

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA MEXICALI

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



**PLANEACIÓN URBANA Y GESTIÓN DE RIESGO DE INUNDACIÓN EN
CIUDADES DE ZONAS SEMIARIDAS DEL NOROESTE DE MÉXICO, CASO
DE ESTUDIO: MEXICALI BAJA CALIFORNIA.**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

M.C Carlos Salazar Briones

Director de Tesis: Dr. Alejandro Mungaray Moctezuma

Co Dirección: Dra. Sara Ojeda Benítez

Mexicali, B.C

29 de Septiembre del

2018

“Laudato si’, mi’ Signore”

*Alabado seas, mi Señor, por la hermana nuestra
madre tierra, la cual nos sustenta, y gobierna*

Pax et Bonum

Dedicatoria:

A Dios

A mi Familia

A ti

Agradecimientos:

A Dios. Por permitirme caminar en este mundo, por regalarme una familia hermosa, por mis amigos, por dejarme descubrir en su creación las pistas para llegar a él, por sostenerme cada día y por el don de la fraternidad.

*A mi esposa Mireya Vázquez Cervantes,
Por su apoyo incondicional, su consejo y su amor en esta aventura, que es tanto mía como suya (lo logramos hermosa).*

*A mis Hijos, Carlos y Sofía,
Por ser mi inspiración, para entender y buscar construir un mundo mejor para ellos.*

A mis Padres, Raúl Enrique Salazar Pagaza, que desde el cielo comparte mis logros, a Carolina Briones Rojas, por su amor y entrega incondicional en cada paso de mi vida.

A mis Hermanos: Fray Juan Carlos Salinas, Fray Adolfo, Fray Agustín y Fray Eliud OFM. Por sus oraciones y fraternal cariño.

*A mis Asesores, revisores y maestros,
Por su guía, apoyo y dedicación.*

*A mis amigos,
Marcelo, Mizael, Alejandro y Adrián que con su amistad han hecho llevadera las largas jornadas de trabajo, han enriquecido mi experiencia y hecho ameno el curso de este doctorado, y a mis demás amigos que fuera de este recinto me han hecho una mejor persona.*

Y especialmente a:

Mi Director de tesis: Dr. Alejandro Mungaray Moctezuma. Por ser amigo, maestro y guía en este proyecto.

A mi Co-Directora: Dra. Sara Ojeda Benítez. Por su guía, amistad y compartir su experiencia y conocimientos, que sin duda serán parte de mi bagaje por siempre.

Y a la Dra. Michelle Hallack Alegría, por su apoyo y conocimientos que me iniciaron en este proceso.

Contenido

Capítulo I Introducción.....	7
Planteamiento del problema.....	9
Justificación.....	10
Objetivos.....	11
Objetivo General.....	11
Objetivos particulares.....	11
Hipótesis.....	12
Enfoque general de la tesis.....	13
Aportaciones de esta investigación.....	14
Capítulo 2 Marco Teórico.....	16
Planeación Urbana.....	16
Gestión de riesgos.....	19
Relaciones entre planeación y la hidrología urbana.....	20
Hidrodinámica.....	22
Servicios ecosistémicos.....	23
Área de estudio.....	25
Medio Físico.....	25
Localización del área de estudio.....	25
Clima.....	27
Geología.....	28
Edafología y Orografía.....	30
Uso de Suelo.....	32
Aspectos Ambientales.....	34

Aspectos Históricos	34
La cuenca hidrológica del Mar de Salton.....	36
El Río Nuevo y Mexicali	37
Aspectos Socioeconómicos.....	37
Población	37
Estructura económica	38
Eventos de Inundaciones en el Río Nuevo.....	38
Capítulo 3. Materiales y Métodos	43
Análisis regional de frecuencia	47
Selección de los datos	48
Identificación de regiones homogéneas	48
Selección de la distribución de frecuencia	50
Estimación de función de cuantiles	51
Modelo Hidrológico.....	52
Determinación de los parámetros de tipo de uso de suelo	52
Delimitación de sub-cuenca y micro-cuencas	53
Modelo Hidráulico.....	53
Identificación de Servicios Eco-sistémicos	54
Resultados y Discusión	56
Relaciones entre planeación y la hidrología urbana	56
Análisis Regional de Frecuencias.....	60
Características de los modelos hidrológico e hidráulico	62
Determinación de las zonas de inundación por periodo de retorno.....	65
Identificación de Servicios Eco-sistémicos	69

Conclusiones y recomendaciones.....	76
Conclusiones teóricas.....	76
Conclusiones Metodológicas	77
Conclusiones físicas.....	78

Capítulo I Introducción.

Sin duda la complejidad del entorno urbano en la actualidad pone en evidencia las debilidades de la planeación urbana tradicional tanto de la perspectiva disciplinaria, como de la acción pública, evidenciando la necesidad de reformarse para dar respuestas a las nuevas exigencias de los espacios urbanos actuales y sus habitantes (Gutierrez, 2009).

Según Tucci (2010), los temas relacionados con el recurso hídrico del ámbito urbano, frecuentemente se mantienen desconectados de procesos más amplios de la planificación urbana y de la gestión en el ámbito de la cuenca. Los planes maestros urbanos no han logrado manejar satisfactoriamente los diversos componentes infraestructurales de la gestión de las aguas urbanas, descuidando el reconocimiento de la interdependencia entre el suministro de agua, el agua residual, el control de inundaciones y el agua pluvial (Global Water Partnership, 2011).

La aceleración del crecimiento poblacional y los cambios en el uso de suelo aumentan la vulnerabilidad ante las inundaciones, incluyendo: la mortalidad y la morbilidad; el desplazamiento; y el daño a cultivos así como la infraestructura y la propiedad (Dewan, 2015). Existe una relación directa entre la urbanización y los cambios en las características hidrológicas, incluyendo disminución de la infiltración, aumento de escorrentía y altura de las inundaciones que, aunado al crecimiento de la población y a la acumulación de activos de valor, agravan el riesgo de inundación en zonas urbanas (Ouma & Tateishi, 2014). Por lo que las cuencas urbanas resultan más vulnerables a estos fenómenos principalmente por procesos de origen antropogénico propios de su dinámica.

Se estima que alrededor de 300 millones de personas han sido afectadas desde la década de 1990 por desastres naturales (Trivedi, Singh, & Indian, 2015). Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) del 2007, se han observado desviaciones en los patrones

meteorológicos promedio del mundo, con una mayor frecuencia de eventos extremos de precipitación (Habitat, U.N., 2011). En este sentido, las inundaciones se encuentran entre los peligros naturales más recurrentes y devastadores (Ouma & Tateishi, 2014). Las inundaciones corresponden al 50% de los desastres relacionados al agua, esto por encima de hambrunas, sequías y epidemias (Hernandez-Uribe, Barrios-Piña, & Ramirez., 2017).

Los fenómenos hidrometeorológicos, por su frecuencia, magnitud e intensidad física, así como por el impacto que tienen en la población y la infraestructura, están relacionados con el mayor número de desastres naturales en México (Ayuntamiento de Mexicali, 2009)

Este estudio se realiza en el Río Nuevo dentro de la cuenca transfronteriza del Salton Sea, ubicada en la región semiárida del Delta del Río Colorado, colindante con la frontera entre los Estados de Baja California, México y California en los Estados Unidos. La principal característica de la precipitación en zonas áridas y semiáridas consiste en tormentas que se intensifican rápidamente, provocando inundaciones repentinas (Pourreza, Samadi, Ali, & Ghahraman., 2016). En estas regiones habita alrededor del 20% de la población total y representan aproximadamente el 30% del área mundial (Sivakumar, Das, & Brunini, 2005).

La importancia de tomar en cuenta el estudio de eventos extremos de precipitación por tormentas de alta intensidad y corta duración en zonas áridas y semiáridas, en la planeación urbana estriba en la capacidad de daños que estos fenómenos pueden ocasionar en la población, la infraestructura urbana y agrícola, así como en las actividades de importancia socioeconómica.

Tomando como referencia lo anterior y entendiendo que, en la evaluación del riesgo de inundación una base científica es importante para la gestión del riesgo de desastres, y un importante instrumento para la correcta planeación urbana, el objetivo de este estudio es determinar las áreas de inundación del cauce principal del Río Nuevo caracterizando una tormenta de diseño en condiciones estándar y con períodos de retorno de 20, 50, 100 y 500 años, a

través del acoplamiento de los modelos hidrológico e hidráulico. Mismo que incluye la utilización de un análisis regional de frecuencia (ARF) con enfoque en los L-Momentos que, según Wallis y otros (2007), ha demostrado la fiabilidad de las estimaciones de magnitud de ocurrencia de precipitación. Así mismo se pretende identificar los servicios ecosistémicos que prestan los cuerpos de agua urbanos, para ser integrados en los instrumentos de planeación urbana.

Planteamiento del problema

En las regiones semiáridas se presenta una problemática social debido al deficiente manejo de los eventos extremos de precipitación que repercuten en daños a la infraestructura urbana por inundaciones, debido a la falta del uso de instrumentos científicos que permitan incluir la hidrodinámica de las cuencas hidrológicas y los servicios ecosistémicos en los planes de manejo urbano y en los procesos de planeación. Por lo que las zonas urbanas de estas regiones se encuentran en riesgo de sufrir impactos negativos en su infraestructura, economía y calidad de vida por riesgo de eventos de precipitación extremos, así como perder espacios de valor ecosistémico al no identificarlos correctamente. Debido a la cantidad y variedad de elementos a tener en cuenta, a la hora de determinar el impacto ambiental de un emprendimiento concreto, se vuelve indispensable dar a los investigadores un lugar preponderante y facilitar su interacción, con amplia libertad académica. Cabe recordar que los ecosistemas intervienen en el secuestro de dióxido de carbono, en la purificación del agua, en el control de enfermedades y plagas, en la formación del suelo, en la descomposición de residuos y en muchísimos otros servicios que se olvidan o se ignoran (Francisco, 2015). Así mismo al no incluir estudios de hidrología urbana en sus planes de desarrollo desconociendo el comportamiento hidráulico de los cuerpos de agua intraurbanos.

