durante épocas de lluvia, dado que la infiltración llega a ser desfavorable en zonas donde la existencia de un alto nivel freático.

1.1.2.2 Drenaje por vacío.

Un sistema de alcantarillado por vacío (SAV), puede ser utilizado para una o más viviendas que, al igual que los drenajes por gravedad, fluye utilizando la topografía del suelo, sin embargo, antes de que el caudal recolectado alcance la red principal pasa por una cámara denominada 'cámara colectora' la cual se encuentra equipada con una válvula de vacío, ver Imagen 2. Cuando esta cámara alcanza cierto volumen de AR, la válvula se abre por medio de un diferencial de presión e impulsa el contenido hacia la red, misma que se encuentra provista por bombas de vacío cuya finalidad es la de mantener un nivel constante de presión en todo el sistema.

En una segunda etapa, las aguas residuales logran alcanzar hasta 5 m/s en la red mientras son transportados por una configuración de tuberías, conocidas como 'dientes de sierra', encargada de asegurar niveles de vacío adecuados al final de cada línea para evitar que la tubería se selle y el contraflujo. Posteriormente, las aguas residuales son depositadas en un tanque de vacío equipado con bombas cuya finalidad es separar el volumen de mezcla aire-gas del volumen AR, que se distribuyen hacia una planta de tratamiento, colector existente u otra red de alcantarillado (CONAGUA, 2015).



Imagen 2. Diseño clásico de un sistema de alcantarillado por vacío potable, alcantarilla y saneamiento, CONAGUA 2015.

Fuente: Manual de agua

Los sistemas de drenaje de vacío suelen ser adecuados cuando el nivel freático de la zona es alto, también puede ser una excelente opción en áreas inundables, terrenos rocosos, arenosos, inestables, etc. De igual forma puede resultar de mucha utilidad si es empleado en diseños de alcantarillado contrapendiente o en sistemas ecológicos sensibles.

1.2.3. Componentes de la red de alcantarillado.

Referencia conceptual obtenida del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (CONAGUA, 2015)

1.1.3.1 Red de atarjeas.

Red de atarjeas es la denominación que recibe al conjunto de tuberías y estructuras cuyo objetivo es el de recolectar y transportar las aportaciones de las descargas de aguas residuales hacia los

colectores, interceptores o emisores. El AR que ingresa paulatinamente a lo largo de la red crea caudales que se van acumulando, como consecuencia las secciones de tuberías sufren ampliaciones sucesivas razón por la que los tramos finales de la red suelen ser los de mayor dimensión.

Descarga domiciliaria o albañal exterior. Este elemento es el responsable de desalojar las aguas residuales, de las edificaciones a la atarjea. El diámetro mínimo recomendado para esta tubería es de 150 mm, ubicado en un registro de profundidad mínima equivalente a 600 mm, la conexión entre este componente y la atarjea debe ser hermética, procurando una pendiente mínima del 1% en la tubería de interconexión. La conexión entre la descarga domiciliaria y la atarjea se deberá realizar a través de un codo de 45 o 90 grados y un slant.

Atarjeas. Como se comentó anteriormente, las atarjeas son tuberías localizadas generalmente al centro de las calles, tienen como finalidad recolectar las aportaciones de los albañales. Para este elemento se considera un diámetro inicial de tubería de 200 mm, por lo general su diseño debe seguir la pendiente del terreno siempre que esta cumpla con los límites mínimos y máximos de velocidad, así como las condiciones de tirante mínimo.

Pozo de visita. Dos o más tramos de atarjeas deberán estar ligado entre sí mediante una estructura denominada pozo de visita, que permite el acceso de personal para la inspección y obras de limpieza, además de funcionar como elemento de ventilación de la red y de tal forma eliminar los gases acumulados, las uniones entre estos elementos deberá ser completamente hermética. Es común encontrar este componente en todos los cruceros, cambios de dirección, cambios de pendiente y cambios de diámetro, así como en los puntos de división en caso de que los tramos excedan la máxima longitud recomendada para las maniobras de mantenimiento. Generalmente son de forma cilíndrica en la base y troncocónica en la parte superior, se recomienda que la separación entre pozos de visita se encuentre respecto a la siguiente relación:

Tabla 7. Separación entre pozos de visita

Diámetro de tubería	Separación del tramo
$20\text{ cm} \leq D \leq 61\text{ cm}$	100 m
$61\text{ cm} < D \leq 122\text{ cm}$	125 m
$122\text{ cm} < D \leq 305\text{ cm}$	150 m

1.1.3.2 Colectores e interceptores.

Colector. Son las tuberías que reciben las aguas residuales de las atarjeas, su destino final puede ser en un interceptor, un emisor o en la planta de tratamiento.

Interceptor. Por su parte los interceptores son los elementos que interceptan las aportaciones de aguas residuales de los colectores y terminan en un emisor o planta de tratamiento. La distinción particular de este elemento y el anterior se debe a que ambos deben aspirar a ser una réplica subterránea del drenaje natural superficial.

Emisor. Es el conducto que recibe las aguas de uno o varios colectores (o interceptores) es denominado como emisor y no recibe aportación alguna de elementos como atarjeas o descargas domiciliarias, del mismo modo que los anteriores, su único destino es la planta de tratamiento. Sin embargo, el término ‘emisor’ puede ser empleado para identifica la tubería encargada de conducir las aguas tratadas (efluentes) de la planta de tratamiento al sitio de descarga o al sistema de reúso.

1.2.4. Estaciones de bombeo.

Son instalaciones integradas a por estructura civil y electromecánica, con el objetivo de enviar volúmenes de aguas residuales crudas o tratadas de un punto específico a otro generalmente ubicado a mayor elevación, se compone de elementos como el cárcamo de bombeo, una subestación eléctrica, equipo de bombeo, motor o motores eléctricos, controles, arreglos de descarga, equipos de maniobra, patio de bombas, casetas de vigilancia y control.

Cárcamo de bombeo. Es una estructura civil en donde descarga el colector, interceptor o emisor de AR o aguas tratadas, y es la parte física en donde se instalan los equipos electromecánicos utilizados para elevar el agua al nivel deseado. Este elemento está integrado por los siguientes componentes:

- Canal o tubo de llegada
- Transición de control y cribado, que se compone de:
 - Pantalla
 - Rejillas primarias
 - Desarenador y bombas de lodos
 - Rejillas secundarias
- Cámara de bombeo

1.2.5. Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Se le denomina PTAR al conjunto de operaciones y proceso encaminados a la depuración de aguas residuales antes de ser vertidos al sitio de descarga, de esta forma se pretende mitigar el daño a acuíferos (Lozano-Rivas, 2012). Las operaciones y procesos se diferencian entre sí, en que los primeros hacen referencia a procedimientos mecánicos de tipo físico en los que no se manifiestan cambios a nivel químico; por su parte los procesos unitarios involucran reacciones químicas o bioquímicas y cambios a nivel molecular.

Durante el procedimiento de depuración, estos factores intervienen directamente en las diferentes etapas. A nivel mundial se reconocen cuatro etapas de tratamiento para obtener una calidad de agua aceptable.

Pretratamiento. Aun cuando no se considera que logre remover significativamente las demandas bioquímicas de oxígeno (DBO) ni los sólidos suspendidos totales (SST) su función es la de remover todo sólido grueso, con el fin de evitar atascos, abrasión y daños en las tuberías y equipos de bombeo. Esta etapa incluye equipos tales como rejas, tamices, desarenadores y desengrasadores.

Tratamiento primario o tratamiento físico-químico. Busca reducir la materia suspendida por medio de la precipitación o sedimentación, con o sin reactivos, o por medio de diversos tipos de oxidación química

Tratamiento secundario o tratamiento biológico. Se emplea de forma masiva para eliminar la contaminación orgánica disuelta, la cual es costosa de eliminar por tratamientos físico-químicos. Suele aplicarse tras los anteriores. Consisten en la oxidación aerobia de la materia orgánica o su eliminación anaerobia en digestores cerrados. Ambos sistemas producen fangos en mayor o menor medida que, a su vez, deben ser tratados para su reducción, acondicionamiento y destino final.

Tratamiento terciario, de carácter físico-químico o biológico. Desde el punto de vista conceptual no aplica técnicas diferentes que los tratamientos primarios o secundarios, sino que utiliza técnicas de ambos tipos destinadas a pulir o afinar el vertido final, mejorando alguna de sus características. Si se emplea intensivamente pueden lograr hacer el agua de nuevo apta para el abastecimiento de necesidades agrícolas, industriales, e incluso para potabilización (reciclaje de efluentes).

Manejo de gases. Los gases liberados por unidades de depuración pueden ser tratados en biofiltros. Estas unidades constan de un lecho de soporte, generalmente de composta madura, sobre el cual se adhieren los microorganismos que degradan las sustancias y producen malos olores. Para facilitar la degradación de los compuestos olorosos se han de utilizar aspersión de agua permanente. El éxito del proceso depende de mantener unos niveles de humedad aceptable en el medio soporte, alrededor de 50 o 60%.

Los gases resultantes pueden ser empleados como combustible de energía para elevar las temperaturas de los digestores de lodos, teniendo como resultado la aceleración del proceso de estabilización de biosólidos. No obstante, en muchos de los casos las depuradoras queman el gas en estructuras llamadas 'quemadores', diseñadas para ese propósito.

Manejo de lodos. Esta parte del proceso tiene por objetivo tratar los subproductos sólidos (fangos) originados en la línea de agua depuradora. Estos lodos deben ser reducidos en volumen para facilitar su disposición, ser estabilizados para evitar fermentaciones y crecimiento de organismos patógenos.

Los biosólidos resultantes pueden ser utilizados, siempre que se encuentren libres de patógenos u otros elementos dañinos, como acondicionadores de suelo en campañas de reforestación.

Sitios de Vertido. Dependiendo de calidad, obtenida tras los procedimientos de tratamiento de aguas residuales, determinará las posibles opciones de reúso a las que se podrá destinar. Algunos ejemplos podrían ser su aplicación agrícola, riego de áreas verdes, recarga de acuíferos, etc.

Cabe destacar que la fase final de las aguas tratadas se ve complementado mediante procesos naturales. Pero antes de tomar una decisión sobre su disposición final se debe contemplar la normatividad de la CONAGUA, caso de México, o cualquier organismo regulador que impere en la región. Dos casos notables son los siguiente (SIAPA, 2014).

- *Vertido en corrientes superficiales.* Esta disposición no deberá llevarse a cabo en corrientes superficiales a menos que la descarga cuente con el tratamiento correspondiente y cumpla con los parámetros mínimos establecidos.
- *Vertido en Terrenos.* Esta situación hace referencia al uso de aguas residuales tratadas bajo las normas mexicanas (NOM-003-SEMARNAT-1997) para el riego de áreas verdes o con fines creativos.

1.2.6. Tipos de tratamiento centralizados de AR empleados en México.

Como ya se ha mencionado antes, el tratamiento de aguas residuales puede llevarse a cabo mediante operaciones físicas, químicas o biológicas, tratando siempre de alcanzar siempre el objetivo de eliminación de contaminantes de origen natural, industrial, doméstico, entre otros. Las aguas tratadas pueden ser utilizadas de distintas maneras así que el método a utilizar dependerá en

gran medida del uso ya que no es lo mismo utilizar procesos para potabilización con fines de consumo humano a que se utilice para la industria.

Método de lodos activados. La primera etapa de este tratamiento consiste en un proceso aerobio, dado que se permite que los microorganismos existentes en el ambiente descompongan y oxiden el material orgánico, teniendo como resultado una clarificación del agua al mismo tiempo que se logra asentar los residuos densos en el fondo. Posteriormente, en la segunda fase se oxigena el agua y se somete a otro proceso de filtrado con el objetivo de eliminar posibles contaminantes del líquido, el agua resultante a partir de este procedimiento suele aplicarse en sistemas de riego y otras actividades en las que no se especifique un alto nivel de descontaminación. Si se desea mejorar considerablemente la calidad del agua recuperada, este método permite la adición de una etapa adicional, en la cual el agua filtrada es redirigida hacia unas cámaras de adición química, en las que se hará uso de compuestos químicos para eliminar los restos de los contaminantes. (CONAGUA & SEMARNAT, 2016).

Método de lagunas estabilizadoras. Las lagunas estabilizadoras son, esencialmente, una excavación donde el agua residual es almacenada para su tratamiento a través de bacterias, algas y otros organismos. Cuando el agua es depositada en este elemento tienen lugar fenómenos de tipo físico, químico y biológico dando por resultado la estabilización natural (CONAGUA & SEMARNAT, 2016). Entre las ventajas asociadas con el uso de este método se pueden mencionar el bajo consumo de energía y costos de operación, así como un menor capital de inversión en el momento de la construcción. Para su funcionamiento se requieren equipos y accesorios simples de uso común además de ser fáciles de mantener y operar, dado que no requiere equipos de alta tecnología ni personal calificado. Además, se ha demostrado una remoción eficiente de bacterias patógenas, protozoarios y huevos de helmintos. Del mismo modo, permite la disposición del efluente por evaporación, infiltración en suelo o riego (CONAGUA, 2015).

1.2.7. Calidad de efluentes.

La calidad del agua proveniente de los sistemas de tratamiento de aguas residuales presenta cierto grado de calidad en su afluente, principalmente basados en el tipo de reúso se les dará a las aguas tratadas. Ejemplo de esto podría ser el caso de las lagunas estabilizadoras, pues al ser un proceso de origen biológico, el efluente obtenido directamente, es considerado de nivel secundario por lo que se entiende que se es aceptable para ciertos reúsos y resulta aceptable para la descarga en varios cuerpos de agua.

Tabla 8. Límites máximos permisibles de contaminantes (NOM-003-SEMARNAT-1997).

Tipo de Reúso	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	SST (mg/l)
Servicios al público con contacto directo	240	≥ 1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1,000	≤ 5	15	30	30

1.2 Sistema de saneamiento individual

Este tipo de sistemas saneamiento también son conocidas como descentralizadas, debido a que emplean técnicas con las cuales el agua residual es colectada, tratada y dispuesta o reusada en el punto de generación (Crites, 1992). En esta clasificación se encuentran los métodos que, a finales del siglo pasado, fueron remplazados por la popularidad de los sistemas centralizados. Métodos como los empleados en letrinas, pozos negros y fosas sépticas eran encontrados en el exterior de viviendas o instalaciones públicas.

Entre las ventajas que ofrece este tipo de sistema se encuentran los costos bajos de inversión y operación ya que se elimina un gran número de infraestructura dedicada a la recolección y drenaje. En contraste las bondades con el medio ambiente se ven disminuidos al reducirse las probabilidades de fallas aisladas (Wilderer, 2001).

1.3.1. Letrinas

La letrina es una instalación sanitaria que, de realizar la instalación adecuada, permite el confinamiento y tratamiento de excretas humanas, su correcta aplicación y su bajo costo de instalación puede ser una solución ideal para comunidades rurales marginadas. Considerando la cantidad de agua para su funcionamiento, las letrinas pueden clasificarse en dos grupos: aquellas que utilizan un sistema en seco, también referidas como letrinas de composteo; y las que emplean agua, en los cuales se mezcla agua con la excreta mediante mecanismos manuales de inundación. Es importante mencionar que los sistemas húmedos deberán contar con un método de tratamiento tal como una fosa anegada, un tanque séptico o un tanque Imhoff.