Existe una relación directa entre la urbanización y los cambios en las características hidrológicas de las cuencas urbanas, como la disminución de la infiltración, aumento de la escorrentía, aumento de la frecuencia y altura de las inundaciones a debido a la desaparición de las zonas de amortiguamiento que

modifican la respuesta hidrológica; y el comportamiento hidráulico de los ríos que transitan por la ciudad (Sedano 2012).

Las inundaciones pueden dañar y perturbar la transmisión y distribución de energía; paralizar los sistemas de transporte; contaminar el suministro de agua potable y las instalaciones de tratamiento de aguas residuales; aumentar el arrastre de basura, escombros y contaminantes; y acelerar la propagación de enfermedades transmitidas por el agua (Habitat, U.N., 2011).

Justificación

Los peligros de inundación en zonas áridas y semiáridas son poco entendidos debido a la falta de información acerca de su comportamiento hidrológico e hidráulico, incidiendo en la vulnerabilidad de los proyectos de infraestructura y poniendo en peligro a la población.

A principio de la década de los 70's del pasado siglo, ya se menciona que las investigaciones sobre los recursos hídricos no son tradicionalmente consideradas como componentes del proceso de planeación urbana, en gran parte debido a las divergencias de enfoque entre los hidrólogos y planeadores urbanos. Mientras que los hidrólogos se centran en las ciencias físicas (geología, química, geofísica, hidráulica), los planeadores urbanos se desarrollan más sobre las ciencias sociales o arquitectura del paisaje (Schneider, Rickert, & Spieker, 1973).

Actualmente existen ejemplos en el mundo donde se ha implementado la fusión del enfoque de la ingeniería hidrodinámica, con el de los planeadores urbanos y la sociedad civil, en los instrumentos de planeación urbana, permitiendo obtener mejores resultados en la gestión de riesgo por inundación.

La relevancia de gestionar de mejor forma los riesgos de inundación a través de una correcta planeación urbana en zonas áridas y semiáridas, radica que en ellas habitan alrededor del 20% de la población mundial total y representan aproximadamente el 30% del área mundial (Sivakumar, Das, & Brunini, 2005)

Los beneficios para la ciudadanía y medio ambiente al incluir el análisis del comportamiento hidrodinámico de los cuerpos de agua en los instrumentos de planeación, serán gestionar de mejor forma los riesgos por inundación, bajo diferentes escenarios de tormentas intensas, evaluar los servicios ecosistémicos que los cuerpos de agua prestan a la región, así como poder integrar estos elementos y su interacción urbana en un plan de gestión sustentable, en este caso particular en la cuenca del Río Nuevo, que traerá consigo un beneficio significativo para los habitantes de Mexicali (936,826 habitantes, INEGI. 2010), del Valle Imperial (176,948 habitantes, IC. 2012), del hábitat ripario del Río Nuevo y del Salton Sea al disminuir las posibles afectaciones al medio ambiente y a la salud de sus habitantes. Estas acciones se reflejan en una planeación urbana integral por incorporar los cuerpos de agua, donde se podrán plantear alternativas para diferentes usos de suelo.

Objetivos

Para dotar de herramientas que permitan incluir el análisis de la hidrodinámica de una cuenca de una región semiárida en los instrumentos de planeación urbana, bajo el enfoque de disminuir los riesgos de inundación y pérdida de activos ambientales, para ofrecer un ambiente seguro, sano y con condiciones de prestar servicios ambientales, de integración social y accesible para comunidades locales, se establecen en esta investigación los siguientes objetivos.

Objetivo General

Analizar el manejo de la cuenca del Río Nuevo basado en la hidrodinámica de los cuerpos de agua y su relación con los instrumentos de planeación del desarrollo urbano.

Objetivos particulares

a. Evaluar la relación entre la hidrodinámica del Río Nuevo y los instrumentos de planeación urbana de la ciudad de Mexicali.

b. Estimar los parámetros hidrodinámicos y ambientales del cauce principal del Río Nuevo.

c. Realizar un modelo hidrológico de la subcuenca del Río Nuevo, alimentado por un análisis regional de frecuencias.

d. Caracterizar una tormenta de diseño en la subcuenca transfronteriza en condiciones estándar con diferentes periodos de retorno (20,50, 100 y 500 años).

e. Acoplar el modelo hidrológico con un modelo hidráulico para la evaluación de la hidrodinámica de la subcuenca del Río Nuevo.

f. Determinar las áreas de inundación del cauce principal del Río Nuevo

g. Evaluar los escenarios de precipitación con períodos de retorno de 20, 50, 100 y 500 años.

h. Identificar los servicios ecosistémicos del sistema

Hipótesis

La falta de la incorporación de la herramienta del estudio de la hidrodinámica de los cuerpos de agua intraurbanos, en los instrumentos de planeación en una cuenca hidrológica semiárida, impacta negativamente en la gestión de riesgo por eventos extremos, e impide la correcta planeación urbana por la falta de certeza en las variables hidrológicas y su interacción con el medio urbano, afectando la calidad de vida de la población.

Por el contrario al utilizar la hidrología urbana y el análisis hidrodinámico de la cuenca, como herramientas de planeación en las ciudades, se podrá contar con

instrumentos fiables que permitan disminuir los riesgos de inundación súbita, que se presenta en las zonas áridas y semiáridas del país y del mundo.

Enfoque general de la tesis

La falta de instrumentos que apoyen la evaluación del riesgo de inundación con una importante base científica en regiones semiáridas y áridas para la gestión del riesgo de desastres y la toma de decisiones para los planeadores urbanos, es común sobre todo en países en vías de desarrollo. Por lo que es importante incluir en la planeación urbana, modelos hidrológicos que permitan realizar su análisis solventando la habitual falta de datos en las áreas de estudio, sobre todo en regiones en vías de desarrollo o subdesarrolladas, en este sentido el presente trabajo incluye como herramienta el análisis regional de frecuencia con el enfoque en los L- momentos que solvente la falta de datos de precipitación en el área de estudio.

El acoplamiento de un modelo hidrológico con el modelo hidráulico para la elaboración de mapas de inundación evitara errores procedentes del tratamiento independiente de los mismos, convirtiéndose así en una herramienta de planeación del riesgo por inundación en zonas urbanas de regiones áridas y semiáridas.

Partiendo de este trabajo de investigación, se espera contribuir a la mejora e innovación en el estudio de eventos extremos de precipitación en zonas que presentan bajos niveles de precipitación promedio, que sin embargo representan un importante riesgo al subestimar el volumen de escorrentía superficial que se genera en periodos de tiempos cortos, al utilizar un análisis regional de frecuencia, basado en los L-momentos como base del modelo hidrológico, se aumenta el grado de confiabilidad de las estimaciones de los cuantiles, bajo diferentes periodos de retorno.

Lo anterior se presenta como una opción válida ante la falta de infraestructura en estaciones meteorológicas y la limitada disponibilidad de registros de precipitación en países en vías de desarrollo, como lo es México, que

presenta complicaciones e imponen restricciones en la elección del método más apropiado para su análisis. Por lo que, un enfoque probabilístico como el del análisis regional de frecuencia, se contempla como una opción para estimar la ocurrencia de un evento de precipitación extremo, mismo que será utilizado como dato de entrada de un modelo hidrológico.

La metodología utilizada en este estudio podrá ser replicada en otras regiones del país y del mundo que presentan condiciones similares. Debido a que la principal característica de la precipitación en zonas áridas y semiáridas consiste en tormentas que se intensifican rápidamente, provocando inundaciones repentinas (Pourreza, Samadi, Ali, & Ghahraman., 2016). En este tipo de regiones habita alrededor del 20% de la población total y representan aproximadamente el 30% del área mundial (Sivakumar, Das, & Brunini, 2005), Por lo que el conocimiento de las variables hidrometeorológicas y su relación con el entorno urbano desde un enfoque científico podrá ser empleado con una consecuente reducción de daños por inundaciones, con los ajustes necesarios dependiendo el conocimiento de la información y su interpretación adecuada a cada región particular.

Aportaciones de esta investigación

Las aportaciones de este trabajo, se visualizan desde diferentes ópticas, que incluyen las teóricas, metodológicas y físicas en materia de determinación de áreas de inundación de la cauce principal del Río Nuevo en la ciudad de Mexicali Baja California.

Desde el punto de vista teórico la mayor aportación de este trabajo es la implementación de estudios de la hidrología urbana y la hidrodinámica de la cuenca, como herramienta del proceso de planeación urbana enfocado en la gestión de riesgo. Así mismo el incorporar el concepto de servicios ecosistémicos da profundidad al alcance de la planeación urbana, acercándose más al concepto de sustentabilidad, identificando sitios que prestan servicios que no necesariamente son monetizables y que sin embargo aportan soporte al medio natural, seguridad y bienestar social a la comunidad donde se encuentran.

Metodológicamente este trabajo es el primero con estas características que se realiza en la zona de estudio, acoplado un modelo hidrológico con uno hidráulico, utilizando el ARF con el enfoque en los L-momentos como punto de partida, con lo que se mejora la estimación de ocurrencia de los eventos de precipitación extremo, además de resultar en una excelente herramienta en zonas de estudio que tengan poca infraestructura en estaciones meteorológicas y escasos registro de datos, condición que es aplicable a la mayoría de los países en desarrollo. Por lo que se espera sirva de referencia para análisis posteriores.

El acoplamiento del modelo hidrológico e hidráulico disminuye los errores al manejarse por separado, lo que según el estado del arte es lo más común en los estudios de este tipo.

La metodología propuesta para afinar el CN, mediante un SIG, abstrayendo los diferentes tipo de uso de suelo, dentro de una zona que nominalmente pertenecería a un tipo predominante según los manuales, es una herramienta útil, para utilizarse sobre todo dentro de las zonas urbanas que por su dinámica de crecimiento cambian constantemente, aumentando el grado de error en el cálculo de los escurrimientos.

Por último, desde el punto de vista físico al determinar las zonas de inundación del cauce principal del Río Nuevo en Mexicali Baja California, bajo diferentes periodos de retorno, se provee a los planeadores urbanos, entidades gubernamentales de los tres órdenes y a la población, de información valiosa para la prevención de desastres y el mejoramiento de los procesos de planeación.