En la siguiente tabla se presenta los tipos de letrina más utilizados para la evacuación de excretas:

Tabla 9. Tipos de letrina y sus componentes

Tipo	Componentes	Descripción	Imagen
Tradicional Simple	<ul style="list-style-type: none">● Fosa● Losa● Caseta	En este tipo de letrina la fosa se encuentra en la parte inferior de la caseta, y la profundidad mínima debe ser de 2 m. La losa deberá estar firmemente apoyada y por encima del nivel de terreno.	Imagen 3.a
Fosa ventilada	<ul style="list-style-type: none">● Fosa● Tubo de ventilación● Caseta	Es la versión mejorada de la tradicional, cuenta con un tubo de ventilación para evitar la presencia de olores e insectos.	Imagen 3.b
Arrastre Hidráulico	<ul style="list-style-type: none">● Caseta● Registro de inspección● Tubo de ventilación● Fosa de absorción	Este tipo cuenta con una trampa de agua que impide el paso de insectos y malos olores al interior de la caseta, además de que la fosa ya no se encuentra debajo. La hermeticidad se logra gracias a un cierre hidráulico que utiliza muy poca cantidad de agua pero es realmente eficiente.	Imagen 3.c

(CONAGUA, 2015)

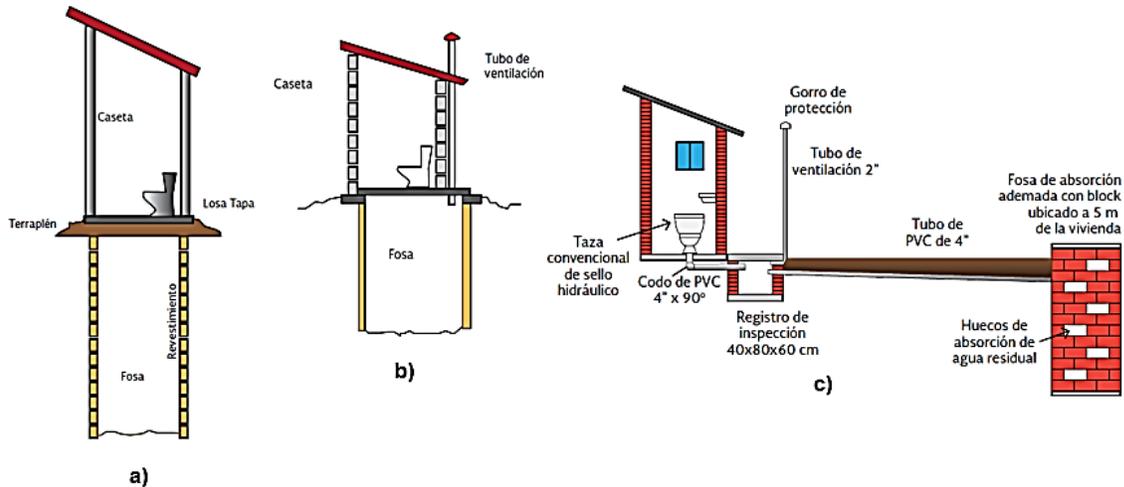


Imagen 3. Tipos de letrina y sus componentes.

(CONAGUA, 2015)

1.3.2. Fosas sépticas.

Este elemento resulta un dispositivo conveniente para el tratamiento primario de aguas residuales de origen doméstico, dado que es un sistema independiente de las condiciones geográficas del lugar y su tiempo de retención varía entre 1 a 3 días, dependiendo del grado de eliminación de materia orgánica (Mariano Galván, 2016). Los porcentajes de remoción de demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos que suelen conseguirse con los tanques sépticos de un compartimiento son de 30 y 60 por ciento; los efluentes presentan alto contenido de nutrientes, gérmenes entéricos y materia orgánica finamente dividida y maloliente. Pero de acuerdo con estudio realizado se obtuvo que una fosa séptica diseñada adecuadamente, tiene una eficiencia del 55% por sí misma y, si se complementa con un proceso secundario puede alcanzar hasta un 94% de eficiencia (Garzón Zúñiga, González Zurita, & García Barrios, 2016).

La función del tanque séptico es el de acondicionar las AR domésticas (negras y grises) de tal forma que se puedan infiltrar con mayor facilidad en el suelo, tratándose principalmente como el primer paso en el sistema de tratamiento local. Para cumplir con este propósito la fosa séptica deberá cumplir con un tiempo de retención de 1 a 3 días, sin embargo para asegurar su funcionamiento adecuado, deberá realizarse trabajos de mantenimiento y limpieza cada 2 años (Mariano Galván, 2016) (CAPA, 2010), además de asegurarse que se cumplan las tres funciones principales (CONAGUA, 2015):

- **Eliminación de sólidos.** Debido a que el tanque séptico reduce la velocidad de flujo de las aguas vertidas, los sólidos mayores se sedimentan mientras que los más ligeros se elevan dando como resultado un efluente clarificado.
- **Tratamiento biológico.** Dentro del tanque se producirá procesos anaerobios que darán paso a la descomposición de la materia orgánica en líquidos y gases.
- **Almacenamiento de natas y lodos.** Los lodos son el resultado de la sedimentación de las partículas sólidas del fondo mientras que las natas suelen aglomerarse en la superficie del fluido, ambos elementos reducen su volumen conforme los procesos biológicos se

desarrollen, razón por la se debe contar con un espacio de almacenamiento cuya finalidad sea evitar que el efluente arrastre estos residuos fuera del tanque.

Para un mejor desempeño la fosa séptica (Imagen 4) deberá construirse por lo menos con dos compartimientos, de tal forma que se asegure el aislamiento de la zona en dónde se desarrollan los procesos de sedimentación y la de los procesos anaeróbicos, así mismo deberá instalarse una trampa de grasas (Imagen 5) justo antes del sisma para asegura el ingreso únicamente de aguas negras y/o grises, además se debe contar con un proceso secundario (Imagen 6 e Imagen 7) que garantice el cumplimiento de los parámetros mínimos para la disposición final de las aguas tratadas en el sistema (Imagen 8).

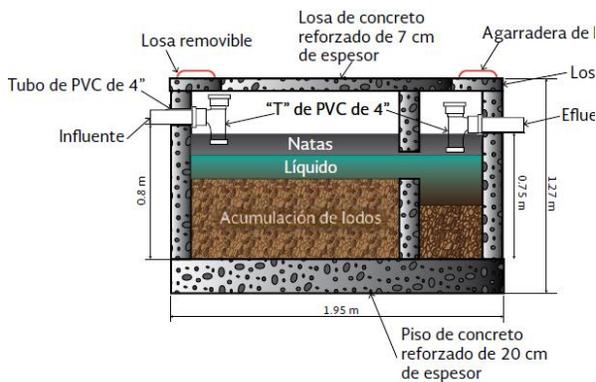


Imagen 4. Vista en corte de la estructura interna de una Fosa Séptica (FS). (CONAGUA, 2015)

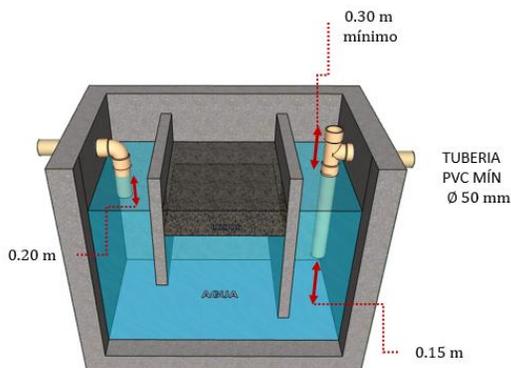


Imagen 5. Vista en corte de la Estructura interna de una trampa de grasa (TG). (CONAGUA, 2015)

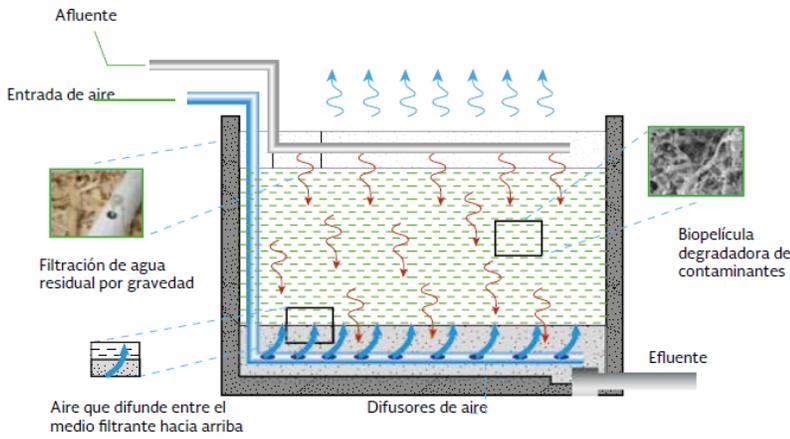


Imagen 6. Vista en corte de la estructura interna de un biofiltro (TS-1). (CONAGUA, 2015)

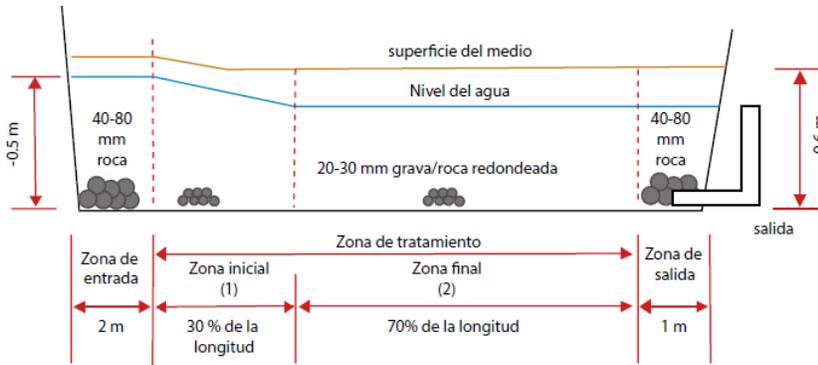


Imagen 7. Vista lateral de la estructura interna de un humedal (TS-2). (CONAGUA, 2015)

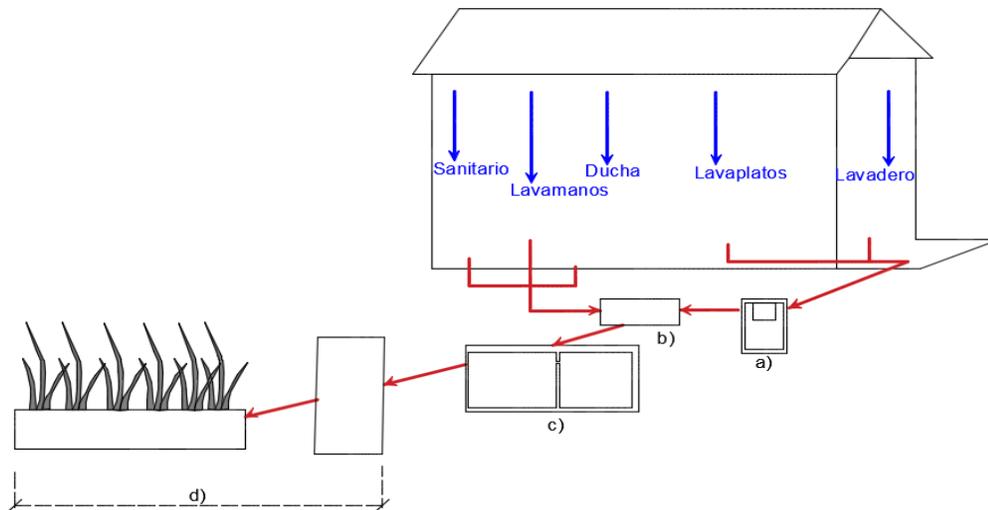


Imagen 8. Esquema del sistema de saneamiento TG-FS-TS. a) Trampa de grasa, b) Caja de inspección, c) Fosa séptica, d) Tratamiento secundario: Biofiltros + humedales. (Elaboración propia basada en Garzón Zúñiga et al, 2016)

Este tipo de sistemas de tratamiento descentralizado ha resultado ser objeto de diferentes estudios referentes a su aplicación y eficiencia, principalmente en zonas rurales de países en vías de desarrollo. Autores como González Zurita (2015) y Patiño Gómez (2012) han evaluado el desempeño del sistema TG-FS-TS para el tratamiento de aguas residuales en pequeños grupos de población para el centro de México y Colombia, respectivamente, han obtenido resultados favorables respecto al grado de eficiencia en cada caso. Por su parte, otros estudios enfocados en la viabilidad económica de los sistemas descentralizados, demuestran que su aplicación en medios cuya población es menor (comparada a los medios tradicionales) resulta factible para AR domésticas familiares, como ejemplos de estos estudios se puede citar autores como Mariano Galván (2016) y Maca Millán (2014), cuyos trabajos concluyeron que, para sus zonas de estudio (Hñähñú en Hidalgo y Buga, Colombia), este tipo de manejo de aguas residuales resulta más conveniente en términos de costos de construcción y costos de mantenimiento, sin embargo, ambos autores también coinciden en llevar análisis previos para facilitar la toma de decisiones referente a los tipos de tratamientos secundarios óptimos según cada caso en particular.

1.3.3. Pozo Negro o ciego.

Aun cuando la descripción inicial de un pozo negro, o también llamado pozo ciego, es muy similar al de una fosa séptica, existe una gran diferencia entre ambos elementos. Si bien ambos se caracterizan de ser una excavación en el terreno, el pozo negro se distingue de mantener su fondo como tierra del terreno natural, aun cuando las paredes estén construidas con ladrillo. La parte líquida de los residuos que terminan en este pozo se filtra en el terreno mientras que la parte sólida queda retenida hasta que se descompone (CONAGUA, 2015).

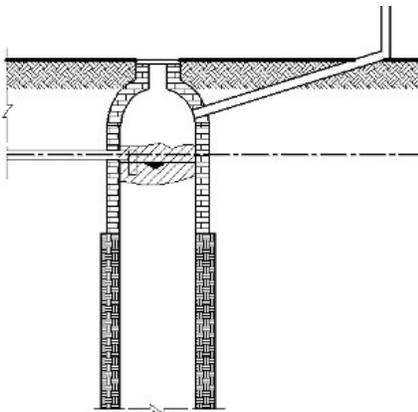


Imagen 9. Esquema de un Pozo Negro. (Prignano, 2007)

1.3.4. Biodigestores.

En su forma más simple, un biodigestor es un tanque cerrado herméticamente y de manera impermeable, comúnmente también se le conoce como reactor, dentro se deposita materia orgánica a tratar. Utiliza principalmente procesos anaerobios para la remoción de elementos orgánicos y, dependiendo de su buena operación, presenta una eficiencia de entre el 40 y 90% de demanda química de oxígeno (CONAGUA, 2015).

Está compuesto por dos elementos principales: el tanque hermético y el depósito de almacenamiento para biogás. Estos pueden estar integrado o bien, separados. El sistema en el que suele integrarse este tipo de digestor se conforma en una primera etapa por un tanque de almacenamiento, con el que se logra nivelar la presión del agua residual antes de llegar al reactor; la segunda etapa está conformada por el biodigestor y por el almacenaje de biogás; finalmente se encuentra el tratamiento secundario, encargado de mejorar la calidad del agua tratada antes de su disposición final.

Entre los biodigestores se pueden identificar tres tipos principales:

Biodigestores de flujo estacionario. Son también llamados de flujo discontinuo. El proceso inicia al agregar la totalidad de agua residual a tratar, del mismo modo, se retira en su totalidad el agua tratado al finalizar el tratamiento. Por lo general requiere mayor mano de obra, de un espacio para almacenar materia prima y de un depósito de biogás.

Biodigestor de flujo semicontinuo. La recarga de materia a tratar y la descarga del efluente se lleva a cabo por intervalos, por ejemplo, una vez al día. Y por lo general se extiende indefinidamente, este tipo requiere una menor mano de obra, sin embargo, es necesario que la mezcla sea más fluida o movilizada por medios mecánicos.

Biodigestor de flujo continuo. Este tipo presentan desplazamiento de flujo horizontal realizados por medios mecánicos o por gravedad y, en otros casos, de tanques múltiples verticales.

Para asegurar un óptimo desempeño para cualquier tipo de biodigestor es recomendable que cada 12 o 24 meses se realicen trabajos de estiaje, siendo el primero a los 6 meses tras su fecha de arranque, de igual forma se deberá limpiar el filtro cada dos años, además de tener cuidado de no verter bolsa, toallas o líquidos corrosivos al inodoro (ácido) (Mariano Galván, 2016).

1.3 Saneamiento de Aguas residuales en México

Hasta finales del año 2016, México contaba con alrededor de 3,517 instalaciones destinadas al tratamiento de AR, destacando principalmente aquellas plantas que utilizan métodos biológicos. Este método involucra procesos aerobios y anaerobios, de acuerdo con las características particulares de la planta siendo las más comunes las que realizan proceso de purificación a través de técnicas de lodos activados o por lagunas estabilizadoras, llegándose a inventariar 1 015 y 980 unidades, respectivamente, en el país (CONAGUA & SEMARNAT, 2016).

De acuerdo con información proporcionada en el Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación 2016, elaborado por la CONAGUA, del total de PTAR construidas en el país, únicamente se encuentran inactivas 28% de las instalaciones existentes. Mientras que poco más de la mitad del porcentaje restante se encuentran en subutilización (Contraloría social al programa de tratamiento de aguas residuales, primer Informe, 2017).