Capítulo 2 Marco Teórico

En este capítulo se presenta el fundamento teórico que da sustento a este trabajo, a través de una serie de conceptos relacionados con la planeación urbana y la gestión del riesgo de inundaciones. Está sección parte del entendido que la relación entre dichos términos es multidisciplinaria y que su definición en la mayoría de los casos depende del enfoque temático o del origen disciplinar del que se parta, por ende, en este trabajo se estructuraron estos conceptos en dos grandes bloques divididos en cinco partes.

El primer bloque se divide en dos partes, donde la primera, versa sobre los temas referentes a la planeación urbana, en un contexto histórico acerca de las tendencias que han definido los parámetros a considerar en el ejercicio de la planeación de las ciudades, posteriormente la segunda parte nos acercara a la conceptualización de la gestión del riesgo de inundación y su relación con los instrumentos de gobierno.

En el segundo bloque, a partir de la tercera parte y hasta la quinta, presenta un enfoque temático desde el punto de vista de las ciencias naturales con especial acento en la hidrología urbana y el comportamiento hidrodinámico del río, así como la identificación de los servicios ecosistémicos relacionados con el agua que se presentan en la zona de estudio. En este sentido la tercera parte se enfoca en la relación entre la planeación y la hidrología urbana, a su vez la cuarta parte se centra en la hidrodinámica y por último la quinta sección versara sobre los servicios ecosistemicos, su identificación e importancia.

Planeación Urbana

Durante el siglo XX en la mayoría de los países occidentales, la práctica de la planificación para promover la creación de riqueza y el bienestar de las ciudades, se fundamentó como una actividad propia de la investigación científica. Particularmente la planeación, se presenta como una herramienta útil para el uso racional de los recursos de todo tipo, que orientadas pertinentemente, no suprimen la iniciativa ni la libertad de las organizaciones ni de las personas, sino que incluso pueden expandirlas (Miguel, Torres, & Maldonado, 2011).

Fue a finales de la década de los 50's, debido a un deterioro de las condiciones económicas internacionales, donde por medio de planes de desarrollo se integran las necesidades que tiene la ciudad como espacio y conjunto de relaciones sociales de producción. La planeación del desarrollo va más allá de plantear objetivos para regular las fuerzas del mercado, también incluye la forma de organización social y la estructura política del espacio (ciudad). Garza (1986) define la planeación como la intervención de las instancias políticas del Estado sobre las diferentes instituciones de formación social, económica, ideológica y política, así como sobre las relaciones recíprocas de una con otra, a fin de garantizar la reproducción del sistema, donde lo característico es actuar en el seno de un conjunto socio-espacial específico (Achoy López, 2008).

En el caso de México, la planeación urbana se puede remitir a principios de la tercera década del siglo XX, sin embargo fue hasta los años setentas, que se reconoció la necesidad de institucionalizar la planeación urbana, al promulgar la Ley General de Asentamientos Humanos, reformando el Artículo 27 constitucional y creando la Secretaria de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. Desde entonces a la fecha se han logrado avances importantes, pero aún se está muy lejos de tener el control de la problemática urbana (Secretaria de Desarrollo Social, 2009).

No obstante, el impulso de la planeación urbana en el país se vio interrumpido hacia mediados de los años ochenta cuando el Sistema Nacional de Planeación Democrática y la Ley de Planeación, desplazan la política nacional hacia la temática económica limitando la influencia de los asuntos urbanos, durante los años noventa la cuestión social junto con la económica dominan la política del Estado con el impulso de programas como "Ciudades Medias" y "100 Ciudades" en los cuales la planeación urbana asume un carácter secundario limitado a la regulación del crecimiento de las ciudades desde una perspectiva espacial carente de una visión integral y sin mostrar signos de avance en su concepción (Gutierrez, 2009).

Según la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos: "los municipios, en términos de las leyes federales y estatales relativas, estarán facultados para formular, aprobar y administrar la zonificación y planes de desarrollo urbano municipal; participar en la creación y administración de sus reservas territoriales; controlar y regular la utilización del suelo en sus jurisdicciones territoriales; intervenir en la regularización de la tenencia de la tierra urbana; otorgar licencias y permisos para construcciones y participar en la creación y administración de zonas de reserva ecológica" (Pedroza Villareal, 2014). Sin embargo las capacidades de las administraciones municipales tienden a presentar limitaciones serias acorde a sus responsabilidades. La mayoría de los municipios carecen de personal profesional a cargo de la planificación urbana, gestión de riesgos y otros campos relacionados. (OECD Urban Policy Reviews, 2015). Por lo que impulsar la capacidad institucional para la planificación a nivel municipal y, en algunas áreas, a nivel metropolitano será crítico para resultados urbanos más sostenibles.

Esto nos conduce al estudio de la ciudad por ser ésta el espacio geográficamente definido. Entonces, los programas que se han de llevar a cabo tienen mucho que ver con la relación ciudad-medio ambiente la cual ha sido por muchos años uno de los principales temas de estudio tanto por científicos sociales y de las ciencias naturales, como por las autoridades gubernamentales en todos los niveles del país. Esta relación ha sido la base para definir el rumbo del desarrollo de un país.

Una parte de la problemática urbana actual fue identificada por el conjunto de la comunidad internacional en la Declaración del Milenio del año 2000. El objetivo de desarrollo del milenio propone "garantizar la sostenibilidad del medio ambiente". Sin embargo, no se llegó a abordar la naturaleza urbana de la pobreza, la inclusión social y la sostenibilidad ambiental. Posteriormente, en la conferencia de las naciones unidas sobre el desarrollo urbano sostenible que tuvo lugar en Río de Janeiro en junio de 2012, se recogieron desafíos específicos para las ciudades y los asentamientos humanos sostenibles, y se reconoció la necesidad de aplicar un enfoque holístico del desarrollo urbano, destacando el papel de los gobiernos

regionales y locales, y reconociendo la importancia del desarrollo de enfoques integrados de la planificación urbana y la gestión para fomentar sociedades sostenibles desde los puntos de vista económico, social y ambiental (ONU-HABITAT, 2014).

Sin embargo en la práctica los planeadores y diseñadores urbanos, deben tomar decisiones en respuesta a los calendarios de aprobación y desarrollo, el marco de tiempo exige un tiempo limitado para actuar que se basa en el conocimiento disponible existente y en las mejores prácticas establecidas, generalmente sin la oportunidad de realizar nuevas investigaciones. Este imperativo tiende a favorecer las decisiones basadas en el conocimiento único e inhibir la innovación. La cooperación de conocimiento interdisciplinario es la clave para poder alcanzar esta planeación (Aherna, Cilliers, & Niemeläc, 2014).

En este sentido, La Planeación Urbano-Ambiental (PUA) surge como una disciplina que aspira a consolidar la relación entre la planeación de una ciudad, sus procesos sociales y su medio ambiente. En este enfoque, la variable ambiental es incorporada a la planeación o es mencionada en el contexto urbano dentro de un concepto más consolidado, como Ciudad Sustentable (CS) (Figueroa, 2014).

Gestión de riesgos

En muchas ocasiones se ha confundido el concepto de riesgo con el de desastre, sin embargo, existe una clara explicación para esta diferencia. El riesgo se puede definir de acuerdo a Cardona (1993) como el resultado de relacionar la amenaza (fenómenos naturales o antropogénicos), y la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Es decir, los fenómenos naturales o antropogénicos sumados a la existencia de una comunidad que sea vulnerable tiene como resultado una situación de riesgo.

El concepto de gestión del riesgo según Zilbert (1998) ha evolucionado desde enfoques orientados al control y la reducción del desastre, hasta llegar a una visión sistémica que lo considere parte de un todo integral y armónico, marcado por los conceptos de desarrollo y los avances científicos que ha

experimentado la sociedad, especialmente al finalizar la primera mitad del siglo XX, hechos que han caracterizado tanto la forma como el fondo de los distintos enfoques e ideas relacionadas con el riesgo. La presentación clásica, es la que clasifica los riesgos en función del origen de los fenómenos físicos extremos, la cual distingue esencialmente entre los riesgos de origen natural y los de origen antrópico (Lara San Matín, 2012).

La gestión del riesgo es el conjunto de elementos, medidas y herramientas dirigidas a la intervención de la amenaza o la vulnerabilidad, con el fin de disminuir o mitigar los riesgos existentes. Este concepto plantea la necesidad de que el riesgo se incorpore en la planeación con medidas estructurales y no estructurales, herramientas o instrumentos legales que le permitan a los diferentes niveles de gobierno (municipal, estatal, nacional) reducir el riesgo. La gestión del riesgo centra las acciones que se pueden llevar a cabo tanto en la etapa de prevención y mitigación como en las de respuesta a la emergencia.

Las estrategias e instrumentos deben estar encaminados a establecer medidas de prevención y mitigación y no solo a la construcción de infraestructura que funcione como estrategia para reducir el riesgo, en este sentido se hace evidente la necesidad de información pertinente que permita plantear la mejor estrategia posible.

Relaciones entre planeación y la hidrología urbana

La cuenca de un río, lago o acuífero es, en realidad, el espacio donde aparecen las interdependencias hidrológicas, sociales, económicas y medioambientales, así como donde la gestión y el desarrollo integrado de los recursos hídricos y de los territorios tienen el potencial para producir el mayor éxito.

La hidrología urbana se ha desarrollado para mejorar la gestión de los sistemas de agua urbanos para la salud pública y saneamiento, protección contra inundaciones y más recientemente la protección del medio ambiente. La gestión del escurrimiento urbano requiere, por lo tanto, varias disciplinas; ingeniería, ciencias ambientales, salud pública y de las ciencias sociales. La hidrología

urbana está lejos de ser simple y requiere el desarrollo de nuevas tecnologías que aborden los desafíos técnicos en el contexto urbano y trabajen con las comunidades y respondan a ellas (Fletcher, Andrieu, & Hamel, 2012).

La Sociedad China de Ingeniería Hidráulica (CHES) propuso que el plan de manejo del agua urbana involucrara los campos de control de inundaciones, abastecimiento de agua, ahorro, conservación del suelo y del agua, protección del medio ambiente acuático, mejora ambiental ecológica, control de contaminación, reutilización de aguas residuales y pluviales, turismo y conservación. La gestión moderna del agua urbana se formó, bajo la guía de la teoría del desarrollo sostenible, para los problemas urbanos relacionados con el agua. La gestión urbana del agua es el resultado del proceso de urbanización. El objetivo de la implementación del manejo moderno del recurso hídrico es alcanzar los mayores beneficios económicos y sociales a través del uso razonable de los recursos disponibles (Liu, 2012)

Para incorporar la herramienta del riesgo de inundación en hidrología urbana al proceso de planeación según el informe denominado “Guidelines for Planning Authorities (OPW, 2009.)”. Debería adoptarse un enfoque por etapas, llevando a cabo la evaluación necesaria para la toma de decisiones en el ámbito regional y plan de desarrollo local, así como también en el nivel específico del sitio.