Entre las principales causas de la subutilización o inactividad de las PTAR se puede mencionar el sobrediseño de la capacidad, resultado de un desarrollo sin planeación que conlleva a decisiones apresuradas o de proyectos que no consideran la conexión de la población al drenaje, mismo que en muchos casos es inexistente. A este punto también se puede agregar un inadecuado

dimensionamiento, construcciones defectuosas (especialmente por hundimientos o desniveles del terreno); falta de recursos para la operación y manenimiento, debido a los altos costos de energía eléctrica, personal operador, bombas dosificadoras, etc (Morgan & Benítez, 2016).

Actualmente, la planeación de PTAR suele descartar las comunidades rurales con menos 2500 habitantes, bajo la premisa de infactibilidad economica para instalar plantas de tratamiento de tipo centralizado, por lo que el tema de saneamiento ha quedado atrás debido a que los organismos operadores dan prioridad a los servicios de agua potable e, ironicamente, a redes de alcantarillado que en consecuencia aumenta el volumen de AR (Zurita-Martínez, Castellanos-Hernández, & Rodríguez-Sahagún, 2011).

Por otra parte, la evolución de la cobertura de alcantarillado a nivel nacional, hasta 2009, habia sido reportado con un alcance de 86.4% de la población, cubriendo en 94% y 62 % las zonas urbanas y rurales, respectivamente. Sin embaro, al realizar un analisis regional y local, puede observarse la deficiencia en la planeación y prestación del servicio, dado que las zonas con alto indice de marginación no cuentan con el servicio, y en los que si existe presentan fugas constantes, falta de conexión o ausencia de tratamiento (Domínguez Serrano, 2010).

EL profesor investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana, Óscar Monroy recomienda que las plantas de tratamiento sanitario sean más pequeñas y versátiles, con el fin de aprovechar las nuevas tecnologías fáciles de mantener, por lo que sugiere tratamientos descentralizados con el fin de adaptarse a las demandas de cada grupo poblacional y, de esta forma, asegurar el acceso al saneamiento (2017). Los procesos alternativos de saneamiento proporcionan una alternativa altamente factible ya que los gastos de inversión, operación y mantenimiento son mucho menores que los procesos convencionales centralizados.

Como parte de la implementación de las nuevas tecnologías y métodos de saneamiento, la Comisión Nacional del Agua, desarrolló un manual en que se describen algunos sistemas de tratamiento primario y complementarios que podrían ser una alternativa viable en zonas con alta marginación social. En este manual se abordan tres metodologías para el diseño de centros de tratamiento alternativos de aguas residuales basados en tecnología Japonesa, la cual utiliza como criterio base el número de población a la que se le prestará servicio, en el país de origen estos métodos se han implementado en comunidades de entre 50 y 7 000 habitantes, por lo que en un estudio conjunto la CONAGUA y JICA ha adaptado los párametos de población para ser aplicados en México (CONAGUA, 2013)(**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 10. Rangos de aplicación en relación a la población y gasto efluente

Rango de Aplicación	Población (hab)	Capacidad (m ³ /día)
1	70 a 300	10 a 45
2	301 a 700	46 a 99
3	701 a 1400	100 a199
4	1401 a 5000	200 a 700
5	5001 a 10000	701 a 1400

(CONAGUA, 2013)

1.4.1. Saneamiento de aguas residuales en Quintana Roo.

En el estado mexicano de Quintana Roo, la tendencia de utilizar PTAR basadas principalmente en el método de lodos activados se mantiene como en el resto del país. Hasta finales de 2014, en el estado se encontraban inventariadas 35 plantas de tratamiento que se hallaban en funcionamiento, con una capacidad instalada conjunta de 2,380 lps. Del total de plantas, 25 basaban sus procesos de depuración en el método de Lodos activados y encontrándose, en su mayoría, en la zona norte del estado (CONAGUA & SEMARNAT, 2016).

De igual manera, el organismo operador vigente en el estado reporta que 57% de la población se encuentra conectado a líneas de alcantarillado y, que únicamente, se aprovecha el 73% de la capacidad instalada de las PTAR.

Aun cuando se reporta una amplia cobertura de líneas de drenaje, un estudio realizado en 2004 dio como resultado que el 84% de los usuarios entrevistados aseguran no estar conectados al sistema de alcantarillado debido a que no tienen interés de conectarse a la red, como consecuencia de la carga económica que representa (2,000 – 5,000 Pesos/casa) por lo que el 97.5% de quienes no se encuentran conectados a la red de alcantarillado sanitario utiliza fosas sépticas como único método para la disposición de aguas residuales, y el 2.5% restante utiliza letrinas con el mismo fin (JICA & SEMARNAT, 2004) (CAPA, 2009).

En el caso de las comunidades rurales, con drenaje sanitario inexistente, casi la totalidad hace uso de las “fosas sépticas”, mal llamadas dado que en la mayoría en los casos estas estructuras terminan siendo pozos ciegos unifamiliares o comunales, únicamente se puede hacer excepción de aquellos poblados donde programas gubernamentales o particulares construyen fosas sépticas bien estructuradas (CONAGUA, 2013).

1.4 Costos de Inversión, mantenimiento y operación, de acuerdo a la eficiencia.

Un punto importante para la toma de decisiones al momento de elegir un método de tratamiento de aguas residuales es el análisis de los costos de inversión operación y mantenimiento. Los costos de inversión hacen referencia a la cantidad monetaria que representa la construcción total de un módulo de saneamiento y dependiendo del tamaño del proyecto y de sus componentes es cuan alto será. Por otra parte, los costos de operación implican todo material, actividad o personal, que se requiera para mantener en funcionamiento la instalación. Finalmente, los costos de mantenimiento refieren al monto necesario para mantener de manera óptima los procesos de la instalación (Garzón Zúñiga, González Zurita, & García Barrios, 2016).

Los sistemas centralizados convencionales suelen conllevar a costos de inversión, operación y mantenimiento relativamente elevados, debido a que incluye un sistema de alcantarillado (en caso de no existir una red), estaciones de rebombeo y, finalmente, la planta de tratamiento.

1.5 Análisis económico de alternativas

Para asegurar una óptima elección del sistema a elegir es conveniente realizar un análisis económico de las alternativas. En los proyectos de ingeniería generalmente se analizan diferentes alternativas

de solución factibles. Si el proceso de selección de una de las alternativas excluye la selección de cualquiera de las otras, las alternativas se llaman mutuamente excluyentes y en ocasiones tienen vidas útiles diferentes. Por lo que es necesario realizar un análisis para determinar cuál de las alternativas mutuamente excluyentes se prefiere; para ello hay que considerar su inversión, costos de operación y mantenimiento y realizar el análisis para un período de tiempo y una tasa de descuento determinada. La comparación entre alternativas puede realizarse en valor presente o valor actual de los costos ó como un análisis anual. (Sullivan & Wicks, 2004)

2 Problemática

La localidad de Bacalar tiene una baja cobertura del servicio de alcantarillado sanitario, la planta de tratamiento existente tiene capacidad para tratar un gasto de 42 lps sin embargo únicamente llega un gasto de 2 lps de acuerdo con el proyecto de drenaje sanitario para Bacalar (*CONTRATO No. IR-CAPA-PEI-01-OP-17*) además que como el gasto de diseño de la planta no se ha alcanzado no se tiene un tratamiento. Parte de la población que está conectada al servicio y otra no; quienes no están conectados se ha identificado que están conectados a una fosa séptica y otros tienen pozo negro, es decir descargan directamente al subsuelo. Se ha identificado que durante la época de lluvias una zona de Bacalar en la cual existe el drenaje sanitario presenta, rebosamiento de los pozos de visita propiciando que las aguas residuales se canalicen directamente a la laguna lo cual representa un foco de infección y pone en riesgo la salud de la población que se baña en ese sitio. Por lo que en este trabajo se realiza el análisis económico para determinar la conveniencia de utilizar un sistema centralizado de saneamiento (Planta de Tratamiento) o construir sistemas individuales como fosa séptica, añadiéndole un sistema de pretratamiento y un tratamiento secundario.

2.1 Objetivo

Objetivo analizar la diferencia económica entre un sistema convencional de saneamiento y sistema individual bien diseñado (fosa séptica o biodigestor).

3 Metodología

3.1 Área de Estudio

El área de estudio para la valoración de daños de Bacalar por efecto de la variación de la superficie permeable abarca el casco urbano actual indicado en color gris y el área estimada en el documento borrador del Plan de Desarrollo Urbano de la localidad. Ver figura 1

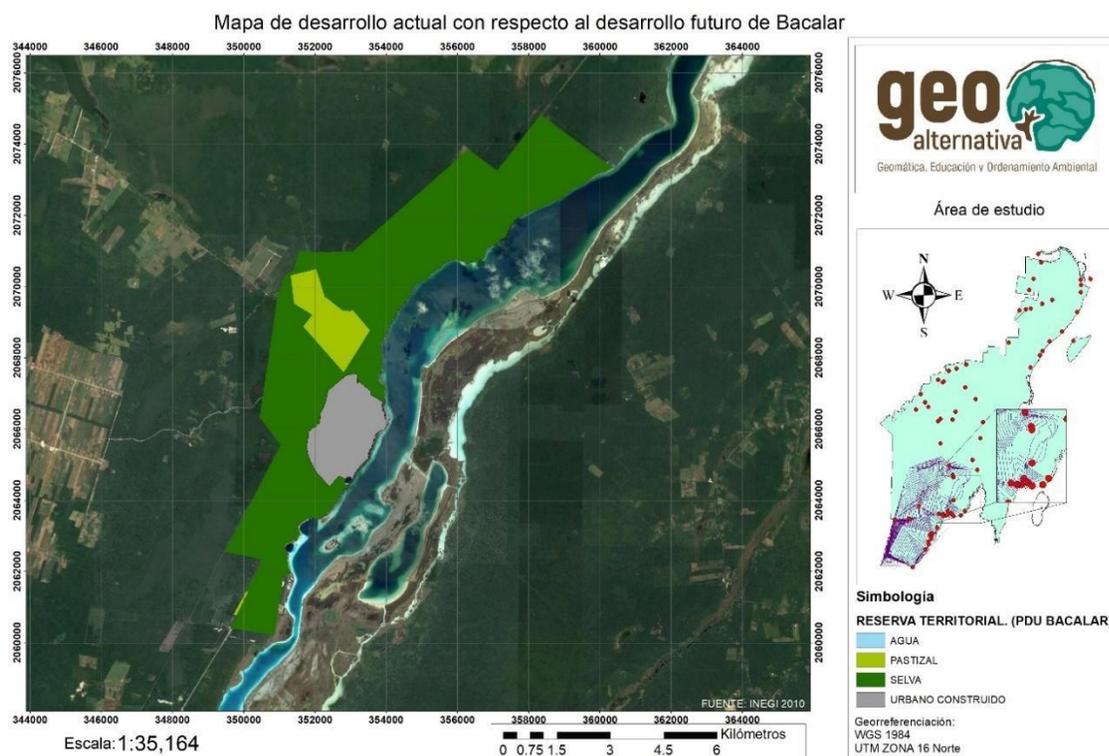


Imagen 4. Imagen satelital con polígono propuesto para el desarrollo del Centro Urbano de 4000 HAS, se observa el área actualmente urbanizada de 433.78 HAS. Elaboración propia con información de (Google; INEGI; DigitalGlobe, 2018-2019), (INEGI; Serie VI, 2010), (SEDETUS; H. Ayuntamiento de Bacalar, por publicar)
Fuente: Elaboración propia

3.2 Situación actual del saneamiento en Bacalar

Se identificó el número de viviendas que efectivamente están conectadas al drenaje sanitario con base en el proyecto de drenaje sanitario elaborado mediante *CONTRATO No. IR-CAPA-PEI-01-OP-17* en el que se indica que la PTAR actual diseñada para un gasto $Q=42$ lps solamente recibe un $Q=2$ lps y considerando una aportación de 187.50 lt/hab/día.

3.3 Situación futura del saneamiento en Bacalar

Para conocer el número de viviendas futuro se tomó como referencia el número de viviendas consideradas en la propuesta del Plan de Desarrollo Urbano para Bacalar, como se observa en la imagen 4

Concepto	Indicador	2020	2025	2030	2035	2040	2043
POBLACIÓN							
Densidad área urbana actual	Hab/ha	26.6	27.1	27.7	28.3	28.9	29.4
Densidad reservas	Hab/ha	100	100	100	100	100	100
Densidad promedio	Hab/ha	27	35	43	50	55	59
Población urbana actual	Hab	13,681	13,976	14,271	14,566	14,860	15,156
Población reservas	Hab	-	5,963	13,824	21,965	30,599	36,419
Total	Hab	13,681	19,959	28,095	36,531	45,459	51,574
SUELO URBANO							
Área urbana actual	ha	515	515	515	515	515	515
Reservas	ha	-	60	138	220	306	364
Total	ha	515	575	653	735	821	879
SUELO TURÍSTICO							
Cuartos área urbana actual	%	100%	60%	36%	27%	21%	20%
Cuartos reservas	%		40%	64%	73%	79%	80%
Total cuartos	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Densidad turística reservas	cuartos/ha	10	10	10	10	10	10
Cuartos área urbana actual	cuartos	536	626	715	804	894	963
Cuartos reservas	cuartos	-	415	1,266	2,208	3,264	4,051
Total cuartos	cuartos	536	1,040	1,961	3,012	4,158	5,035
Reservas alojamiento turístico	ha	-	41	127	221	326	405
Reservas alojamiento/total reservas	%	60%	60%	60%	60%	60%	60%
Total reservas turísticas	ha	-	69	211	368	544	675
VIVIENDA							
Densidad domiciliaria	hab/vivienda	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
Área urbana actual	vivienda	4,051	4,138	4,225	4,313	4,400	4,487
Reservas	vivienda	-	1,772	4,096	6,503	9,060	10,783
Total	vivienda	4,051	5,909	8,318	10,816	13,459	15,270
INFRAESTRUCTURA							
Agua potable							
Dotación urbana	l/hab/día	201	201	201	201	201	202
Dotación reservas turísticas	l/cuarto/día	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100
Gasto urbano	lps	32	46	65	85	106	121
Gasto reservas turísticas	lps	-	5	16	28	42	52
Total gasto	lps	32	52	81	113	147	172

Imagen 4. (SEDETUS; H. Ayuntamiento de Bacalar, por publicar)
Fuente: Elaboración propia

3.4 Fosas sépticas tratamiento secundario

Partiendo del análisis de (Garzón Zúñiga, González Zurita, & García Barrios, 2016) en el cual manifiestan que una séptica diseñada adecuadamente, tiene una eficiencia del 55% y si se complementa con un proceso secundario puede alcanzar hasta un 94% de eficiencia. Se realizó un análisis económico duplicando el costo de inversión para estimar las acciones requeridas para dar un tratamiento secundario de manera individual.

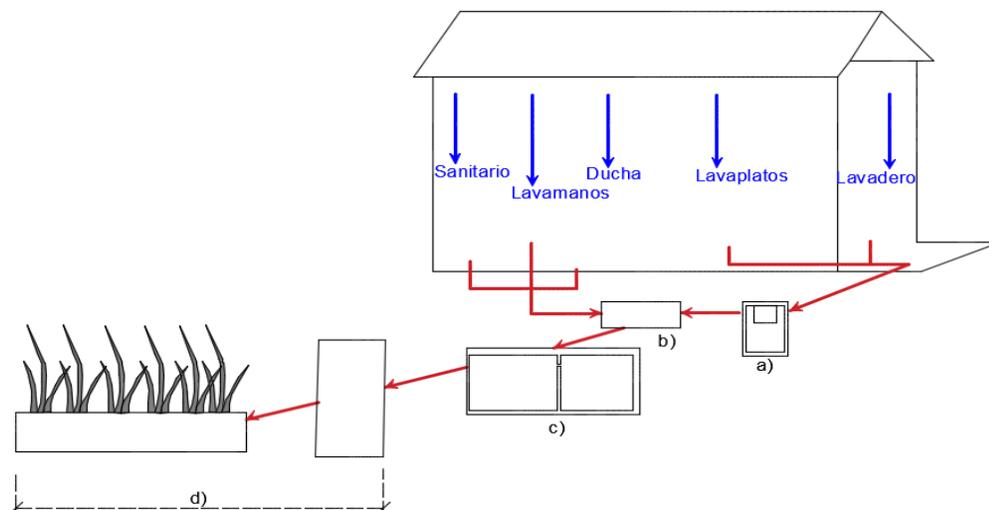


Imagen 10. Sistema de Individual de tratamiento de estudio.