Las etapas de evaluación y valoración son:

Etapa 1. Identificación del riesgo de inundación: para identificar si puede existir algún problema de gestión del agua superficial relacionado con inundaciones. Utilizando las directrices de planificación regional y planes de desarrollo que puedan garantizar una mayor investigación en el lugar de estudio, así como el nivel del orden de aplicación de la planificación;

Etapa 2. Evaluación inicial del riesgo de inundación: confirmar las fuentes de inundación que pueden afectar un área urbana o sitio de desarrollo propuesto, según el plan de desarrollo urbano en estudio, para evaluar la adecuación de la información existente y determinar el alcance del riesgo de inundación que puede

implicar la preparación de mapas indicativos de las zonas de inundación. Donde los modelos hidráulicos muestren el impacto potencial de las inundaciones en la zona de estudio y el alcance de las posibles medidas de mitigación, que puedan ser evaluadas; y

Etapa 3. Evaluación detallada del riesgo de inundación: para evaluar los problemas de riesgo de inundación en suficiente detalle y que proporcionen una evaluación cuantitativa del posible riesgo de inundación para el plan de desarrollo propuesto o existente, así como de su impacto potencial sobre el riesgo de inundación en otros lugares y sobre la efectividad de cualquier medida de mitigación propuesta.

Hidrodinámica

El estado del arte indica que la generación espacial de la esorrentía en las zonas áridas y semiáridas, no es uniforme. Sin embargo los mecanismos de precipitación dominantes son usualmente tormentas de alta intensidad y corta duración (Wang, Zhang, & Baddo, 2016), condiciones que se cumplen en nuestra área de estudio.

Referente a los modelos hidrológicos, desde el desarrollo del método racional por Mulvany (1850), se inició la evolución de los mismos, pasando por modelos simples (concentrados) para eventos, hasta el desarrollo de modelos distribuidos para simulaciones eventuales y continuas (Vargas-Castañeda, Ibañez-Castillo, & Arteaga-Ramírez, 2015). Los modelos usados para predecir etapas y flujos en ríos están bien adoptados en la práctica. La gama actual de métodos de modelado fluvial puede dividirse en tres grupos: 1] El proveniente de las ecuaciones de Saint-Venant incluyendo HEC-RAS; 2] Modelos basados en datos observados donde la mayoría de los parámetros carecen de una interpretación física directa; y 3] Un grupo que se encuentra entre los dos anteriores e incluye modelos conceptuales que emanan de la ecuación de continuidad (Wolfs, Meert, & Willems, 2015).

Para el análisis hidrológico de este estudio se optó por la utilización de un modelo semi-distribuido como lo es el “Hydrologic Modelig System” (HEC-HMS),

mismo que ha sido ampliamente utilizado para evaluar efectos en los hidrogramas ante posibles escenarios de cambio climático, tipo de uso de suelo, diseño y gestión de obras hidráulicas, así como la delimitación de zonas inundables (López, y otros, 2012).

Por otro lado, la simulación hidráulica se realizó mediante el software “River Analysis System”(HEC-RAS), que cuenta con una serie de componentes de análisis unidimensional y bidimensional de flujo en ríos que permite simular el flujo de agua en un modelo 2D, a fin de determinar la llanura de inundación.

Según el estado del arte referente a la modelación hidrológica e hidráulica, la mayoría se realizan de forma independiente, limitando la capacidad de los modelos para pronosticar niveles de inundación debido a errores ocasionados por la manipulación y transferencia de la información (Rodríguez S., González P., Medina N., Pardo C., & Santos R., 2007). Por lo cual este estudio propone un modelo integral a través de la puesta en marcha de un modelo hidrológico, alimentado con los resultados del ARF con el enfoque de los L-Momentos, y su acoplamiento con un modelo hidráulico empleando las herramientas de modelado del HEC-HMS y HEC-RAS.

Servicios ecosistémicos

Actualmente la tendencia de la planeación urbana, es hacer de las ciudades un lugar óptimo para vivir. Una serie de adjetivos quedan asociados a las ciudades del mañana: resiliente, sostenible, eficiente, diversa, inclusiva, etc. Muchos de ellos son inherentes al medio natural, en este sentido aunque los modelos de planificación y desarrollo urbanos comienzan a virar hacia ese escenario, sigue sin relacionarse adecuadamente la ecología de los sistemas naturales y la ciudad. Es decir, no se logra trasladar a la realidad física la interdisciplinariedad de estos estudios urbanísticos y ambientales, es ahí donde reside el interés por facilitar el encuentro entre disciplinas condenadas a entenderse (Perona Alonso, 2017).

Trabajos recientes han comenzado a argumentar que incorporar explícitamente los servicios ecosistémicos en los planes de desarrollo urbano, podrían coadyuvar a la protección ambiental durante el curso del desarrollo

urbano. Al reconocer los valores funcionales para el bienestar humano y social de los ecosistemas urbanos, la identificación de los servicios ecosistémicos podría ayudar a mejorar las decisiones del aprovechamiento del uso de la tierra al reflejar mejor los intercambios entre diferentes escenarios de desarrollo. Sin embargo, la integración de los servicios ecosistémicos en la planificación y toma de decisiones sobre el uso del suelo urbano aún está en sus etapas iniciales (Woodruff & BenDor, 2016).

Investigaciones sobre los servicios ecosistémicos urbanos han articulado la teoría fundamental que aborda las contribuciones reales y potenciales para abordar los desafíos ecológicos. Otras se han enfocado en el rendimiento específico de los servicios del ecosistema a través de la planificación, el diseño y la infraestructura verde. El término infraestructura verde surge como un medio seguro de proveer servicios ecosistemas en entornos urbanos (Aherna, Cilliers, & Niemeläc, 2014).

Tomando en cuenta la creciente degradación ambiental ocasionada por la extracción y uso cada vez más ineficiente de los recursos naturales, internacionalmente se planteó la necesidad del desarrollo de distintos conceptos metodológicos para su incorporación en las nuevas políticas públicas ambientales (Perevochtchikova, 2015), buscando un balance entre los objetivos del progreso económico de los países y el funcionamiento físico de la naturaleza en particular con el ciclo de la regeneración natural de los ecosistemas que producen diferentes servicios ambientales a la humanidad (Andrade, 2004).

Estos planteamientos teóricos incluirían el desarrollo de nuevas relaciones entre los diferentes componentes (físicos, sociales y económicos) involucrados en la problemática ambiental así como los aportes del desarrollo científico y tecnológico para transformar la ideología existente de consumo de recursos naturales hacia un enfoque ecosistémico, integral e interdisciplinario. Este concepto metodológico aplicado a la GIRH se consolidó a nivel mundial a principios de la década de los 90's a través de la suscripción de varios acuerdos

internacionales. Bajo esta perspectiva, se considera al agua como el nexo fundamental entre el desarrollo humano y la naturaleza (Perevochtchikova, 2015).

Área de estudio

La cuenca del Río Nuevo, trasvasa la ciudad de Mexicali, Baja California, desde su origen al sur de la misma, hasta su desembocadura en el mar de Salton (Salton Sea) en California, EEUU, aproximadamente 120 km (CALEPA, 2014).

El Valle de Mexicali tiene una superficie de 181,318 ha, con una red de canales de 2,902 kilómetros, y de drenes con longitud de 1,687 kilómetros. En la parte urbana de Mexicali, que ocupa un área de 14,890 ha, mientras la red de drenes principales, tiene una longitud de 152.32 km. (COCEF, 2000)

Medio Físico

Localización del área de estudio

El Río Nuevo es un componente intraurbano ubicado en la ciudad de Mexicali Baja California al noroeste de México, que conduce además de escurrimientos superficiales derivados de eventos locales por precipitación, aguas residuales de origen agrícola, aguas provenientes de procesos industriales, y aguas negras. Se encuentra en la cuenca transfronteriza del Salton Sea ubicada en la región semiárida del delta del Río Colorado, colindante con la frontera entre los Estados de Baja California, México y California en los Estados Unidos, constituida por la participación de distintos núcleos urbanos. Al norte colinda con el condado de Imperial en el Estado de California, Estados Unidos; y al sur con la ciudad de Mexicali en el Estado de Baja California, México (Figura 1).

Se estima que entre el 10 y 15% del caudal de entrada del Salton Sea se origina en México, y fluye hacia el norte a través del Río Nuevo (San Diego State University, 2015)

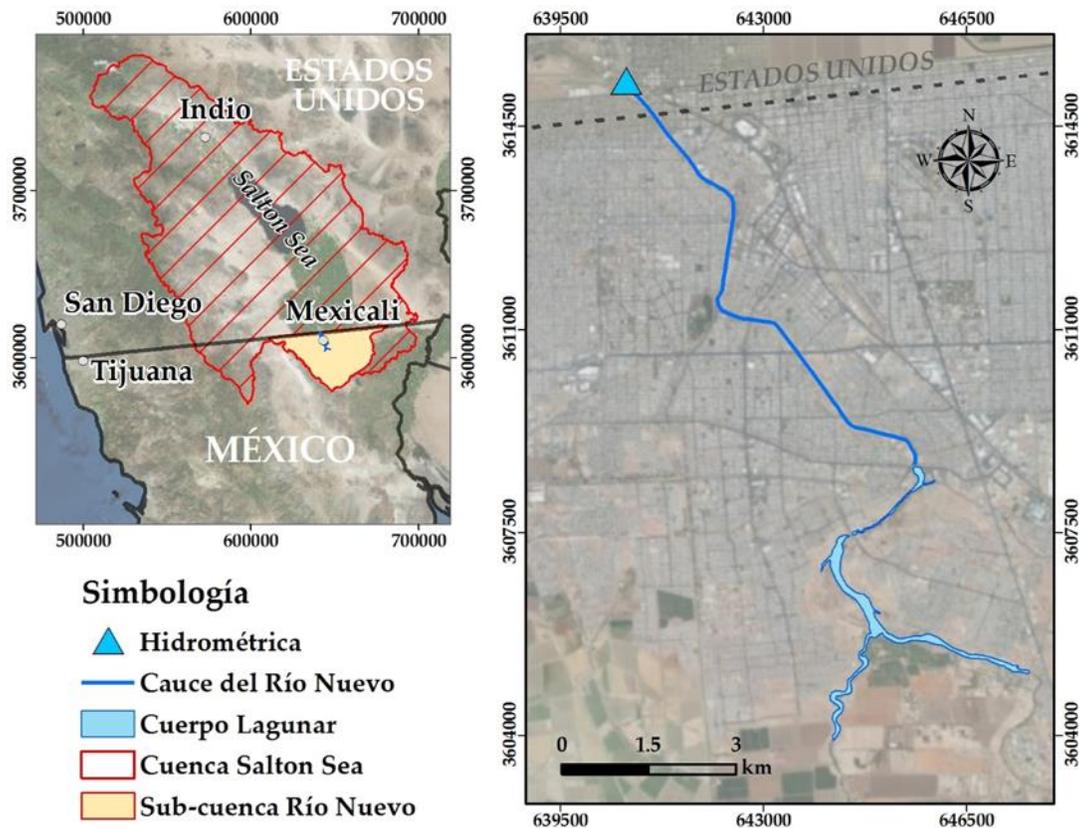


Figura 1. Localización del área de estudio

Cabe mencionar que esta cuenca pertenece al Delta del Río Colorado, que actualmente abastece a más de 30 millones de personas en Estados Unidos y México (Rodríguez-Burgueño, Shanafield, & Ramírez-Hernández, 2017). El Río Colorado suministra agua a los Estados de Arizona, California, Colorado, Nuevo México, Nevada, Utah y Wyoming en Estados Unidos, y a los Estados de Baja California y Sonora en México, suministrando agua para regar casi 22,257 km² de campos agrícolas y más de 4,200 Mega Watts de generación eléctrica (U.S Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2012).

La superficie de la sub-cuenca del Río Nuevo que trasvasa en la frontera de ambos países es de 2,066.69 km² y cuenta con una pendiente media de 9.61%. La longitud de su cauce principal es de 47,270 m y su pendiente es de 3.063% (SIATL, 2017). Cabe mencionar que este estudio considera la sección del Río

Nuevo con una longitud de 14.17 km, ubicada geográficamente en la coordenadas UTM-WGS84-Z11N a los 3´608,660.30 m norte y 645,613.80 m oeste.

Clima

En el municipio de Mexicali predominan los climas de tipo muy secos, son climas extremosos, con temperaturas máximas, principalmente durante los meses de julio y agosto donde la evaporación excede en gran medida a la precipitación. Este tipo de clima se subdivide en dos subtipos el semicálido y el templado. A continuación se detallan los principales subtipos que caracterizan al municipio.

Muy seco muy cálido y cálido (lluvia de verano): Las lluvias en estos climas son en verano, aunque también se presentan en invierno mínimamente. La precipitación total anual se encuentra alrededor de 40 a 60 mm. Septiembre es el mes en el que se registra mayor precipitación, mientras que los meses más secos son mayo y junio. Las temperaturas medias más altas se presentan en julio y agosto apenas menores a 32 °C y la mínima mensual se presenta en enero y oscila entre 11 y 14 °C (CEA, 2008).

Muy seco semicálido (lluvias de invierno): Este tipo de clima se distribuye a lo largo de la parte este del municipio de Mexicali. Es el más cálido de los climas muy secos, con lluvia invernal en la entidad. El mes de mayor precipitación es diciembre con un promedio mensual de 25 a 30 mm, siendo los meses más secos mayo, junio y julio, con promedio de precipitaciones en orden de décimas de milímetro. En cuanto a las temperaturas, registra una temperatura media anual entre los 18 y 22 °C, las medias mensuales más elevadas se presentan en los meses de julio y agosto, superiores a los 25 °C, mientras que el mes más frío es enero, con una media mensual apenas mayor a los 13 °C (CEA, 2008).

Muy Seco Templado (lluvia en invierno): Estos climas se distribuyen en la porción oriental de la sierra de Juárez y noreste de la sierra de San Pedro Mártir, donde las elevaciones sobre el nivel del mar oscilan entre 600 y 1300 m, en las porciones de mayor elevación de las sierras que bordean al Golfo de California. La temperatura en las porciones montañosas y las mesetas son más extremosas, en los meses de julio y agosto se tienen la máxima media mensual de 25 a 26 °C y la

mínima de 6 a 7 °C en enero. La precipitación más alta se da en los meses de diciembre y enero, con medias de 15 a 20 mm en zonas de mayor elevación. Las mínimas se registran en los meses de mayo, junio y julio con medias de 1 mm (CEA, 2008).

Geología

La Sub-Cuenca del RN (figura 2) se encuentra sobre diferentes tipos de roca a continuación se describen cada una de ellas:

En mayor área se encuentra un suelo con leyenda No Aplicable (N/A) que corresponde a una clasificación de Suelo; dicha leyenda indica que este atributo no es válido, cuando el valor del atributo Era tiene el valor precámbrico o paleozoico.

Las areniscas son rocas sedimentarias detríticas formadas en ambientes marinos, fluviales o de origen eólico. Con textura clástica y de grano normalmente fino, de un diámetro inferior a los 2 milímetros, formados por fragmentos de roca o minerales, básicamente cuarzo, calcita, micas o feldspatos, que pueden estar acompañados por otros, como la magnetita. El cemento puede ser calcáreo, silíceo, de óxido de hierro, arcilloso o dolomítico. Su color es variable y puede contener fósiles. Presenta matriz bien estratificada, incluso marcas de oleaje o de las dunas fosilizadas en ella.

Complejo Metamórfico: Ocurre en grandes extensiones de la corteza terrestre, generalmente se relaciona con eventos tectónicos a gran escala, los procesos que intervienen son: presión y acción de los fluidos circundantes, dando como resultado la recristalización, neo-mineralización y orientación de minerales en fábrica paralela, conocida de foliación.

Conglomerado: Roca de grano grueso mayores a los 2mm a más de 250mm (gravilla 2-4 m, mata-tena 4-6mm, guijarro 64-256mm y peñasco >256mm); de formas esféricas a poco esféricas y de grado de redondez anguloso a bien redondeados, por la presencia de arcillas (matriz y/o cementante) se diferencian los siguientes tipos de conglomerados: orto-conglomerados (matriz<15%) y para-conglomerados (matriz >15%).

Mármol: Roca formada a partir del metamorfismo de calizas o dolomías: compuesto esencialmente por calcita, que recristaliza en bajo condiciones de termo-metamorfismo, en algunos hay presencia de minerales accesorios como: clorita, granate, mica y wollastonita. La coloración que presentan algunos se debe a la presencia de impurezas.

Las rocas **ígneas extrusivas**, o volcánicas, se forman cuando el magma fluye hacia la superficie de la Tierra y hace erupción o fluye sobre la superficie de la Tierra en forma de lava; y luego se enfría y forma las rocas. La lava que hace erupción hacia la superficie de la tierra puede provenir de diferentes niveles del manto superior de la tierra, entre 50 a 150 kilómetros por debajo de la superficie de la tierra.

Cuando la lava hace erupción sobre la superficie de la Tierra, se enfría rápidamente. Si la lava se enfría en menos de un día o dos, los elementos que unen a los minerales no disponen de mucho tiempo. En su lugar, los elementos son congelados dentro del cristal volcánico. Con frecuencia, la lava se enfría después de unos cuantos días o semanas, y los minerales disponen de suficiente tiempo para formarse, pero no de tiempo para crecer y convertirse en grandes pedazos de cristal.

Forman parte de las rocas andesíticas o de composición intermedia. Son las rocas comprendidas entre las rocas félsicas y máficas, sus colores son intermedios entre claros y oscuros.

Acidas: Término químico usado comúnmente para definir las rocas que contienen más del 65% de S_iO_2 .

Intermedias: Término químico comúnmente usado para aquellas rocas que contienen más de 52% y menos de 65% de S_iO_2 .

Básicas: Término químico usado comúnmente para definir las rocas que contienen entre 45% y 52% de S_iO_2 .

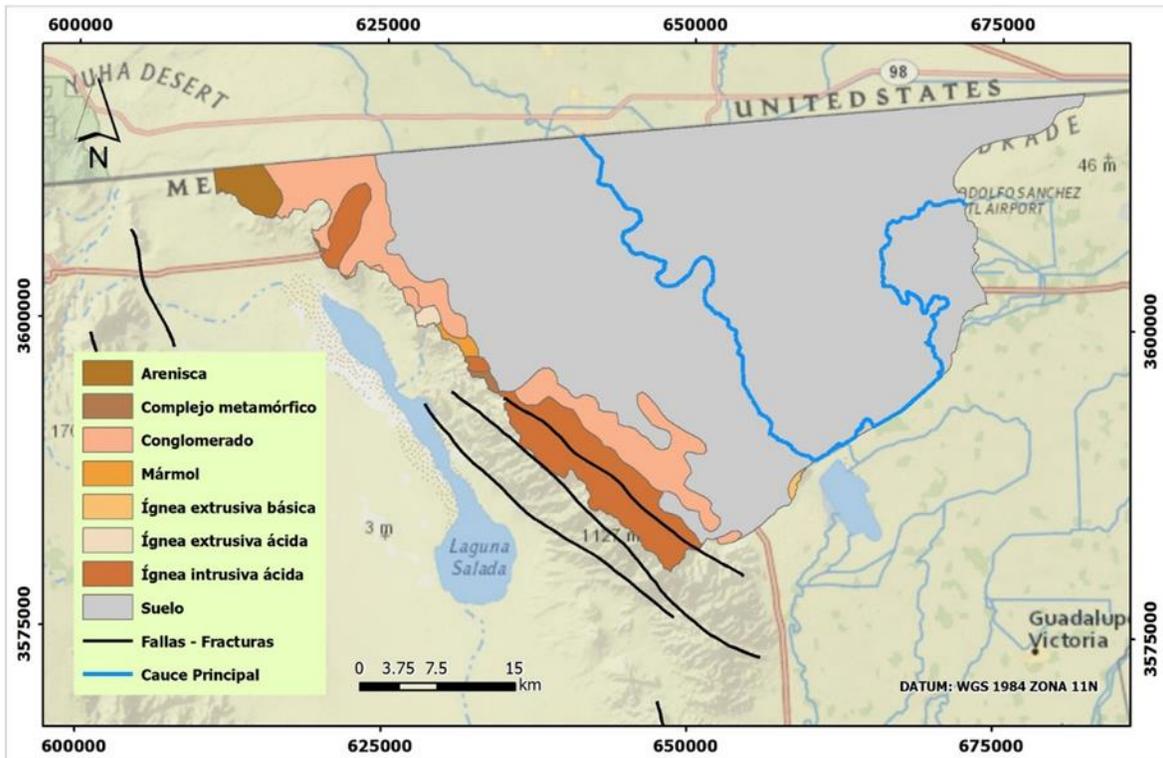


Figura 2. Geología de la zona de estudio

Edafología y Orografía

El suelo está compuesto por finas partículas minerales y una flora y fauna microbiana, que actúa transformando la materia mineral en alimento de plantas. Desde luego son muchas las causas y condiciones que determinan la existencia de los tipos de suelo que pueden encontrarse en un lugar, el clima la topografía, la roca que le da origen (conocida como roca madre), ya que la composición de esta define el contenido y variedad de minerales de cada tipo de suelo.