(CONAGUA, 2015)

Para el análisis económico se consideró una inversión en su construcción (I_0) de \$ 30,000 pesos, costos de mantenimiento (COM) cada 5 años por \$2000

$$VAC = I_0 + \frac{COM_1}{(1+i)^1} + \frac{COM_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{COM_n}{(1+i)^n} \quad \text{Expresión 1}$$

Donde: VAC (Valor Actual de los Costos), I_0 la inversión inicial, COM los costos de operación y mantenimiento del año correspondiente, i la tasa de descuento y n el número de años del proyecto.

3.5 Alcantarillado sanitario más planta de tratamiento.

Para estimar el costo de alcantarillado sanitario más la planta de tratamiento se actualizaron los costos del proyecto de saneamiento realizado por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo (CAPA) para Bacalar con precio al año 2013 y se actualizaron conforme a la inflación promedio del 4% anual

Tabla 11 Inversión en Sistema de drenaje y PTAR

Obra	Importe 2019
Planta de tratamiento de aguas residuales	31,664,204
Cárcamo de AR San Miguel	4,089,582
Cárcamo de AR San Joaquín	6,247,155
Emisor a presión	2,729,536
Red de Drenaje Sanitario	169,568,851
Total	214,299,327

Fuente: Elaboración propia con información de evaluación socioeconómica para el proyecto de drenaje sanitario para Bacalar 2013 de la CAPA

El Valor Actual del Costo de esta alternativa se determinó con la expresión 1

Se estimó una planta de tratamiento modulada que se fuera construyendo conforme la demanda de aguas residuales lo requiera.

Adicional a los costos de operación y mantenimiento se incorporó el costo que produce que las viviendas por las que pasa el drenaje sanitario descarguen sus aguas pluviales al drenaje sanitario incrementando con ello los costos de operación en un 10% anual por tener un mayor tiempo de bombeo de acuerdo con (Mena, 2006)

4 Resultados

4.1 Situación actual del saneamiento

De acuerdo con el proyecto de drenaje sanitario y saneamiento para Bacalar se consideró que la aportación actual de aguas residuales a la PTAR equivale a tener conectadas 184 viviendas de las 3779 consideradas en el proyecto.

También se identificó que cuando no se tiene drenaje sanitario el 44% de la población construye fosas sépticas y el restante tiene pozos negros.

4.2 Análisis económico de fosas sépticas

En la tabla 6 se presenta la incorporación de las viviendas a lo largo de los 23 años de duración del PDU y considerando que en el primer año todas las viviendas que hoy día no tienen drenaje construyeran fosa séptica con tratamiento secundario.

Tabla 12 Esquema de incorporación de viviendas

Año	Viviendas	Drenaje en Viviendas		Sistemas alternativos	
		Con	Sin	Fosa	Fosas Nuevas
2020	4051	184	3,867	3867	3,867
2021	4369	184	4,185	4185	318
2022	4712	184	4,527	4527	343
2023	5081	184	4,897	4897	370
2024	5480	184	5,296	5296	399
2025	5910	184	5,726	5726	430
2026	6329	184	6,144	6144	419
2027	6777	184	6,592	6592	448
2028	7257	184	7,072	7072	480
2029	7771	184	7,586	7586	514
2030	8321	184	8,137	8137	550
2031	8769	184	8,585	8585	448
2032	9241	184	9,057	9057	472
2033	9739	184	9,555	9555	498
2034	10263	184	10,079	10079	524
2035	10816	184	10,632	10632	553

2036	11300	184	11,115	11115	484
2037	11805	184	11,620	11620	505
2038	12333	184	12,148	12148	528
2039	12884	184	12,700	12700	551
2040	13460	184	13,276	13276	576
2041	14038	184	13,854	13854	578
2042	14641	184	14,457	14457	603
2043	15270	184	15,086	15086	629

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7 se puede observar que si las viviendas futuras consideradas en el plan de desarrollo urbano instalan una fosa séptica con tratamiento primario inicialmente se tendrían que invertir 57 MDP lo cual representa un Valor Actual de Costos de 125.63 MDP

Tabla 13 Valor Actual de los Costos por fosas sépticas con tratamiento primario (MDP)

Año	Inversión	Mantenimiento	Mantto Acum	Costo Total	VAC
2020	57.39				\$125.63
2021	4.77			4.77	
2022	5.14			5.14	
2023	5.55			5.55	
2024	5.98			5.98	
2025	6.45	3.83		10.28	
2026	6.28	0.32		6.60	
2027	6.72	0.34		7.07	
2028	7.20	0.37		7.57	
2029	7.71	0.40		8.11	
2030	8.26	0.43	3.83	12.51	
2031	6.72	0.42	0.32	7.46	
2032	7.08	0.45	0.34	7.87	
2033	7.46	0.48	0.37	8.31	
2034	7.87	0.51	0.40	8.78	
2035	8.29	0.55	4.26	13.10	
2036	7.25	0.45	0.74	8.44	
2037	7.58	0.47	0.79	8.84	
2038	7.92	0.50	0.85	9.26	
2039	8.27	0.52	0.91	9.71	
2040	8.64	0.55	4.81	14.00	
2041	8.67	0.48	1.18	10.34	
2042	9.04	0.51	1.26	10.81	
2043	9.43	0.53	1.35	11.31	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 8 se presentan los costos considerando el tratamiento secundario en las fosas lo que representaría una inversión inicial de 116 MDP y con los costos de mantenimiento que derivan se tendría un Valor Actual de Costos de 258.58 MDP

Tabla 14 Valor Actual de los Costos por fosas sépticas con tratamiento primario (MDP)

Año	Inversión	Mantenimiento	Mantto Acum	Costo Total	VAC
2020	116.00				\$258.58
2021	9.54			9.54	
2022	10.28			10.28	
2023	11.09			11.09	
2024	11.96			11.96	
2025	12.90	7.73		20.63	
2026	12.56	0.64		13.19	
2027	13.45	0.69		14.13	
2028	14.40	0.74		15.14	
2029	15.42	0.80		16.22	
2030	16.51	8.59	7.73	32.84	
2031	13.44	0.84	0.64	14.92	
2032	14.17	0.90	0.69	15.75	
2033	14.93	0.96	0.74	16.63	
2034	15.73	1.03	0.80	17.56	
2035	16.58	1.10	16.33	34.01	
2036	14.51	0.90	1.47	16.88	
2037	15.16	0.94	1.58	17.68	
2038	15.83	1.00	1.70	18.53	
2039	16.54	1.05	1.83	19.42	
2040	17.28	1.11	17.43	35.81	
2041	17.34	0.97	2.37	20.68	
2042	18.09	1.01	2.53	21.63	
2043	18.87	1.06	2.69	22.62	

Fuente: Elaboración propia

4.3 Análisis económico de instalar drenaje sanitario y planta de tratamiento

En la tabla 9 se presenta la aportación de aguas residuales que se tendrá en Bacalar durante los 23 años del PDU y la capacidad de la PTAR requerida para atender dicha demanda

Tabla 15 Aportación de aguas residuales por viviendas y PTAR requerida

Año	Viviendas	Qmed Aportado (lps)	Capacidad PTAR (lps)
2020	4,051	24	42
2021	4,369	26	
2022	4,712	28	
2023	5,081	30	
2024	5,480	33	
2025	5,910	35	
2026	6,329	42	
2027	6,777	45	50
2028	7,257	48	
2029	7,771	51	
2030	8,321	55	
2031	8,769	65	
2032	9,241	68	
2033	9,739	72	
2034	10,263	76	
2035	10,816	80	50
2036	11,300	93	
2037	11,805	98	
2038	12,333	102	
2039	12,884	107	
2040	13,460	111	
2041	14,038	119	
2042	14,641	124	
2043	15,270	130	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 8 se presentan los costos para sanear las aguas residuales, se adicionaron los costos de bombeo incurridos durante época de lluvias, las inversiones requeridas en PTAR para garantizar el tratamiento y con ello se tendría un valor actual de los costos por 494.32 MDP

Tabla 16 Valor Actual de los Costos de un sistema tradicional de saneamiento (MDP)

Año	Inversión	Operación Recolección	Operación Tratamiento	Mantto.	Bombeo lluvia	Costos totales	Valor Actual de Costos
2020	214.30					214.30	494.32
2021		0.65	0.57	4.29	0.06	5.56	
2022		0.70	0.61	4.29	0.06	5.66	
2023		0.76	0.66	4.29	0.07	5.77	
2024		0.82	0.71	4.29	0.07	5.88	
2025	-	0.88	0.77	4.29	0.08	6.01	
2026		0.95	0.83	4.29	0.08	6.15	
2027	255.12	1.13	0.98	4.29	0.10	261.61	
2028		1.21	1.05	9.39	0.10	11.75	
2029		1.29	1.12	9.39	0.11	11.92	
2030		1.38	1.20	9.39	0.12	12.09	
2031		1.48	1.29	9.39	0.13	12.29	
2032		1.75	1.52	9.39	0.15	12.82	
2033		1.85	1.60	9.39	0.16	13.00	
2034		1.95	1.69	9.39	0.17	13.20	
2035	255.12	2.05	1.78	9.39	0.18	268.52	
2036		2.16	1.88	14.49	0.19	18.72	
2037		2.54	2.20	14.49	0.22	19.45	
2038		2.65	2.30	14.49	0.23	19.67	
2039		2.77	2.40	14.49	0.24	19.90	
2040	-	2.89	2.51	14.49	0.25	20.14	
2041		3.02	2.62	14.49	0.26	20.40	
2042		3.23	2.80	14.49	0.28	20.81	
2043		3.37	2.93	14.49	0.29	21.08	

Fuente: Elaboración propia

5 Conclusiones

El Valor Actual de los Costos de la alternativa de colocar fosas sépticas con tratamiento secundario presenta un menor costo a lo largo del tiempo por lo que podría representar una mejor alternativa que construir un sistema de saneamiento tradicional (sistema de drenaje por gravedad más planta de tratamiento).

La alternativa de tratar las aguas residuales de manera individual puede incrementarse en inversión hasta 52 mil pesos y disponer de un pretratamiento, fosa séptica y tratamiento secundario, es decir puede incrementarse hasta un 70% del costo inicial estimado de 30 mil pesos y todavía sería una mejor alternativa.

La conveniencia de poder implementar este tipo de soluciones resulta importante debido a que para que las viviendas se puedan conectar a un sistema de saneamiento tradicional tendría que estar el instalado al momento de construir las viviendas porque de otra manera aunque se construya el sistema de drenaje son varias las razones que tiene la población para no conectarse dentro de ellas esta que su sistema de drenaje no alcanza técnicamente a descargar en el sistema público de drenaje y no se conecta por lo cual continúa utilizando su sistema actual.

Será conveniente que el gobierno municipal implemente estrategias para asegurarse que las viviendas que no están conectadas al sistema municipal se conecten y/o que las viviendas con fosa séptica tengan un tratamiento secundario.

6 Bibliografía

- Ca. (01 de 03 de 2019). *Ciclo integral del Agua/Saneamiento*. Obtenido de Canal de Isabel II.
- CAPA. (2009). *Evaluación socioeconómica del "Plan maestro de drenaje sanitario y saneamiento" de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo*. Chetumal: Comisión de Agua Potable y Alcantarillado.
- CAPA. (2010). *Evaluación social del proyecto "Introducción del servicio de drenaje sanitario y saneamiento en el desarrollo Playa Mujeres", municipio de Isla Mujeres, Quintana Roo*. Playa Mujeres: Comisión de Agua Potable y Alcantarillado.
- CONAGUA. (2013). *Manual de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizados en Japón*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2015). Alcantarillado Sanitario. En Comisión Nacional del Agua, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*.
- CONAGUA. (2015). Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas de estabilización. En Comisión Nacional del Agua, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México.
- CONAGUA. (2015). Diseño de Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: saneamiento básico. En Comisión Nacional del agua, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2015). Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales. En Comisión Nacional del Agua, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2015). Sistemas alternativos de alcantarillado sanitario. En Comisión Nacional del Agua, *Manual de agua potable, alcantarilla y saneamiento*. Ciudad de México .
- CONAGUA, & SEMARNAT. (2014). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*.
- CONAGUA, & SEMARNAT. (2016). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*.

- Contraloría social. (2017). *Contraloría social al programa de tratamiento de aguas residuales, primer Informe*. México: Contraloría Social.
- Crites, R. W. (1992). Chap 13. En *Natural systems, in design of municipal wastewater treatment plants* (Vol. II, págs. 831-867). Alexandria: Water Environment Federation.
- Domínguez Serrano, J. (enero de 2010). El acceso al agua y saneamiento: Un problema de capacidad institucional local. Análisis en el estado de Veracruz. *Gestión y política pública*, 19(2), 311-350.
- Garzón Zúñiga, M. A., González Zurita, J., & García Barrios, R. (Mayo de 2016). Evaluación de un sistema de tratamiento doméstico para reúso de agua residual. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(2). Obtenido de <http://dx.doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.06>
- Google; INEGI; DigitalGlobe. (2018-2019). Imagen Satelital. Recuperado el 9 de Febrero de 2019
- INEGI; Serie VI. (2010). Serie VI - Uso de Suelo y Vegetación. (I. N. Geografía, Ed.) Ciudad de México, México.
- JICA, & SEMARNAT. (2004). *Estudio de manejo de saneamiento ambiental en la costa del estado de Quintana Roo, en los Estados Unidos Mexicanos*. Agencia de cooperación Internacional del Japón & Secretaría de medio ambiente y recursos Naturales.
- Lozano-Rivas, W. (2012). Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales. *Programa de Ingeniería Ambiental. Bogotá D.C., Colombia*. Universidad Antonio Nariño.
- Mariano Galván, A. (2016). *UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA DISEÑO CONCEPTUAL Y DE DETALLE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL BASADA EN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA UNA COMUNIDAD HÑÄHÑÚ EN HIDALGO, MÉXICO*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mena, R. (Noviembre de 2006). Evaluación Socioeconómica del Proyecto de Prevención de Inundaciones para la Ciudad de Cozumel. *Tesis de Maestría*. Zaapopan, Jalisco, México: Universidad Autónoma de Guadalajara.
- Morgan, J. M., & Benítez, V. (2016). *Análisis del estado de las plantas de tratamiento de aguas residuales en la República Mexicana*. México: Instituto de Ingeniería UNAM.
- NOM-003-SEMARNAT-1997 (Secretaría de medio ambiente y recursos naturales).
- Prignano, Á. O. (2007). *El inodoro y sus conexiones*. Buenos Aires: Biblos.
- Sánchez, J. (01 de marzo de 2019). *Ciclo Integral del Agua: Saneamiento*. Obtenido de Canal de Isabel II: <http://www.canalciclointegraldelagua.es/saneamiento.html>
- SEDETUS; H. Ayuntamiento de Bacalar. (por publicar). *Programa de Desarrollo Urbano del Centro Urbano de Bacalar*. Secretaría de Desarrollo Territorial Urbano Sustentable.
- Shelef, G., & Kanarek, A. (1995). Stabilization ponds with recirculation. *Water science and Technology*, 3(12), 389-397.

- SIAPA. (2014). Alcantarillado Sanitario. En S. I. alcantarillado, *Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades* (págs. 2-17). Guadalajara.
- Sullivan, W., & Wicks, E. (2004). *Ingeniería Económica De Degarmo*. México: Prentice Hall.
- Wilderer. (2001). Decentralized versus centralized wastewater management. En *Decentralized sanitation and reuse*. London: IWA.
- Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O. A., & Rodríguez-Sahagún, A. (31 de Agosto de 2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 139-150.

Valoración de daños por inundación al variar el área permeable de la zona urbana de Bacalar

Marco teórico

Ciudad y área urbana, definición, componentes y relación

El concepto de ‘ciudad’ es definido por la Real Academia española (2014) como: “Conjunto de edificios y calles, regidos por un ayuntamiento, cuya población densa y numerosa se dedica por lo común a actividades no agrícolas”.

No obstante, de manera más extensa ‘ciudad’ se define como el asentamiento de una población cuyos matices de atribución política, administrativa, económica y religiosas son notables, a diferencia de los asentamientos rurales que carecen de ellas parcial o totalmente, así mismo la configuración urbanística y la presencia de edificios específicos son claros indicadores (Romanillo, Yanguas, & Santos, 2004).

De manera general el término ‘ciudad’ suele aplicarse para distinguir una entidad político-administrativa urbanizada. Sin embargo, también puede utilizarse para describir una urbanización contigua, conformada por diversos espacios urbanos o ‘áreas urbanas’. Este último concepto es definido por la geografía como el paisaje propio de las ciudades el cual se ve delimitado mediante criterios numéricos (número de habitantes) o por medio de criterios funcionales, principalmente por la presencia de la industria o prestación de servicios (Benejam, 1996).

Por tanto, la diferencia entre área urbana y ciudad se observa a partir de sus características, de modo que el primero se identifica principalmente por su alta densidad de población, su extensión y su dotación de infraestructura orientada a la industria o a la prestación de servicios, siendo insignificante la presencia del sector primario. Mientras que una ciudad puede estar conformada por un solo espacio urbano, si este es único en las cercanías, o por varios si son áreas aledañas que comparte las características antes descritas. Además, un área urbana es emisor de servicios (burocrático, educativo, sanitario, cultural, de ocio, etc.) sobre su zona de influencia; mientras que es receptor de población y productos de origen primario y suele existir un precio alto por el suelo, resultado de la alta demanda de viviendas, comercios o cualquier otro tipo de actividades económicas.

Uso de suelo y su clasificación

Mientras más desarrollada se encuentre una ciudad, más imperativo es la existencia de un plan de desarrollo urbano, de ahí que la planificación urbana se constituya como una herramienta a través de la cual el ente administrativo (el Estado, municipio o urbano) puede asegurar el continuo desarrollo de la ciudad y el de sus habitantes, es por esto que la clasificación del *'uso de suelo'* se convierte la clave para lograrlo. Para ser específicos el uso de suelo se define como “los fines particulares a que podrán dedicarse determinadas zonas de un centro de población” (PAOT, 2003). Sin embargo, esta es la esencia del concepto de modo que cada institución reguladora puede especificar su propia definición, así como la posible clasificación de los mismos para la zonificación de áreas urbanas o rurales. En el estado de Quintana Roo, referencias judiciales como la ley de acciones urbanísticas del estado de Quintana Roo (2018) o planes de desarrollo urbano municipales (SEDATU , 2012) coinciden en que el uso de suelo puede ser clasificado en cinco grupos, que a su vez pueden presentar más ramificaciones (IMPLAN, 2014).

Uso Habitacional, contempla las zonas destinadas preferentemente para la construcción de vivienda, que incluye hogares unifamiliares y de acogida, así como edificaciones y locales destinados al hospedaje.

Comercio y Servicios generales, incluye todas construcciones destinadas a la prestación de servicios, actividades económicas anexas de la zona.

Áreas de donación, considera a los parques, plazas y áreas libres destinadas a área verde, que son de uso público

Vialidades, referente a las a las redes o trazados destinados a la infraestructura de transporte.

Delimitar notablemente la clasificación entre los diferentes usos de suelo permite obtener un panorama claro del comportamiento de desarrollo, de tal forma que permite a los diferentes organismos plantear acciones en pro de la urbanización, mismas que se verán reflejadas de manera directa en la optimización de servicios propios de una ciudad (PAOT, 2003).

En la que se aprecia en escala de color la configuración de usos de suelo de una ciudad, en ella se observan zonas habitacionales (rojo y naranja, según la densidad poblacional predominante), zona comercial y de servicios (tonos en verde) así como las principales vialidades. Gracias a la zonificación se puede concluir a simple vista que el uso de suelo predominante es el habitacional, seguido por el comercial y de servicios generales.

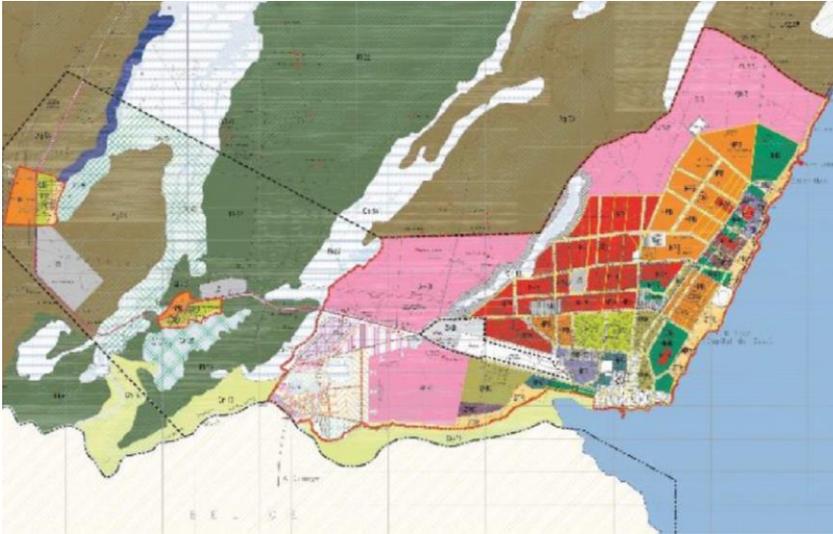


Ilustración 0-1 Ejemplo de zonificación por uso de suelo ciudad de Chetumal.

Fuente: Programa de Desarrollo Urbano del Área Metropolitana de Chetumal-Calderitas-Xul-Há, 2005.

Inundaciones, un problema en las ciudades

Definición de Inundación.

A la ocupación parcial del agua en zonas que habitualmente se encuentran libres de esta se le conoce como *'inundación'* (Águeda García de Durango, 2019). A causa de que estas catástrofes pueden ser originadas por diferentes factores, dependiendo en gran medida de la ubicación geográfica de los asentamientos poblacionales afectados, se encuentra pluralidad al momento de definir lo que es una inundación. Por ejemplo, la organización meteorológica mundial define como inundación al "aumento del agua por arriba del nivel normal de su cauce" (WMO, 2012), no obstante el Centro nacional de prevención de desastres (CENAPRED) se describe a la inundación se traduce como un evento que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o bien, por falla de alguna estructura hidráulica deriva en un incremento del nivel de la superficie libre de ríos o mares, como consecuencia el agua ingresa hacia sitios en donde usualmente no la hay, generando daños en el asentamiento poblacional así como a la industria primaria (agricultura, ganadería, etc.) y a la infraestructura existente (Cruz, 2009).

Tipos de Inundación.

En territorio mexicano, específicamente en la región sur, las inundaciones se producen principalmente por episodios de lluvias intensas prolongadas; dada la naturaleza del ciclo hidrológico y los procesos de precipitación sobre grandes extensiones de tierra, donde parte se infiltra mientras que otra ración se acumula y escurre sobre la superficie, hasta formar causas agua que conducen los excesos hacia curso principales o zonas bajas, tal como sucede durante tormentas tropicales. Si bien el origen puede deberse a crecidas de ríos o lluvias severas, existen diversos factores por los que se puede definir el origen y clasificación de las inundaciones (RALCEA, 2015).

1.1.1.1. Clasificación según sus características.

Basado en las características de origen de las inundaciones y en las posibles medidas de contención, se pueden distinguir los siguientes tipos de inundación:

Inundaciones fluviales, hace referencia a la afectación de zonas ribereñas por las crecidas de agua importantes durante el desborde de los cauces principales.

Inundaciones pluviales, en este caso se alude a los terrenos que son temporalmente cubierto por las aguas resultantes de lluvias importante, como consecuencia de una baja capacidad de infiltración, presencia de zonas bajas y/o deficiencia de la red de avenamiento.

Inundaciones costeras, tienen presencia cuando el nivel medio del mar asciende por encima de la media y permite su incidencia tierra adentro en las zonas costeras. Los vientos ciclónicos sobre la superficie del mar son generalmente los causantes de esta marea de tormenta.

Inundación por anegamiento debido al afloramiento de agua subterránea, en este caso se refiere a los terrenos anegados donde la capa freática se encuentra en ascenso, como resultado de lluvias prolongadas y localizadas en zonas topográficamente bajas.

Inundación por rotura y operación incorrecta de infraestructura hidráulica, esta situación se presenta debido a fallas de la infraestructura hidráulica, originándose principalmente por una mala operación, falta de mantenimiento, diseño superado o término de vida útil.

Por otro lado, se pueden considerar dos grandes tipos de inundaciones, basadas en el tipo de ocupación del espacio, la densidad de población afectada y el nivel de riesgo que se asume:

Inundaciones urbanas, o también llamadas **encharcamientos**, tienen lugar en sectores urbanos, con periodicidad anual y una duración intermedia. El fenómeno tiene su origen por la saturación del suelo, caracterizado por la presencia de láminas delgadas de agua sobre la superficie del suelo en pequeñas extensiones que por lo general se encuentran en zonas moderadamente onduladas o planas. Este caso la afectación se nota fundamentalmente sobre la población, sus viviendas y toda infraestructura de servicios disponibles. Para lograr medidas de protección y control es preciso considerar la trama urbana y las obras de conducción subterráneas.

Inundaciones rurales, este tipo afecta principalmente la producción primaria. Debido a la baja densidad poblacional permite una mejor ubicación de medidas de control y obras de conducción.

Así mismo, si se considera la previsibilidad puede también encontrarse dos tipos:

Inundación por crecidas repentinas, suelen ser provocadas por lluvias intensas en cuencas locales, generalmente se presentan en áreas cuyo relieve fue movido y el tiempo de prevención se mide en horas y minutos.

Inundación por crecidas lentas, son las provocadas por aporte de cursos de agua lejos de la zona de impacto, o por acumulación de lluvia en zonas de llanura. El tiempo de previsión se mide en días.

Relación entre áreas grises, áreas verdes e inundaciones urbanas.

Antes de marcar la relación entre los actores de una inundación es preciso entender los conceptos involucrados, en apartados anteriores ya se ha descrito los que es una inundación urbana y sus posibles causas, de modo que ahora se procederá explicar los términos restantes.

De acuerdo con la guía de medidas naturales de retención de agua (NWRM Guide, por sus siglas en inglés) una 'infraestructura gris' o 'área gris' es descrita como:

“el recurso no permeable, construido por el hombre que tiene como consecuencia el ciclo hídrico natural de la zona. Las áreas grises son denominadas así porque están construidas principalmente de concreto, estas infraestructuras pueden van desde los alcantarillados y desagües pluviales hasta las obras viales y espacios públicos no arbolados” (2019).

Así mismo, la NWRM Guide describe a la 'infraestructura verde' o 'área verde' como: *“El área natural o seminatural urbana que permite mejorar el rendimiento como alternativa sustentable para el beneficio social, abarcando finalidades ultimas como la recreación y/o escurrimiento de causas temporales”*

Teniendo en cuenta el concepto de áreas grises, hay que agregar que muchas veces la población y administración urbana no comprende adecuadamente que obras viales como calles, avenidas, banquetas y plazas públicas forman parte del sistema urbano de desagüe pluvial, llegando, incluso, a considerarse el sistema mayor, complementado por el sistema menor (alcantarillado pluvial). Por esta razón *“las obras viales deben conservar un diseño hidráulico de sección transversal y de pendiente longitudinal que permita el escurrimiento eficiente de los excedentes” (RALCEA, 2015).*

Al mantener áreas verdes llanas libres de usos que impliquen pavimentación y edificación se contribuirá a que la mayor parte del agua sea interceptada e infiltrada, por consiguiente, el escurrimiento de aguas pluviales se reduce y los desbordes se amortiguan teniendo como resultado un menor impacto (Zimmermann & Bracalenti, 2014), ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

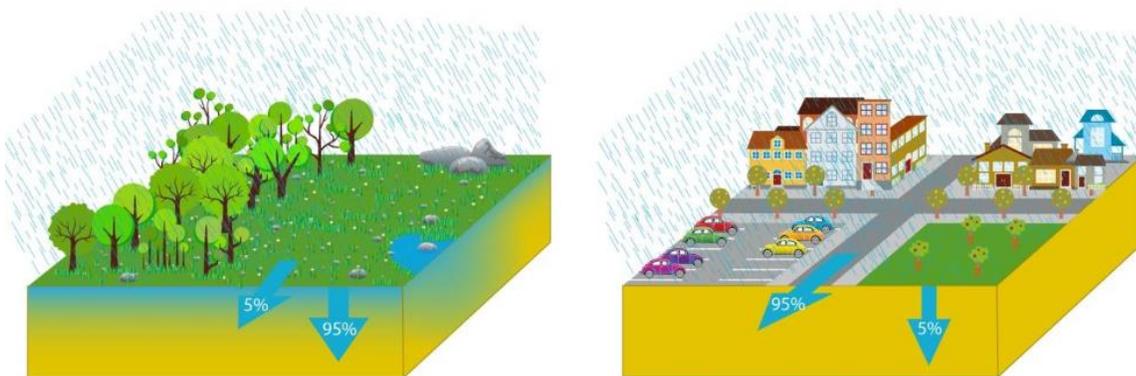


Ilustración 0-2 Ciclo hidrológico en áreas naturales y en áreas urbanizadas
Fuente: (Zimmermann & Bracalenti, 2014)

Al aumentar la proporción de la infraestructura verde, frente a las áreas grises, en la planeación y diseño de ciudades, se garantiza mayor superficie permeable para reducir y retardar el volumen de agua a derivar a la red de desagüe.

1.1.1.2. Clasificación según el riesgo

En un trabajo sobre conceptos de riesgo y vulnerabilidad, Cardona reconoce que “no existe en realidad una concepción que pueda unificar las diferentes aproximaciones o que recoja de manera consistente y coherente los diferentes enfoques” (2004).

En cuanto al riesgo de afectación por inundación se puede referir a la posibilidad de una zona a sufrir afectaciones y daños físicos, económicos, ambientales y sociales, por lo que el concepto abarca todas las dimensiones posibles.

Por definición ‘riesgo’ se describe como una probabilidad latente de que un hecho ocurra teniendo como consecuencia ciertos efectos. Ahora bien, ‘amenaza’ alude a la ocurrencia inminente de un hecho con una duración e intensidad palpable, por otra parte, la ‘vulnerabilidad’ se puede definir como la debilidad o grado de exposición ante un hecho inminente (Mora Chamorro, 2013). Para simplificar la conceptualización de los riesgos así como la dinámica entre ‘amenaza’ y ‘vulnerabilidad’ se presenta la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

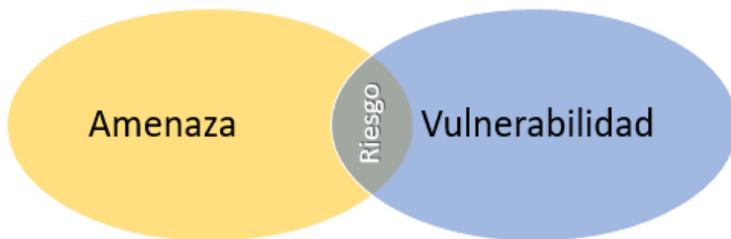


Ilustración 0-3 Relación entre vulnerabilidad y amenaza

Fuente: Elaboración propia

En el esquema anterior se ilustra la relación de los componentes involucrados y como el riesgo de inundación puede aumentar o disminuir en función del comportamiento individual o grupal de los factores ‘amenaza’ y ‘vulnerabilidad’. Dado este criterio, se pueden distinguir dos tipos de inundación según su riesgo:

Riesgo de colapso de obras, en esta situación destaca la posibilidad de que las obras de control y protección contra inundaciones falle, por lo que define el grado de seguridad de las obras de acuerdo con los riesgos hidrológicos de la amenaza, el diseño de obras y la seguridad dimensional de la mismas, así como las medidas de protección adicionales.

Riesgo de daño por inundación, por su parte, este tipo alude a la probabilidad de que una zona protegida o no sufra afectaciones de distintos tipos (infraestructura, actividades productivas, vivienda, población, etc.).

Daños por inundación.

Una inundación, económicamente, se considera un desastre natural en la que se presentan daños tangibles e intangibles. Los primeros se pueden dividir en dos: los daños directos, producidos por contacto con el agua o por sumersión, y los daños indirectos, que son los causados por la interrupción de las interrelaciones físicas y económicas, e incluyen, por ejemplo, la interrupción del transporte carretero, de los servicios públicos, pérdidas en salarios y beneficios en los negocios y se les puede asignar un valor monetario; mientras que los daños intangibles, que resultan de difícil medición (James & Lee, 1971)

De acuerdo con lo expresado en el documento temático 5 del IV foro mundial del Agua (2006):

“El daño debido a inundaciones se puede describir como resultado de una cadena de interacciones (...) resultantes de una precipitación excesiva y/o conducción con sedimentación, obstrucciones o vías fluviales inadecuadas para la conducción, afectando la infraestructura económica y la cotidianidad de la población.”

Por otro lado, desde el punto de vista económico los daños por inundación se ven cuantificados por las pérdidas materiales, que es dado por valor monetario que involucran los daños físicos directos e indirectos (CONAGUA, 2015).