El área de estudio, Cuenca del Río Nuevo (Figura 3) se encuentra sobre el tipo de suelo:

Arenosol (Q): Son depósitos no consolidados de arena, hallados con frecuencia en médanos y también en áreas de material parental texturado muy grueso, sujeto a millones de años de meteorización. La vegetación que presentan es variable, se caracteriza por ser de textura gruesa, con más del 65% de arena al

menos en el primer metro de profundidad, estos suelos tienen una alta permeabilidad pero muy baja capacidad para retener agua y almacenar nutrientes.

Cambisol (B): Suelos con subsuelo estructurado, donde las características de las rocas que los originan han desaparecido casi por completo, o suelos con capa superficial obscura mayor de 25 cm de espesor, con buen contenido de materia orgánica, pero pobre en nutrientes o bases (Ca, Mg, K, Na). Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca sub-yacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso, son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión.

Leptosol(I): Son suelos minerales de zonas con clima suficientemente templado para que la temperatura media anual supere los 0°C. Están limitados por una roca continua y dura en los primeros 25 cm, o por un material con más del 40 % de equivalente en carbonato cálcico, o contienen menos del 10 % de tierra fina hasta una profundidad mínima de 75 cm. Solo pueden presentar un horizonte de tipo Mólico, Úmbrico, Ócrico, Yérmico o Vértico.

Regosol(R): Se caracterizan por no presentar capas distintas. En general son de tono claro. Se encuentran en las playas, dunas y, en mayor o menor grado, en las laderas de las sierras, muchas veces acompañados de litosoles y de roca o tepetate que aflora. Frecuentemente son someros, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad.

Solonchak(Z): Suelos que tienen una alta concentración de “sales solubles”, en cualquier época del año. Los Solonchaks son en gran parte confinados a zonas climáticas áridas, semi-áridas y a regiones costeras bajo todo tipo de climas. Tienen alto contenido en todo o alguna parte del suelo, la vegetación típica para este tipo de suelos es el pastizal u otras plantas que toleran el exceso de sal (halófilas).

Vertisol: Suelos muy arcillosos, con grietas anchas y profundas cuando están secos; si se encuentran húmedos son pegajosos; su drenaje es deficiente. La vegetación va desde selvas bajas a pastizales y matorrales, su color común es

el negro o gris, en algunas zonas de México son de color cado rojizo. Su uso agrícola es muy extenso, variado y productivo. Tiene baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo a la salinización.

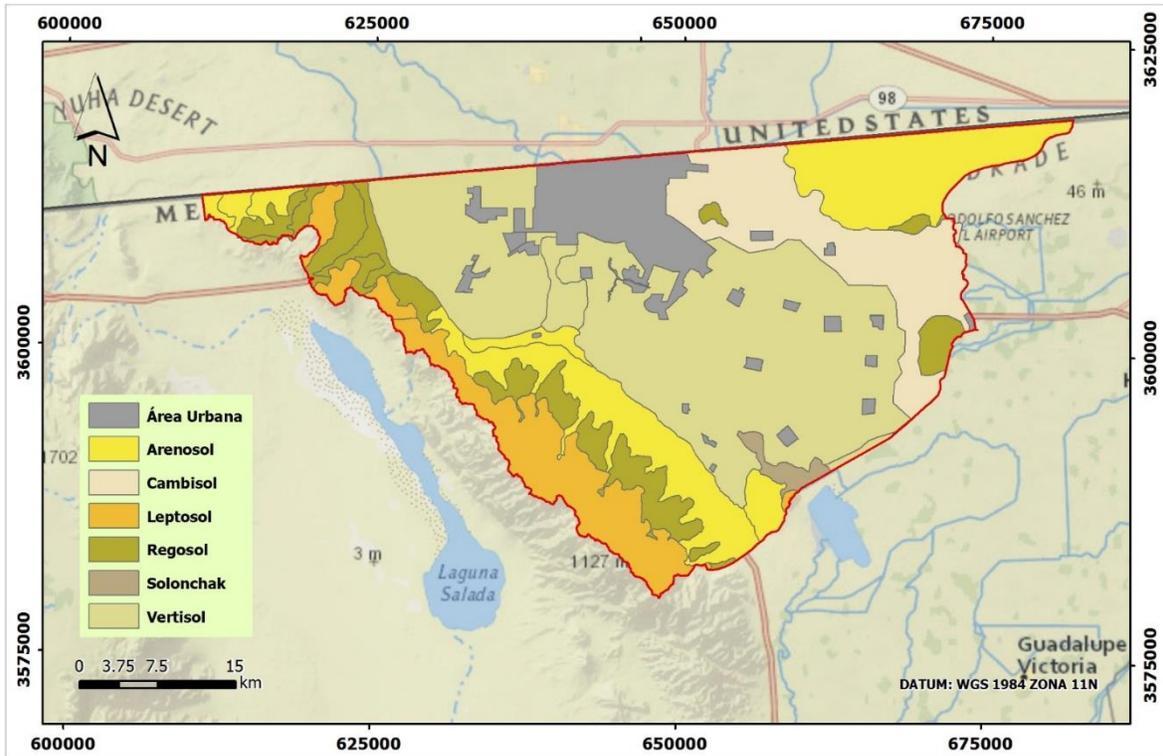


Figura 3. Edafología de la sub cuenca del Río Nuevo

Uso de Suelo

En el área correspondiente a la cuenca de influencia (Figura 4) se clasifican seis usos de suelo entre ellos se encuentran:

La agricultura de riego con un 46.68% de total de la cuenca, en segundo lugar se encuentra el matorral desértico microfilo con 37.27%, en tercero se encuentra el área urbana con un 15.24%, y enseguida el área sin vegetación, vegetación de desiertos arenosos y cuerpo de agua perenne interior con 0.48%, 0.31% y 0.02%, respectivamente. Es importante mencionar que el área urbana fue actualizada con apoyo de Sistemas de Información Geográfica, ArcGIS ©, de la base de datos proporcionada por INEGI, ya que la mancha urbana se ve incrementada.

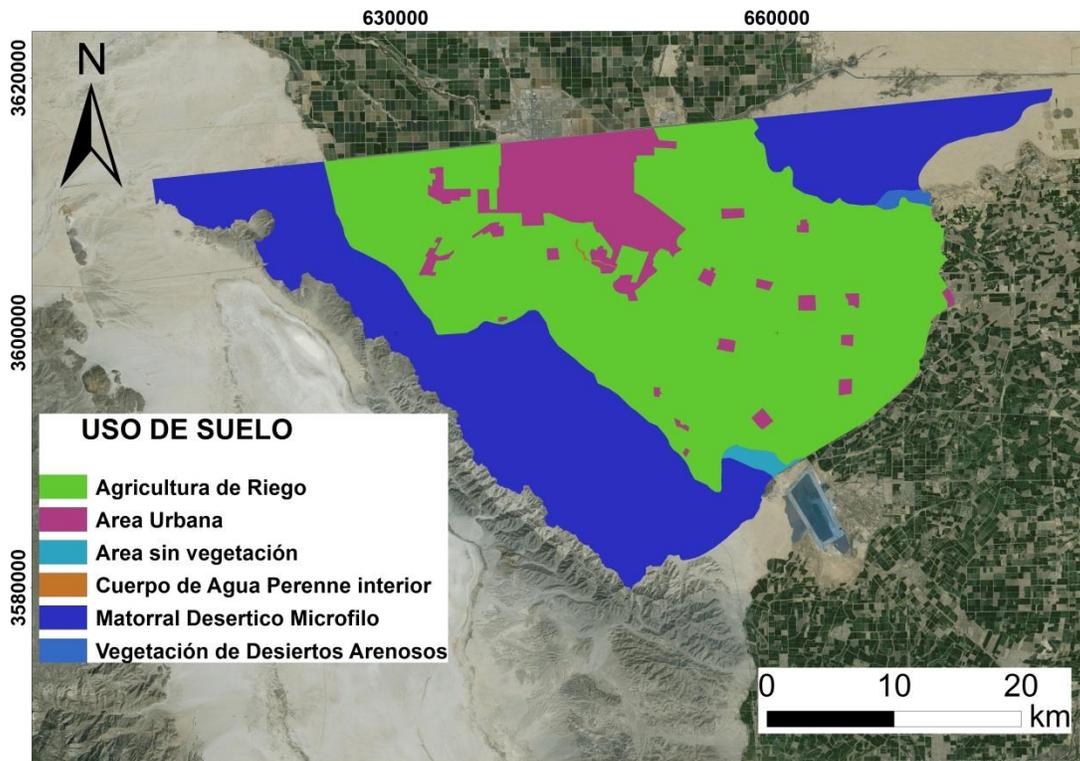


Figura 4. Tipo de uso de suelo en la zona de estudio

En el caso del condado de Imperial en el Estado de California, Estados Unidos, a partir del año de 1958 hasta el 2006 se habían declarado cuatro estados de emergencias debido a inundaciones, presentando severos daños en la infraestructura hidráulica, agrícola y carretera (Imperial County, 2007). La situación en Mexicali es distinta ya que la zona con mayor riesgo de inundación se presenta en su núcleo urbano, principalmente en el Río Nuevo, donde se ha desarrollado infraestructura educativa, comercial, de gobierno, y asentamientos humanos.

La situación en la ciudad de Mexicali es distinta, a diferencia del Condado de Imperial, la zona con mayor riesgo de inundación se presentan en el núcleo urbano ya que el Río Nuevo es un río intraurbano donde se ha desarrollado infraestructura educativa, deportiva, recreacional, comercial y de gobierno, y asentamientos humanos.

Aspectos Ambientales

De acuerdo a estudios de la Comisión Estatal del Agua (CEA, 2008), el Río Nuevo tiene un gasto de 7.6 m³/s, el cual proviene en su mayoría de agua de drenaje agrícola y agua tratada del municipio de Mexicali. Este cuerpo de agua históricamente ha presentado serios problemas de contaminación (Phillips. Bryn M, 2007). Asimismo, ha sido señalado que los cuerpos de agua transfronterizos que no cumplen con las normas de calidad del agua son comunes en la región fronteriza, de acuerdo a la sección 303(d) de la lista de los “cuerpos de agua fuera de norma” de la “U.S. Clean Water Act”. (COCEF, 2012).

En 2011, estudios de la red de Monitoreo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) determinaron que el Río Nuevo presenta altos niveles de contaminación por demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), causado por las sales y agroquímicos provenientes del distrito de riego a los que se le mezcla agua contaminadas por residuos industriales y domésticos de la zona urbana (Ayuntamiento de Mexicali, 2011).

Aspectos Históricos

Históricamente los orígenes de Mexicali se relacionan con las grandes concesiones de terrenos en el Valle, otorgadas durante el Porfiriato a estadounidenses o a mexicanos estrechamente vinculados con éstos (Piñera, 2011), estas concesiones se derivaron de una intensa migración a California, propiciada por la fiebre del oro en el último tercio del siglo XIX, propiciando el descubrimiento del potencial agrícola del valle Imperial, donde además se presentaba la posibilidad de conducir las aguas del río Colorado a través del territorio mexicano, aprovechando las pendientes naturales del terreno.

Este proyecto permitiría irrigar el valle Imperial y el valle de Mexicali (Ley y Calderón, 2008). A partir de esta actividad surgieron poblaciones como Brawley, Hotville, Heber y Caléxico. Junto a ésta, el inversionista Anthony Heber compró un predio para iniciar el trazo de un poblado en territorio mexicano que después fue Mexicali (Piñera, 2011). En estos proyectos participaron tres empresas

estadounidenses. La California Development, a través de su filial mexicana (Sociedad de Irrigación y Terrenos de la Baja California), que se encargó de las obras de irrigación, donde su negocio principal fue la venta de agua para los cultivos. La Colorado River Land Company, como propietaria de la tierra agrícola, que rentaba las parcelas y la Southern Pacific Company, encargada de la construcción del ferrocarril “Inter California”, que brindó la posibilidad del movimiento de insumos y productos entre Mexicali y el territorio estadounidense (Kerig 2001).

La penetración estadounidense revistió distintos matices en el país, ya fuera en los campos de la minería, los ferrocarriles o la ganadería, y en Baja California se hizo evidente en materia de urbanización, pues el surgimiento de sus ciudades está estrechamente vinculado con la expansión del suroeste estadounidense (Piñera, 2011). En un primer intento de ordenamiento del espacio urbano, basado en la idea de generar dos poblaciones simultáneas, como núcleo de las inversiones estadounidenses en ambos valles, el ingeniero Charles Robinson Rockwood realizó el trazo de Mexicali conectado al de Calexico (Bernal, 2002).

En los primeros años, la localidad de Mexicali estaba constituida principalmente por viviendas de adobe, asentadas a un costado del Río Nuevo en aquel tiempo, era un pequeño arroyo con recorrido hacia el norte, que desaguaba ocasionalmente en la laguna Los Volcanes, para conducir las aguas al Mar de Salton). Según los registros existentes principios del siglo XX mencionaban que no se había registrado más de una creciente invernal. Sin embargo en el transcurso de 1905 hubo cinco avenidas torrenciales inesperadas. La última ocasionó que el río Colorado dejara de fluir al Mar de Cortés y corriera en dirección opuesta a su curso normal, siguiendo el cauce de El Álamo hacia la depresión de Salton (Ibidem), inundando ambos valles. El río Nuevo se transformó en un barranco profundo, debido a la acción del agua en su escorrentía hacia la depresión del mar de Salton en California. Entre los destrozos hubo ranchos inundados y pérdida total de las cosechas en el valle Imperial, mientras que una gran parte del pueblo de Mexicali y la línea férrea fueron arrasados (Ley y Calderón, 2008).

La cuenca hidrológica del Mar de Salton

El Mar Salton (Salton Sea), se formó en el año de 1905 cuando el Río Colorado se desbordó e inundó el sumidero de Salton, que en ese entonces era un sitio árido. En realidad, el lago que existe actualmente es el cuerpo de agua remanente de una sucesión de lagos y mares que han ocupado esta depresión geológica. En épocas distantes, este sumidero formaba parte del Golfo de California. Al irse formando el Gran Cañón del Colorado, el Río y sus tributarios depositaron una gran cantidad de sedimentos en la boca del río. A través del tiempo, estos depósitos se acumularon hasta el punto de dividir el sumidero de Salton del Golfo de California. Hoy en día, esta división se encuentra cerca de la ciudad de Yuma, Arizona (DWR, 2012).

Después de que se formó esta división, el Río Colorado periódicamente alternaba su flujo entre el sumidero de Salton y el Golfo de California. El cauce del río serpenteaba entre los sedimentos deltaicos, y en épocas de inundación creaban tributarios nuevos al norte de la división de sedimentos. El Lago Cahuilla, un cuerpo de agua prehistórico, se creó a partir de estos nuevos tributarios que desembocaban dentro del sumidero de Salton. Este lago prehistórico, que ocupó territorios desde México hasta el Valle de Coachella, eventualmente desapareció por la evaporación, cuando el flujo del Río Colorado se devolvió al Golfo de California. El Lago Cahuilla ocupó el sumidero de Salton varias veces, con su nivel más alto en los años 1500 (Ibidem).

Inundaciones continuaron llenando el sumidero de Salton hasta los años 1800; sin embargo, en tiempos recientes los proyectos de desarrollo y de control de agua de la cuenca del Río Colorado previenen que el río vuelva a desembocar al sumidero. Hoy en día, las aguas del lago provienen mayormente de la escorrentía superficial de la agricultura en los valles de Imperial y Coachella. Estas tierras agrícolas son irrigadas con agua que proviene del Río Colorado y que es trasladada por los canales de Coachella y Todo Americano (Ibidem).

La agricultura es el uso predominante de las tierras en el área que rodea al Mar Salton. La tierra que constituye el fondo del lago es propiedad del gobierno

federal de los EUA. Por una orden del gobierno federal, estas tierras tienen la función de servir como un repositorio de drenaje de la escorrentía agrícola.

El Río Nuevo y Mexicali

Actualmente el Río Nuevo sigue siendo la principal vía de escurrimiento hacia el norte del municipio que divide con esta discontinuidad natural a la ciudad de Mexicali en dos. La subcuenca del Río Nuevo tiene una superficie de 298 Km², y el caudal del río es alimentado por las aguas de retorno agrícola, residuales domésticas e industriales de la ciudad de Mexicali. La ciudad de Mexicali presenta una topografía aparentemente plana, lo cual permitió que la traza de la ciudad se dispusiera de acuerdo con un patrón reticular; que se haya visto interrumpido desde su fundación por la presencia del Río Nuevo (PDU Mexicali 2015-2050).

Las condiciones de contaminación ambiental y riesgo para la salud que presenta actualmente el Río Nuevo, generan una problemática binacional, que han llevado a los gobiernos de México y Estados Unidos, a implementar una serie de proyectos encaminados a mejorar la calidad del agua del Río, sin embargo, hay riesgos y situaciones que persisten, como las descargas de agua no tratadas, depósitos clandestinos, aguas residuales de origen industrial, y desechos urbanos. Lo que hace evidente que los problemas relacionados con la calidad del agua no pueden ser abordados únicamente con el incremento de infraestructura para el tratamiento de aguas residuales (COCEF 2012).

Aspectos Socioeconómicos

Población

Según los datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEGI), referidos en el Censo de Población y Vivienda del año 2010, la población total en el municipio de Mexicali era de 936,826 habitantes, representando el 29.7% de la población total del Estado de Baja California. Mexicali es considerada como una Zona Metropolitana y la segunda más aglomerada en Baja California, la mancha urbana de la ciudad cuenta con un total de con 751,317 habitantes y una extensión territorial de 113.7 km², obteniendo una densidad de 6,607 hab/km² (Calderón 2016).

Estructura económica

Según Velandia (2014) históricamente la ciudad de Mexicali se ha ido consolidando en un proceso de transición económica a partir del modo de producción agrícola, al modo de producción industrial y de ensamblaje hasta convertirse hoy en una ciudad de incipiente producción de tecnología tendiente a la provisión de servicios especializados del comercio y del transporte. Por esto último, la malla vial de Mexicali se caracteriza por ser un punto de paso de todo el comercio carretero proveniente del interior de México hacia la zona costa de California y Baja California (Calderón 2016).

De manera general, la expansión de la población en ambos lados de la frontera, el crecimiento de la industria maquiladora y el mayor intercambio de mercancías entre México y Estados Unidos, han transformado la imagen de las ciudades que conforman los espacios transfronterizos.

Eventos de Inundaciones en el Río Nuevo.

En los inicios de la ciudad, se elaboró el primer plano, pretendiendo que la ciudad creciera ordenada, donde además de las calles trazadas, se destinó un área de 18 hectáreas como equipamiento urbano, paralelo a la línea fronteriza.