Para comprender el amplio alcance de los ‘daños’ que puede generar un desastre natural, como es el caso de las inundaciones, hay que señalar la existencia de los diferentes tipos de daños potenciales causados, según el sector afectado (Badilla Sánchez, 1990):

Peligro para el hombre. Este daño potencial puede derivar en pérdidas de vidas durante el evento, así como propagación de enfermedades infecciosas, daños físicos tales como fracturas o mutilaciones, además de daños psicológicos.

Desorganización de servicios. Hace referencia a la paralización de servicios, la destrucción de obras públicas y modifica el desempeño de actividades normales a nivel local, regional o nacional.

Pérdidas económicas. Los daños y pérdidas inciden, en mayor o menor medida, en las actividades económicas, así como en los bienes muebles e inmuebles.

1.1.1.3. Daños por Inundaciones en zonas Urbanas.

Los daños por inundaciones alcanzan un tercio de las pérdidas económicas incurridas como consecuencia de los peligros naturales en Europa y son, junto con las tormentas de viento, el desastre natural más frecuente, y en las últimas décadas, se ha presentado un aumento importante en los daños por inundaciones, atribuido principalmente al aumento de los desarrollos en áreas propensas a inundaciones (Munich, 2005).

Gracias al proceso de urbanización el ciclo hidrológico ha sufrido cambios, como resultado los escurrimientos por el incremento la pavimentación, así como por la creación de áreas impermeables, se han modificado de tal forma que presentan caudales pico más altos y tiempos de ascenso más cortos.

Por otro lado, la existencia de conductos hidráulicos, más eficientes que los cauces naturales de escurrimiento, mejoran las velocidades del flujo de agua provocando que los caudales máximos superen en creces a los originales (Bertoni, 2004).

Al acelerarse la urbanización se ve comprometida la capacidad de descarga para volúmenes precipitados razón por la que las ciudades presentan inundaciones o encharcamientos con mayor frecuencia.

No es de ignorarse que los desastres naturales tienen consecuencias negativas en una población que va más allá del corto plazo, en particular, porque producen cambios irreversibles en las condiciones económicas, sociales y ambientales. A nivel socioeconómico, los efectos de una inundación se reflejan en una disminución importante de la disponibilidad de vivienda, así como de instalaciones de salud y enseñanza, en consecuencia, los déficits pueden aumentar respecto a los anteriores al desastre, mismos que se reflejan principalmente en la reducción temporal de los ingresos en los estratos sociales menos favorecidos, además de la interrupción momentánea de servicios vitales (agua, saneamiento, electricidad, transporte, etc.), escasez de alimentos, contaminación de fuentes de abastecimiento hídrico para el consumo y, generalmente, el desplazamiento involuntario de poblaciones culturalmente arraigadas en el territorio (Bitrán, 1992).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015) ha identificado que los principales daños en una inundación son:

a) Daño en propiedades y actividades productivas

Este costo se presenta en viviendas, comercios e industrias, y organismos públicos. El costo en viviendas corresponde a pérdidas o deterioros que sufren las personas que viven en el área afectada, tanto en edificios como en mobiliario y utensilios en su interior.

En comercios e industrias corresponden a pérdida o deterioro de equipos, instalaciones, insumos y productos terminados o en proceso; o una menor venta o producción. Esto último no siempre representa un costo social en su totalidad, ya que las menores ventas de un comercio pueden traducirse en mayores ventas en otro comercio o bien, o en una postergación del consumo.

b) Los costos en organismos públicos

Se refieren a daños materiales en edificios y equipamientos de instituciones públicas en el área afectada.

c) Terrenos inundables

Los terrenos inundables tienen restricciones en términos del fin que se les da, y suelen destinarse a áreas verdes o de equipamiento urbano. Por lo que el valor económico es bajo

d) Deterioro de vialidades

La carpeta de rodamiento de calles y avenidas puede presentar daños durante las inundaciones, al filtrarse el agua por grietas en el pavimento; esto implica costos por conservación o reposición de la carpeta dañada.

e) Costos Generalizados de Viaje (CGV)

La inundación produce un impacto negativo sobre el tránsito vehicular. Los usuarios de vías anegadas circulan a menor velocidad o modifican su ruta de viaje, incrementando el tráfico y reduciendo la velocidad en vías no inundadas. Esto representa mayores CGV, al incrementar el tiempo de viaje y el costo de operación de los vehículos.

f) Ausentismo laboral y escolar

La población puede tener problemas para desplazarse a sus lugares de trabajo y estudio, afectando las actividades desempeñadas, traduciéndose en el primer caso en una pérdida de producción.

g) Gastos de emergencia y limpieza

Las autoridades prestan ayuda a los afectados por las inundaciones, mediante la entrega de diversos artículos y la operación de albergues, realizando trabajos de emergencia para aliviar la situación, limpiando la basura y sedimentos arrastrados por las lluvias.

h) Costo por enfermedad

A las inundaciones se asocia un incremento en diversas enfermedades de las personas cuyas viviendas fueron afectadas, lo que produce mayores costos en consultas y tratamientos, tanto a las personas como a los servicios médicos a los que éstas acuden, además de las molestias y sufrimiento de las familias afectadas.

i) Costo por molestias a las personas

Quienes viven en áreas afectadas por las inundaciones sufren molestias al modificar temporalmente sus actividades, por mojarse zapatos y ropa al cruzar las calles, por desalojar sus viviendas, entre otras.

j) Afectación de la recolección y tratamiento de aguas residuales

En los servicios, un caso especial es el que se refiere a la recolección y tratamiento de las aguas residuales generadas en la localidad. Como se mencionó en el apartado de salud, la red de alcantarillado sanitario se satura con agua de lluvia y, a pesar de que las bombas trabajan lo doble de lo normal, es común el rebosamiento de las aguas negras.

En la planta de tratamiento de aguas residuales, el exceso de agua de lluvia contribuye a rebasar la capacidad de la infraestructura instalada, afectando los procesos al modificar la calidad del agua recibida; lo cual pudiera traducirse en una reducción de la calidad del agua tratada y que posteriormente se inyecta al subsuelo.

Este tipo de daños se presenta anualmente independientemente del tipo de lluvia.

De acuerdo con (Mena, 2006) los costos que se presentan durante una inundación se pueden distribuir porcentualmente de la siguiente manera:

Tabla 17 Distribución de costos por inundación

Concepto de Daño	Porcentaje
Viviendas	71.57%
Comercios	2.92%

Enfermedad	3.09%
Desalojo	0.12%
Preparativos	0.45%
Combustible	0.85%
Tiempo	1.19%
Ausentismo	8.34%
Aguas residuales	0.12%
Emergencia	11.34%
Total	100.00%

Fuente: Elaboración propia

Medidas de mitigación de los Daños por inundación

Con la finalidad de prevenir cualquier daño causados por de inundaciones se establecen dos tipos de acciones preventivas, las acciones no estructurales y las estructurales:

Acciones no estructurales.

1.1.1.4. Medidas preventivas.

Este tipo de acciones engloban una serie de programas y planes políticos, sistemas de prevención y alerta de inundación, así como la zonificación de las áreas potencialmente riesgosas. Además de la elaboración de mapas que permitan la ubicación de las rutas alternas de evacuación. En conjunto, las acciones no estructurales pueden minimizar significativamente los daños con un costo menor (Tucci, 2007).

1.1.1.5. Pronostico de ríos y sistemas de alerta temprana.

Al depender de las características climatológicas y físicas de una cuenca hidrográfica, la variación de los niveles y caudales de cuerpos de agua, éstas solo pueden ser previstas con antelación de pocos días u horas, pero para lograr tal alcance mediante el pronóstico en tiempo real a través de cual se establecer el nivel para la sección observada, así como el tiempo de ocurrencia. El proceso de estimación es realizado mediante modelos matemáticos que representen las distintas fases del ciclo hidrológico en la zona. Este tipo de acciones se verá completada por las medidas preventivas, principalmente por planes de acción de protección civil.

La alerta temprana es un elemento fundamental en la reducción de riesgo de desastres dado que evita pérdidas de vidas, además de disminuir los impactos económicos y materiales. Para cumplir con su propósito los sistemas de alerta temprana deben contemplar cuatro elementos interrelacionados (ONU, 2006):

Conocimiento de los riesgos. La evaluación de los riesgos requiere una recopilación constante y un vasto análisis dinámico respecto a las amenazas y vulnerabilidades que generan los procesos de urbanización, cambios en el uso de suelo, la degradación del medio ambiente y el cambio climático.

Servicio de seguimiento y alerta. Este componente resulta fundamental en el sistema de alerta, debido a la necesidad de contar con una base científica que permita prever y prevenir amenazas de manera confiable para hacer el llamado de alerta en cualquier momento del día. De ahí que se debe

dar seguimiento de los parámetros y acontecimientos que precedieron las amenazas para elaborar alertas precisas y oportunas.

Difusión y comunicación. Para que las alertas cumplan con su finalidad es indispensable que deban llegar a las personas en peligro, de lo contrario no generarán una respuesta adecuada para evitar daños humanos, por lo que es necesario acceder a medios que aseguren la transmisión de mensajes claros que proporcionen información sencilla y útil. También es necesario disponer de diversos canales de emisión con tal de garantizar que el mensaje de alerta llegue al mayor número posible de personas, además de evitar inconvenientes en caso de que uno o varios canales fallen.

Capacidad de respuesta. Si bien, los factores antes descritos juegan un importante para evitar daños humanos, sin una respuesta adecuada de las personas que se encuentran en riesgo poco se podrá lograr. Es así que resulta prioritario que la población comprenda el riesgo que corren, que respeten los servicios de alerta y sepan cómo reaccionar. Para asegurar la respuesta esperada en los ciudadanos es preciso contar con un plan estructurado, que haya sido objeto de prácticas y evaluaciones de funcionalidad. La población deberá ser consciente de las opciones y de la conducta que se espera de ellos, así como de las rutas de escape existente y la mejor manera de evitar daños y pérdidas de bienes.

Acciones estructurales.

Antes de continuar habrá que puntualizar que los recursos hídricos son de vital importancia en la vida del ser humano como en sus actividades económicas, es por esto que muchos centros urbanos se desarrollan en las inmediaciones de escurrimiento de agua o cuencas permanentes, como consecuencia se han desarrollado obras hidráulicas cuya función es imprescindible para el aprovechamiento y para la protección contra los excesos (Campos, 2010).

Las obras que permiten el aprovechamiento y almacenaje de excedentes son estructuras denominadas presas o embalses, por su parte, obras hidráulicas como los diques, encauzamientos y todo tipo de presas de control, brindan protección contra crecientes o caudales máximos de los ríos. Adicionalmente, dentro la zona urbana se cuenta con infraestructuras de drenaje, que pretende eliminar las inundaciones y los riesgos asociados con los encharcamientos por aguas de tormentas.

Una vez identificado los diferentes tipos de obras estructurales que pueden aplicarse para reducir los riesgos de inundación, se puede decir que existen otras acciones denominadas medidas 'extensivas' e 'intensivas'.

Medidas extensivas. Son las que pretenden actuar directamente en la cuenca, intentando modificar la relación entre precipitación y caudal, mediante la alteración de las áreas verdes y la cobertura vegetal, ya que a mayor cobertura se reduce y retarda los picos de crecidas, además de controlar la erosión de la cuenca.

Medidas intensivas. Son aquella que reaccionan directamente con los cuerpos de agua y se catalogan en tres tipos:

- a) Aceleradores de escurrimiento: este tipo se refiere, por ejemplo, a la construcción de diques de tal forma que permita aumentar la capacidad de descarga de los ríos; este mismo tipo

alude a los sistemas de drenaje urbano, que cumplen con la función de eliminar de la manera más rápida las aguas resultantes de tormentas para evitar encharcamientos dentro de la zona urbana.

- b) Obras de retardo del escurrimiento: a este tipo pertenecen estructuras como reservorios y cuencas de amortiguamiento
- c) Desvío del escurrimiento: obras como los canales de desvío son catalogado dentro de este tipo.

Métodos para la medición de daños por inundación

Los métodos para evaluar, en términos de daños una inundación, se pueden implementar integrando una función daño/profundidad y daño/duración de la crecida, con una base de datos espacial que incluya información sobre usos del suelo y características hidráulicas. Esta base de datos será el soporte para determinar los tipos, severidad y localización de los daños ocasionados por una inundación (Boyle, Tsanis, & Kanaroglou, 1998)

Actualmente existe una gran variedad de métodos para la estimación de daños por inundación, cada uno de ellos utiliza diferentes puntos de vistas, tal como el propósito, la estructura dañada o perspectiva regional. Generalmente cada país suele desarrollar su método utilizando como base un enfoque prioritario del territorio y/o región correspondiente (Pinos, Timbe, & Orellana, 2017).

Autores como Penning-Rowsell *et al.* (2005) indican “que la estimación de daños potenciales por inundación conlleva a una evaluación en términos de la probabilidad de futuras inundaciones que pueden ser evitadas y una evaluación de la vulnerabilidad según los daños que podrían generarse”.

Por otra parte el valor monetario de los daños permite calcular las necesidades de reconstrucción, el impacto socioeconómico total del desastre y las necesidades para alcanzar la recuperación económica (Orozco Montoya, 2018). Así mismo, el cálculo de los daños implica un análisis detallado que considere una serie de datos que muchas veces son difíciles de obtener por diferentes razones.

En cuanto a la determinación de los daños causados por una inundación pueden ser orientados a partir de dos tipos de afectados (Pinos, Timbe, & Orellana, 2017):

Daño por unidad el cual se refiere a la evaluación de daños potenciales propiedad por propiedad.

Daño por actividad económica en el que se estima las pérdidas de acuerdo al impacto en la producción de los sectores económicos.

La mayoría de los países basas su metodología en el enfoque de daños por viviendas, a pesar de que existe gran diversidad pocos países han implementado una metodología estándar para este tipo de estimaciones, considerando la dificultad que implica obtener algunos de los parámetros como la velocidad, profundidad y duración de las inundaciones, resulta difícil definir claramente categorías de daño.

Hazus Multi-Hazard.

Este método es desarrollado y distribuido por los Estados Unidos a través de Federal Emergency Management (FEMA), se basa principalmente en sistemas de información geográfica con el fin de proporcionar una herramienta de apoyo en la toma de decisiones sobre el uso de suelo y la vulnerabilidad ante inundaciones. Consiste en dos fases:

Análisis del peligro. En este primer proceso, se utilizan los datos históricos de la frecuencia de ocurrencia, caudal y la elevación del suelo, para modelar la profundidad y la velocidad de flujo.

Análisis de estimación de pérdida. Durante este procedimiento se cuantifica los daños estructurales y económicos sobre la base de los resultados de la primera fase, para esta finalidad se aplican curvas de daño que se encuentran en función de la profundidad del tirante y de la velocidad del agua para todos los componentes estructurales. Para el caso de estimación de daños por inundación para la agricultura suele utilizarse una fórmula empírica.

Este modelo considera los siguientes componentes para el proceso de análisis:

- Daño físico directo en edificaciones, instalaciones esenciales, sistemas de transporte, sistemas de suministro, sector agrícola y vehículos.
- Daño físico Indirecto: escombros.
- Pérdidas económicas directas.
- Pérdidas sociales: habilitación de refugios, grupos vulnerables, pérdidas humanas y logística para la respuesta al evento.
- Pérdidas económicas indirectas: aumento y/o reducción de importaciones y exportaciones, así como inventario de suministros, productos y tasas de desempleo.

Aplicación de curvas inundación – Daños.

La curvas inundación – daño se encuentran en función del tirante de agua máximo alcanzado por una inundación y resulta conveniente para calcular los daños para algunos usos de suelo, especialmente los de tipo residencial o habitacional (Ceballos Bernal, Baró Suárez, & Díaz-Delgado, 2016).

Esta metodología de estimación de daños se originó a partir del análisis de las inundaciones del río Teajapla, en dónde se identificaron las zonas de inundación mediante información de los niveles máximos de agua obtenidos de los perfiles calculados. En una segunda etapa se delimitó una zona habitacional para implementar las curvas de daños para estimar la pérdida directa provocadas por inundaciones para ello se utilizaron parámetros tales como el tipo de vivienda y las características socioeconómicas asociadas en función con el índice de marginación (IM).

De acuerdo con los resultados de aplicación obtenido por los autores, este método para la valoración de daños por inundación puede ser aplicado para evaluar la vulnerabilidad del socio-ecosistema ante inundaciones, construir mapas de riesgo por inundación, optimar decisiones en las medidas de mitigación de inundaciones y planeación urbana. A continuación, se presenta los modelos matemáticos desarrollados para la estimación de daños tangibles directos en zonas habitaciones ocasionados por inundación (México), en función al índice de marginación, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 18 Modelos matemáticos de daños tangibles directo en zona habitacional ocasionados por inundación.

Índice de marginación	Modelo matemático (costo en N° salarios mínimos)		
	<i>DDHmax</i>	<i>DDHmin</i>	<i>DDHmp</i>
Muy alto	$247.63 \ln(h) + 668.44$	$141.36 \ln(h) + 382.45$	$156.92 \ln(h) + 424.33$
Alto	$289.63 \ln(h) + 801.56$	$228.58 \ln(h) + 637.93$	$280.51 \ln(h) + 777.60$
Medio (1 planta)	$709.63 \ln(h) + 1976.04$	$544.93 \ln(h) + 1546.60$	$685.51 \ln(h) + 1913.15$
Medio (2 plantas)	$549.55 \ln(h) + 1345.57$	$405.03 \ln(h) + 965.27$	$528.39 \ln(h) + 1289.88$
Bajo (1 planta)	$877.28 \ln(h) + 2479.23$	$797.24 \ln(h) + 2233.19$	$865.56 \ln(h) + 2443.20$
Bajo (2 plantas)	$666.15 \ln(h) + 1632.94$	$595.33 \ln(h) + 1409.03$	$605.70 \ln(h) + 1441.82$
Muy bajo (1 planta)	$1521.8 \ln(h) + 4051.63$	$1210.14 \ln(h) + 3321.2$	$1255.78 \ln(h) + 34328.17$
Muy bajo (2 plantas)	$1230.35 \ln(h) + 2850.34$	$939.78 \ln(h) + 2221.33$	$1187.79 \ln(h) + 2758.22$

Donde *h*: profundidad máxima alcanzada de inundación en *m*; *DDHmax*: daños directos en zona habitacional (costo máximo); *DDHmin*: daños directos en zona habitacional (costo mínimo); *DDHmp*: daños directos en zona habitacional (costo más probable); $\ln(h)$: logaritmo natural de la altura máxima de agua alcanzada en la inundación. (Ceballos Bernal, Baró Suárez, & Díaz-Delgado, 2016)

FLEMO.

Esta agrupación de modelos se desarrolló por el German Research Centre for Geoscience, principalmente para el análisis científico del riesgo de inundación desde la escala local a la nacional (Alemania). Contiene cálculos multifactorial de la estimación de la pérdida por inundaciones y se basa en dos componentes:

FLEMOps. Contempla la estimación de los daños tangibles directos a los edificios residenciales y contenido de los hogares, es decir, se enfoca en el sector privado. Los daños son calculados utilizando categorías como el nivel de agua, tipos de vivienda, calidad de construcción, contaminación y precaución.

FLEMOcs. Por su parte, este componente también estima los daños tangibles directos, pero en edificios comerciales, equipos y bienes de las empresas, por lo que su perspectiva es comercial. En este caso los daños se calculan de manera similar al FLEMOps, utilizando el nivel del agua, sectores económicos, tamaño de empresas respecto al número de empleados, así como la contaminación y la precaución.

Ambos modelos del método se basan en la información empírica obtenida mediante encuestas sobre daños específicos producidos por eventos de inundación importantes en Alemania. La versatilidad de este método está en su aplicación a nivel local o microescala.

Como se puede observar, el enfoque más utilizado es el que se encuentra en función de daño-profundidad, resultando, internacionalmente aceptada para estimar el valor relativo o absoluto de los daños a través de una relación causal entre la magnitud de la amenaza (profundidad del agua, el nivel de vulnerabilidad (tipo de vivienda) y los daños aproximados (Orozco Montoya, 2018).

2. Problemática

La belleza del lugar y sus alrededores ha generado que Bacalar sea uno de los principales centros turísticos de la zona sur del estado de Quintana Roo; su afluencia turística ha demandado el surgimiento de servicios turísticos, que representan oportunidades de empleo para personas de diferentes partes de la República Mexicana y el mundo. Esas actividades han sido motivo de un crecimiento acelerado de la mancha urbana en la cual ya puede observar deforestación en sus alrededores. Las autoridades municipales, estatales y federales, así como organizaciones civiles e instituciones educativas se han promulgado por alcanzar un desarrollo sustentable de Bacalar y por ello están en la búsqueda de alternativas para lograrlo.

Una forma de lograr el desarrollo sustentable de Bacalar es mediante la aplicación de acciones para hacer de ese lugar una ciudad sensible al agua, por lo que en este trabajo se realiza un análisis económico de los daños que se pudieran presentar si la ciudad se desarrolla de manera tradicional en la cual predomina el área gris contrastándola con un crecimiento en el cual se implementan acciones para hacerla sensible al agua. Para tal efecto se analizan diversos escenarios y se estima el ahorro en daños que se tendría en el caso de implementar acciones de sensibilidad al agua.

Objetivo

Realizar la valoración económica de los daños en una ciudad al variar el área permeable sin y con la implementación de acciones de una ciudad sensible al agua.

3. Metodología

Área de Estudio

El área de estudio para la valoración de daños de Bacalar por efecto de la variación de la superficie permeable abarca el casco urbano actual indicado en color gris y el área estimada en el documento borrador del Plan de Desarrollo Urbano de la localidad. Ver figura 1

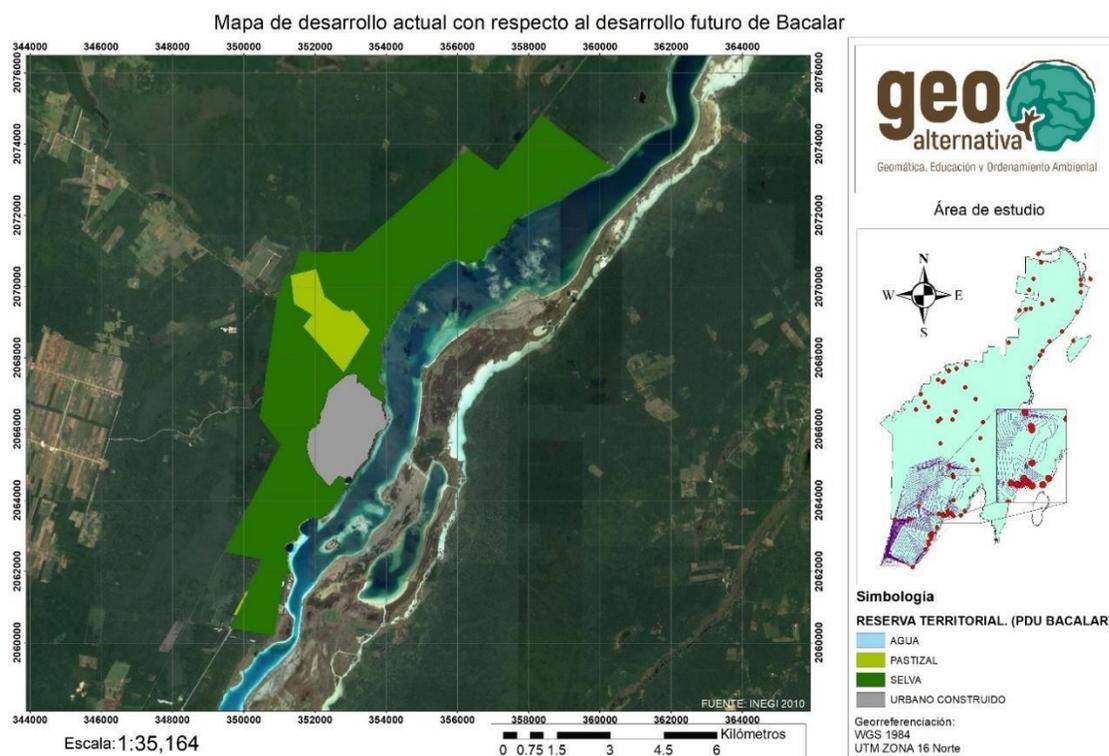


Imagen 4. Imagen satelital con polígono propuesto para el desarrollo del Centro Urbano de 4000 HAS, se observa el área actualmente urbanizada de 433.78 HAS. Elaboración propia con información de (Google; INEGI; DigitalGlobe, 2018-2019), (INEGI; Serie VI, 2010), (SEDETUS; H. Ayuntamiento de Bacalar, por publicar)
Fuente: Elaboración propia

Valoración económica de los daños

El proceso de valoración económica distingue 3 etapas: la identificación, la cuantificación y valoración de los daños que se presentarían considerando diversos escenarios (ver tabla 3) en los cuales se hace variar la superficie permeable y se considera que el desarrollo del área urbana no tiene acciones para tener una ciudad sensible agua, y posteriormente se consideran para esas mismas variaciones de área la incorporación para hacerlas sensible al agua.

Tabla 19 Variación de CN o relación área verde/área gris

Situación Urbana 26/74	Bacalar Situación Urbana 68/32	Situación Urbana 35/65	Situación Urbana 22/78
CN	CN	CN	CN
61	77	86	95

Fuente: Elaboración propia

Identificación de daños

Los daños identificados en una inundación dependen de varias variables, los identificados en la mayoría de las poblaciones en México (CONAGUA, 2015) son: daño en propiedades y actividades

productivas, los costos en organismos públicos, terrenos inundables, deterioro de vialidades, Costos Generalizados de Viaje (CGV), ausentismo laboral y escolar, gastos de emergencia y limpieza, costo por enfermedad y costo por molestias a las personas. Sin embargo, ello implica un estudio detallado del lugar para conocer cuales son los que se presentan. Debido a que la mayor parte del área de análisis considera una superficie que aún no está poblada únicamente se estiman los daños en vivienda generados por diferentes tirantes de agua.

Cuantificación de daños

Para la cuantificación de daños se estimó el área afectada por los diferentes tirantes que se forman por la acumulación de agua debido a la variación de la superficie permeable y partiendo de la premisa que del 100% de la superficie a desarrollarse en la propuesta del Plan de Desarrollo Urbano de Bacalar se dividirá en los siguientes aprovechamientos: 60% en edificaciones (edificios y vivienda), 30% en vialidades y 10% en área de donación

Valoración de daños

La valoración de daños se realizó considerando las ecuaciones propuestas por (Ceballos Bernal, Baró Suárez, & Díaz-Delgado, 2016) en las que determinan las curvas de inundación-daño para diferentes tipos de vivienda y cuyo resultado se estima en salarios mínimos. Debido a que no se conoce el tipo de vivienda ni demás usos de suelo que se tendrán se considerarán únicamente viviendas de una planta y la valoración de daños se obtendrá mediante la expresión:

$$DDHmp = 685.51 Ln(h) + 1913.15$$

Donde:

DDHmp: Daño más probable

Ln(h): Logaritmo natural de la altura del tirante (m)

Daños anuales esperados

Los daños anuales al ser un evento probabilístico se estimaron como lo sugiere (CONAGUA, 2015) se determinó como el inverso del período del retorno multiplicado por el costo del daño para cada relación área verde/área gris para ese tipo de lluvia por lo que en la tabla 4 se puede observar dicha acción.

Tabla 20 Daños Anuales Esperados

Daños (Millones de SM)	Período de Retorno (Años)	Probabilidad	Daño Anual Esperado
Cifra 1	2	0.5%	Cifra 1 x Probabilidad
Cifra 2	10	0.1%	Cifra 1 x Probabilidad
			Sumatoria

Fuente: Elaboración propia

Valor Actual de los Beneficios de acciones sensibles al agua

Para estimar el Valor Actual de los beneficios por las acciones sensibles al agua se efectuó un cálculo de perpetuidad considerando que los beneficios por la aplicación de acciones sensibles al agua se mantienen a lo largo del tiempo mediante la expresión:

$$VAB = \frac{AAD}{r}$$

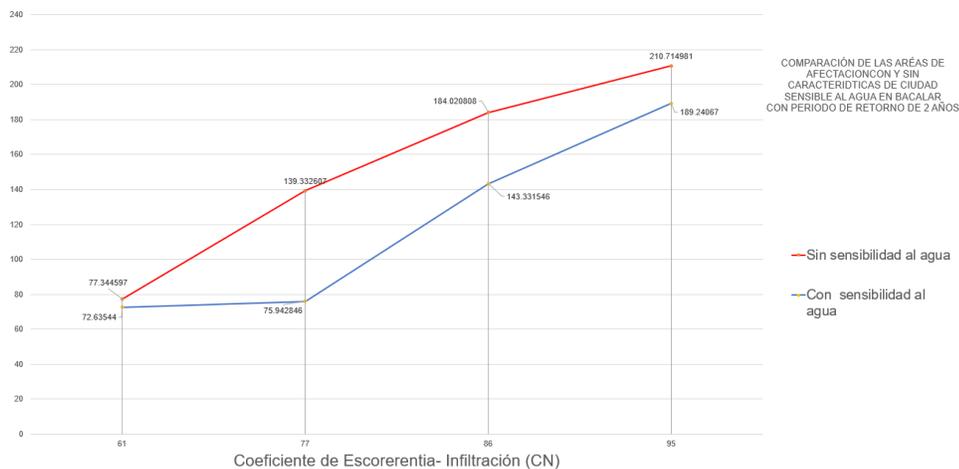
Donde VAB es el valor actual de los beneficios, AAD el ahorro anual por daños y r la tasa social de descuento requerida por Secretaría de Hacienda y Crédito Público para evaluar proyectos del sector público.

4. Resultados

Cuantificación de daños Tr=2 años

En la gráfica 1 se presenta la variación de la superficie de daños al variar el coeficiente de escorrentía para una lluvia con Tr =2 años; en la cual la superficie afectada varía entre 77 Ha a 210 Ha de afectación, dependiendo el CN

Se puede observar en las tablas 5 y 6 que a medida que la relación entre la superficie permeable e impermeable se incrementa el tirante de agua y con ello el número de viviendas afectadas en la zona de estudio. También se puede observar como en la medida que se implementan acciones para hacer la ciudad sensible al agua las áreas afectadas y los tirantes se reducen la cantidad de viviendas afectadas son menores.



Gráfica 1. Coeficiente de escorrentía-superficie sin acciones de sensibilidad al agua

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21 Número de viviendas afectadas con una inundación con Tr=2 años sin acciones sensibles al agua

Peligrosidad	RANGO	Situación Urbana 26/74	Bacalar Situación Urbana 68/32	Situación Urbana 35/65	Situación Urbana 22/78
		CN	CN	CN	CN
	m	61	77	86	95
Baja	0.25-0.5	1034	1390	1535	1478
Medio	0.5-1.5	358	1094	1745	2240
Alta	1.5-mas	0	25	33	75
Total (Viviendas)		1392	2509	3313	3793

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22 Número de viviendas afectadas con una inundación con Tr=2 años con acciones sensibles al agua

Peligrosidad	RANGO	Situación Urbana 26/74	Bacalar Situación Urbana 68/32	Situación Urbana 35/65	Situación Urbana 22/78
		CN	CN	CN	CN
	m	61	77	86	95
Baja	0.25-0.5	1010	1020	1411	1475
Medio	0.5-1.5	298	347	1153	1892
Alta	1.5-mas	0	0	16	40
Total (viviendas)		1308	1367	2580	3407

Fuente: Elaboración propia

Valoración de daños Tr=2 años

En las tablas 7 y 8 observa que a medida que incrementa el CN o relación de área permeable se presenta un incremento en los costos de los daños tanto sin como con acciones sensibles al agua. Mientras que en la tabla 9 se presentan el ahorro de recursos por daños si se implementan las acciones para hacer una ciudad sensible al agua; mientras que para un CN de 61 se tendría un ahorro del 2%, con un CN de 77 se incrementa hasta 24% mientras que al aumentar a un CN 86 los costos se reducen un 14% y al llegar a un CN del 95 la reducción costo que se tendría sería del 8%

Tabla 23 Valoración de daños en viviendas afectadas con una inundación con Tr=2 años sin acciones sensibles al agua en Millones de Salarios Mínimos

Peligrosidad	RANGO	Situación Urbana 26/74	Bacalar Situación Urbana 68/32	Situación Urbana 35/65	Situación Urbana 22/78
		CN	CN	CN	CN
	m	61	77	86	95
Baja	0.25-0.5	1.89	1.95	2.13	2.13
Medio	0.5-1.5	3.51	5.14	6.08	6.65
Alta	1.5-mas	0.06	0.37	0.60	0.84
Total (Millones de Salarios Mínimos)		5.46	7.45	8.80	9.62

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24 Valoración de daños en viviendas afectadas con una inundación con $Tr=2$ años sin acciones sensibles al agua en Millones de Salarios Mínimos

Peligrosidad	RANGO	Situación Urbana 26/74	Bacalar Situación Urbana 68/32	Situación Urbana 35/65	Situación Urbana 22/78
		CN	CN	CN	CN
	m	61	77	86	95
Baja	0.25-0.5	1.92	1.96	2.00	2.08
Medio	0.5-1.5	3.40	3.97	5.35	6.21
Alta	1.5-mas	0.05	0.10	0.37	0.65
Total (Millones de Salarios Mínimos)		5.37	6.02	7.71	8.94

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25 Ahorro en daños en viviendas afectadas con una inundación con $Tr=2$ años al implementar acciones sensibles al agua

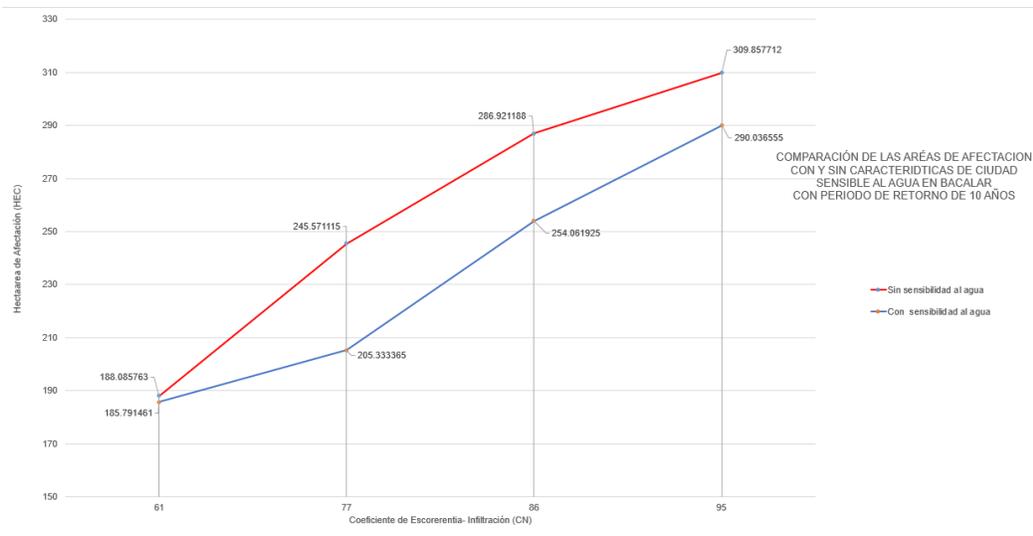
CN	Daños (Millones de Pesos)		
	Daños SSA	Daños CSA	Diferencia
61	2.62	2.43	0.19
77	5.16	2.57	2.59
86	7.08	5.32	1.76
95	8.38	7.38	0.99

Fuente: Elaboración propia

Cuantificación de daños $Tr=10$ años

En la gráfica 2 se presenta la variación de la superficie de daños al variar el coeficiente de escorrentía para una lluvia con $Tr = 10$ años; a medida que éste último se incrementa también lo hace el área.

En las tablas 10 y 11 se puede observar como a medida que la relación entre la superficie permeable e impermeable se incrementa el tirante de agua y con ello el número de viviendas en la zona de estudio. También se puede observar como en la medida que se implementan acciones para hacer la ciudad sensible al agua las áreas afectadas y los tirantes se reducen.



Gráfica 1. Coeficiente de escorrentía-superficie sin acciones de sensibilidad al agua
Fuente: Elaboración propia

Tabla 26 Número de viviendas afectadas con una inundación con $Tr=10$ años sin acciones sensibles al agua

Peligrosidad	RANGO	Situación Urbana 26/74	Bacalar Situación Urbana 68/32	Situación Urbana 35/65	Situación Urbana 22/78
		CN	CN	CN	CN
	m	61	77	86	95
Baja	0.25-0.5	1523	1569	1713	1717
Medio	0.5-1.5	1837	2685	3177	3477
Alta	1.5-mas	26	167	274	383
Total (Viviendas)		3386	4421	5164	5577

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27 Número de viviendas afectadas con una inundación con $Tr=10$ años con acciones sensibles al agua

Peligrosidad	RANGO	Situación Urbana 26/74	Bacalar Situación Urbana 68/32	Situación Urbana 35/65	Situación Urbana 22/78
		CN	CN	CN	CN
	m	61	77	86	95
Baja	0.25-0.5	1544	1576	1609	1674
Medio	0.5-1.5	1776	2074	2795	3248
Alta	1.5-mas	24	46	169	298
Total (viviendas)		3344	3696	4573	5220

Fuente: Elaboración propia

Valoración de daños Tr=10 años

En las tablas 12 y 13 observa que a medida que incrementa el CN o relación de área permeable también incrementan los costos de los daños tanto sin como con acciones sensibles al agua. Mientras que en la tabla 14 se presentan el ahorro de recursos por daños si se implementan las acciones para hacer una ciudad sensible al agua; mientras que para un CN de 61 se tendría un ahorro del 2%, con un CN de 77 se incrementa hasta 24% mientras que al aumentar a un CN 86 los costos se reducen un 14% y al llegar a un CN del 95% la reducción costo que se tendría sería del 8%

Tabla 28 Valoración de daños en viviendas afectadas con una inundación con Tr=10 años sin acciones sensibles al agua en millones de salarios mínimos

Peligrosidad	RANGO	Situación Urbana 26/74	Bacalar Situación Urbana 68/32	Situación Urbana 35/65	Situación Urbana 22/78
		CN	CN	CN	CN
	m	61	77	86	95
Baja	0.25-0.5	1.89	1.95	2.13	2.13
Medio	0.5-1.5	3.51	5.14	6.08	6.65
Alta	1.5-mas	0.06	0.37	0.60	0.84
Total (Millones de Salarios Mínimos)		5.46	7.45	8.80	9.62

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29 Valoración de daños en viviendas afectadas con una inundación con Tr=10 años sin acciones sensibles al agua en millones de salarios mínimos

Peligrosidad	RANGO	Situación Urbana 26/74	Bacalar Situación Urbana 68/32	Situación Urbana 35/65	Situación Urbana 22/78
		CN	CN	CN	CN
	m	61	77	86	95
Baja	0.25-0.5	1.92	1.96	2.00	2.08
Medio	0.5-1.5	3.40	3.97	5.35	6.21
Alta	1.5-mas	0.05	0.10	0.37	0.65
Total (Millones de Salarios Mínimos)		5.37	6.02	7.71	8.94

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30 Ahorro en daños en viviendas afectadas con una inundación con Tr=10 años al implementar acciones sensibles al agua

CN	Daños (Millones de SM)		
	Daños SSA	Daños CSA	Diferencia
61	2.62	2.43	0.19
77	5.16	2.57	2.59
86	7.08	5.32	1.76
95	8.38	7.38	0.99

Fuente: Elaboración propia

Daños anuales esperados

En las tablas 15 y 16 se presentan la valoración anual de los daños esperados sin y con la implementación de acciones de ciudad sensible al agua. Observándose que mientras los daños sin acciones de sensibilidad varían entre 1.53 millones de salarios mínimos a 4.10 millones de salarios mínimos al implementar las acciones se reducen notablemente.

En la tabla 17 se puede identificar que para una relación CN 61 el ahorro en daños es mínimo al implementar las acciones de sensibilidad al agua permitiendo un ahorro únicamente de 0.8 millones de salarios mínimos, mientras que si el CN se incrementa hasta 86 es decir con un área gris de verde del 35% se puede tener un ahorro máximo en daños por 1.11 millones de salarios mínimos al año.

Tabla 31 Daños anuales esperados sin acciones de sensibilidad al agua (Millones de SM)

CN	Daños (MDP)		Probabilidad (%)		Daño Anual Esperado
	Tr 2	Tr 10	Tr 2	Tr 10	
61	1.97	5.46	0.5	0.1	1.53
77	3.87	7.45	0.5	0.1	2.68
86	5.32	8.80	0.5	0.1	3.54
95	6.28	9.62	0.5	0.1	4.10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32 Daños anuales esperados con acciones de sensibilidad al agua (Millones de SM)

CN	Daños (MDP)		Probabilidad (%)		Daño Anual Esperado
	Tr 2	Tr 10	Tr 2	Tr 10	
61	1.82	5.37	0.5	0.1	1.45
77	1.93	6.02	0.5	0.1	1.57
86	3.99	7.71	0.5	0.1	2.77
95	5.54	8.94	0.5	0.1	3.66

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33 Ahorro anual en daños (AAD) por acciones de sensibilidad al agua (Millones de SM)

CN	Daños (MDP)		Probabilidad (%)		Daño Anual Esperado
	Tr 2	Tr 10	Tr 2	Tr 10	
61	0.14	0.10	0.5	0.1	0.08
77	1.94	1.43	0.5	0.1	1.11
86	1.32	1.09	0.5	0.1	0.77
95	0.75	0.68	0.5	0.1	0.44

Fuente: Elaboración propia

Daños anuales por conectar un sistema pluvial de las viviendas al sistema de drenaje sanitario

En la tabla 18 se presentan los daños que se tendrían anualmente por lluvia si se instala un drenaje sanitario convencional (redes en las calles más cárcamos de rebombeo) y las viviendas conectan sus

descargas pluviales a ese sistema. Se observa que aun cuando el área permeable es mayor (CN 61) habría costos por este tipo de prácticas.

Tabla 34 Beneficios a valor actual de los daños probables en un horizonte de 20 años

CN	Beneficios en MDSM	Beneficios en Millones de Pesos
61	0.41	41.83
77	5.56	570.81
86	3.84	394.22
95	2.21	227.37

Fuente: Elaboración propia

5. Conclusiones

Sin y con acciones para hacer sensible una ciudad al agua el valor de los daños incrementa al incrementar la relación área verde/área gris esperada para Bacalar.

La implementación de acciones de sensibilidad al agua reduce considerablemente los daños en todos los escenarios realizados.

La relación área verde/área gris que más ahorros genera es 68/32 con 1.11 millones de salarios mínimos al año. Por lo que esa relación pudiera ser la que económicamente sea más conveniente implementar.

Existirá un daño por las descargas de agua pluvial al sistema de drenaje convencional en tanto la población no sea consciente de ello. Y pudiera ser conveniente analizar sistemas individuales de tratamiento de las aguas residuales, ya que cuando las personas tienen un sistema propio no se incurren en esas prácticas.

6. Bibliografía

Águeda García de Durango. (2019). *iagua*. Obtenido de <https://www.iagua.es/noticias/inundaciones>

- Badilla Sánchez, S. (1990). Desastres por inundaciones y sus daños potenciales en G^zGuanacaste, Costa Rica. *Revista Geográfica*, 5-39. Obtenido de https://www.jstor.org/stable/40992615?seq=1#page_scan_tab_contents
- Benejam, P. (1996). En *Horizonte: historia y geografía* (pág. 303). Andrés Bello.
- Bertoni, J. (2004). *Inundaciones urbanas en Argentina*. Córdoba.
- Bitrán, B. (Abril de 1992). El impacto de los desastres naturales en el desarrollo económico. 13.
- Boyle, S., Tsanis, I., & Kanaroglou, P. (1998). Developing Geographic Information Systems for land use impact assessment in flood conditions. *Journal of Water Resources Planning and Management Vol. 124*, 89-98.
- Campos, A. D. (2010). *Introducción a la hidrología urbana* (Primera ed.). San Luis Potosí, México.
- Cardona, O. (2004). *The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective: A Necessary Review and Criticism for Effective Risk Management*. En *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*. Londres: Earthscan Publishers.
- Ceballos Bernal, A. I., Baró Suárez, J. E., & Díaz-Delgado, C. (2016). Estimación de pérdidas económicas directas provocadas por inundación. Aplicación de las curvas inundación-daños en países en desarrollo. *Investigaciones Geográficas. Instituto Interuniversitario de Geografía. Universidad de Alicante*, 169-180.
- CONAGUA. (2015). Metodologías de evaluación socioeconómica y estructuración de proyectos de inversión (agua potable, alcantarillado, saneamiento, mejoramiento de eficiencia y protección a centros de población). En C. N. Agua, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México.
- CONAGUA. (2015). *Metodologías de Evaluación Socioeconómica y Estructuración de Proyectos de Inversión (Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento, Mejoramiento de Eficiencia y Protección a Centros de Población)*. México: SEMARNAT.
- Cruz, B. (2009). Formulación del riesgo conjunto, inundación-sequia, bajo un esquema probabilístico, aplicado en la región hidrológica nazas-aguanaval (RH-36). En *Tesis de maestría en ingeniería hidráulica* (pág. 196). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería, División de estudios de posgrado, : campus Morelos México.
- Google; INEGI; DigitalGlobe. (2018-2019). Imagen Satelital. Recuperado el 9 de Febrero de 2019
- IMPLAN. (2014). *Programa de desarrollo urbano del centro de población Cancún, municipio Benito Juárez, Quintana Roo 2014-2030*. Instituto de Planeación de Desarrollo urbano Municipio de Benito Juárez, Cancún.
- INEGI; Serie VI. (2010). Serie VI - Uso de Suelo y Vegetación. (I. N. Geografía, Ed.) Ciudad de México, México.
- IV Foro Mundial del Agua. (2006). Documento Temático. Eje temático 5. *Manejo de Riesgos – Acciones locales para un reto global*. Ciudad de México.

- James, L., & Lee, R. (1971). *Economics of water resources planning*. New York: Mc Graw Hill.
- Ley de acciones urbanísticas del estado de Quintana Roo, Decreto 194 (16 de 08 de 2018).
- Mora Chamorro, H. (2013). El sistema integral de seguridad. En *Manual del vigilante de seguridad* (2a ed., Vol. 1, pág. 15). Madrid: Editorial Club Universitario.
- Munich, R. (2005). Weather catastrophes and climate change. *Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft*.
- NWRM. (2019). *Natural Water Retention Measures - Guide*. Obtenido de <http://nwrn.eu/guides/files/assets/basic-html/page89.html>
- ONU. (2006). EWC III. *Tercera conferencia internacional sobre alerta temprana (del concepto a la acción) Desarrollo de sistemas de alerta temprana: lista de comprobación*. Bonn, Alemania: Organización de las Naciones Unidas.
- Orozco Montoya, R. A. (2018). *Valoración económica de daños por inundación en la cuenca del río Parrita, Pacífico Central, Costa Rica*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de investigación y enseñanza.
- PAOT. (2003). *Usos de suelo, Apéndice Temático*. Informe Anual, Procuraduría ambiental y del ordenamiento Territorial del D.F.
- Penning-Rowsell, E., Johnson, C., Tunstall, S., Tapsell, S., Morris, J., Chatterton, J., & Green, C. (2005). *The benefits of flood and coastal risk management: A Handbook of assessment techniques*. London: Middlesex University Press.
- Pinos, J., Timbe, L., & Orellana, D. (2017). *Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fluvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para Ecuador*. MASKANA.
- RAE. (2014). *Diccionario de la lengua española* (23a ed.). Real Academia Española.
- RALCEA. (2015). Guía y caso de estudio. En *GESTIÓN INTEGRADA DE CRECIDAS*. Luxembourg: Red Latinoamericana de centro de excelencia de gestión de los recursos hídricos.
- Romanillo, M., Yanguas, A., & Santos, J. (2004). El concepto de ciudad. En *Historia de España* (págs. 447-453). Espasa-Calpe, Madrid.
- SEDATU . (2012). *Programa de desarrollo urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López-Huay Pix-Xul Ha. Municipio de Othón P. Blanco, Estado de Quintana Roo*. Secretaría de desarrollo agrario, territorial y urbano, Chetumal.
- SEDATU. (2005). *Programa de Desarrollo Urbano del Área Metropolitana de Chetumal-Calderitas-Xul-Há*. Secretaría de desarrollo agrario, territorial y urbano, Chetumal.
- SEDETUS; H. Ayuntamiento de Bacalar. (por publicar). *Programa de Desarrollo Urbano del Centro Urbano de Bacalar*. Secretaria de Desarrollo Territorial Urbano Sustentable.
- Tucci, C. (2007). Urban Flood Management. En *World Meteorological Organization and International Network for Capacity Building in Integrated Water Resources Management* (pág. 315).

WMO. (2012). *International Glossary of Hydrology*. Ginebra, Suiza: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

Zimmermann, E., & Bracalenti, L. (2014). *REDUCCIÓN DE RIESGO DE INUNDACIÓN URBANA MEDIANTE INCREMENTO DE ÁREAS PARA LA AGRICULTURA Y LA FORESTACIÓN URBANA Y PERIURBANA (UPAF)*. Universidad Nacional de Rosario.