Una vez realizado el primer plano de desarrollo de la ciudad y el trazado de las calles, Mexicali sufrió una fuerte inundación, de junio de 1905 a febrero de 1907. Las aguas destruyeron las calles y arrasaron la vía férrea, la estación y casi la totalidad de las casas de la ciudad.

Además de las construcciones, el agua arrastró una gran porción de tierra, desapareciendo las calles Del Río e Internacional, Zaragoza y otras, desplazando el cauce del río Nuevo de oeste a este más de medio kilómetro (Figura 5 y 6), (Griffin, 2011).

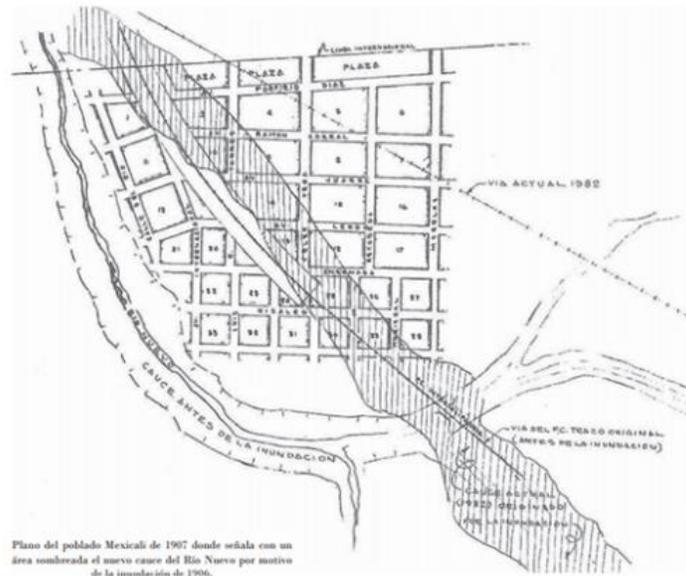


Figura 5 “inundación de 1906”.



Figura 6 “Lecho del Río Nuevo después de la inundación 1907”

Historicamente los eventos hidrometeorológicos más intensos registrados en el municipio de Mexicali y sus cercanías, han sido producto de fenómenos tropicales debilitados y sucedieron en los meses de septiembre de 1967 (Huracán Katrina) con 204 mm (en Santa Clara); en agosto de 1972 (Tormenta Tropical Hyacinth) con 35.3 mm en San Luis Río Colorado; en octubre de 1972 (Tormenta Tropical Joanne) con 262.2 mm (en San Felipe); en septiembre de 1976 (Huracán

Kathleen) con 72.5 mm (en Delta); en agosto de 1977 (Huracán Doreen) con 154 mm (en Presa Morelos); en septiembre de 1997 (Huracán Nora) con 69.9 mm (en la ciudad de Mexicali); en octubre de 2001 (Huracán Juliette) con 261 mm (en San Felipe); y en septiembre de 2003 (Huracán Marty) con 132 mm (en San Felipe). Otro evento de lluvia inusualmente alta en el mes de octubre de 1992, con 73.8 mm (en la ciudad de Mexicali), no fue relacionada con un sistema tropical (Ayuntamiento de Mexicali, 2009).

Referente a fuentes hemerograficas, podemos encontrar diversos medios que reportaron inundaciones y sus afectaciones en años recientes como lo son:

UNOTV Noticias, en agosto de 2014, reportó apagones y granizo en diferentes zonas de la ciudad, así como inundaciones en el distribuidor vial, ubicado en Lázaro Cárdenas y López Mateos, en el paso a desnivel de Lázaro Cárdenas y Benito Juárez, el bulevar Río Nuevo fue intransitable, debido a la inundación generada por las fuertes lluvias (figura 8).

El Periódico "El vigía" de Diciembre de 2015. Donde hace referencia a las afectaciones sufridas por las lluvias de los años 1976, 1978, y 1980, en el estado de Baja California (Figura 7). En el periódico la Crónica, referente al mismo evento, se refiere que el Río Nuevo vuelve a ser la vialidad más afectada por las intensas lluvias, donde las colonias aledañas a dicha zona, se inundaron por completo.

Los mas afectados fueron residentes de la colonia El Vidrio y Agua leguas, que tuvieron que abandonar sus Ligeros deslaves se registraron en algunos cerros de dicha zona, pero no hubo personas lesionadas, de acuerdo a lo establecido por las autoridades.

El periódico el Debate en el año 2017, titula una de sus notas como "Tromba inunda las calles de Mexicali". Donde se refiere que por espacio de una hora se registraron fuertes lluvias en la ciudad que provocaron diversas afectaciones e inundaciones en distintos puntos de la capital del Estado (figura 9).

Tiene Baja California historial de desastres

A través de una exposición fotográfica expertos y funcionarios recordaron las severas afectaciones que causaron las lluvias en 1976, 1978 y 1980 en los cinco municipios de la entidad

Bernardo Pacheco/EL VIGIA
bpacheco@elvigia.com

Las temporadas de lluvias más intensas han dejado destrucciones en infraestructura y han logrado que se declare zona de desastre a Baja California, según un resumo fotográfico presentado por funcionarios de la Coordinación Estatal de Protección Civil.

Lo anterior conforme a la exposición "Algunas evidencias fotográficas de eventos olvidados", presentada por el coordinador Antonio Rosquillas Navarro, con motivo del Foro sobre la difusión del Riesgo y Medidas Preventivas ante el Fenómeno del Niño, organizado por la Asociación de Oceanólogos de México (Asococan).

El funcionario estatal expuso al público material fotográfico tomado durante los años 1976, 1978 y 1980, en las ciudades de Tijuana, Mexicali, Tecate y Ensenada.

Las imágenes refieren inundaciones y destrucción de puentes, así como caminos bloqueados por toneladas de roca, en lugares como La Ramonosa, sitio al que logró impactar el Huracán Kathleen al



La imagen muestra la inundación en el Valle de Guadalupe en 1978.

cruzar por la península y moverse a California como una tormenta tropical.

Rosquillas Navarro refirió imágenes de un inundado Valle de Guadalupe en 1978, al grado que el presidente de ese entonces, José López Portillo Tostado, tuvo que declarar zona de desastre.

En la nota de prensa regional de la época, el pie de fotografía refirió los daños en la delegación de Francisco Zarco: "Tres banquetes profundos del Río Guadalupe fueron los que arrastraron este poblado, el cual fue construido como puede apreciarse, en el cauce natural del agua".

Comentó que en 1980 reubicaron a personas de zonas de riesgo, pero con el paso de los años se volvieron a instalar.

Ese mismo año, en febrero, en la

delegación de Tecate los residentes tuvieron que utilizar un sistema de tiras para que la localidad quedó dividida, según los testimonios gráficos.

En el caso de Tijuana, el nivel del agua llegó hasta la cortina de la presa "Abelardo L. Rodríguez", además de que se inundaron mil 400 casas.

Rosquillas Navarro también recordó que el poblado de San Quintín quedó sepultado "bajo piedra y lodo" en febrero de 1980, aunque destacó que los preparativos para del Niño han logrado "una buena acción" porque "obligó al gobierno a limpiar los pluviales".

Agregó que el peligro mayor para la población implica el arrastre de personas y vehículos, por lo que

enfatizó en que debe evitarse cualquier tipo de arroyo, y que uno de los principales mitos es saber la fecha exacta en la que comenzará a llover.

"Primero, no se puede decir con certeza que tendremos lluvias fuertes o abundantes. Y por otro lado, no se tiene una fecha específica de cuándo podríamos recibir las primeras lluvias de consideración en el estado.

"Las lluvias se darán cuando haya las condiciones atmosféricas apropiadas", concluyó.

En el foro también participaron José Antonio Martínez Alcalá, de Oceanografía Física de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y Luis Humberto Mendoza Garcilazo, de Ciencias de la Tierra del Cicese. Y

Figura 7. Reporte de daños en infraestructura por lluvias históricas en Baja California.



Figura 8 Inundación en el Río Nuevo en 2014.



Figura 9. Inundaciones del mes de septiembre 2017.

El atlas de riesgo del Municipio de Mexicali, refiere que de manera general, los registros históricos muestran que a pesar de la escasa precipitación pluvial que se presenta en la región, cuando se presenta un evento hidrometeoro lógico, es frecuente que la ciudad y los poblados se inunden, se presenten afectaciones a los cultivos del valle agrícola, se presentan apagones y cortos circuitos, las vialidades presentan afectaciones que crean discontinuidades y dificultan su tránsito (por presencia de agua y lodo), las aguas negras brotan de las alcantarillas o letrinas, algunos canales y drenes se desbordan, e incluso se destruyen tramos carreteros interrumpiendo la conexión terrestre con el resto del estado y del país por el daño en la infraestructura.

Capítulo 3. Materiales y Métodos

Este trabajo se desarrolló en tres partes fundamentales, la primera fue una revisión del plan de desarrollo urbano de la ciudad de Mexicali Baja California, México, con la finalidad de identificar en qué medida se tomaba en cuenta la hidrodinámica del Río Nuevo y el complejo lagunar de la ciudad en los instrumentos de la planeación urbana (figura 10). En este sentido el análisis incluyó además las ciudades que se encuentran en zonas áridas y semiáridas en México, a fin de comparar los instrumentos de planeación.

Como segunda fase, se realizó un modelo hidrológico con el objetivo de obtener un gasto de diseño estimado para diferentes periodos de retorno, bajo el esquema del análisis regional de frecuencia con el enfoque de los L-Momentos. Con la información obtenida se alimentó el modelado hidrológico e hidráulico de la cuenca del Río Nuevo, para identificar las zonas de inundación sobre el cauce principal de la cuenca. El uso de un sistema de información geográfico (SIG) para el procesamiento y la visualización de datos geoespaciales facilita la preparación e interpretación de los datos del modelo (Heimhuber, 2013), en este caso se utilizó la herramienta ArcMap y las extensiones HEC-GeoHMS y HEC-GeoRAS, para la preparación de los archivos de entrada del modelo. El diagrama del modelado de la cuenca, con tormenta de diseño obtenida a través del análisis regional de frecuencia (modificado a partir de Heimhuber, 2013), se muestra en la figura 11. En la tercera fase de este estudio, a partir de la información obtenida se procedió a identificar los servicios ecosistémicos que presta el complejo lagunar a la ciudad de Mexicali.

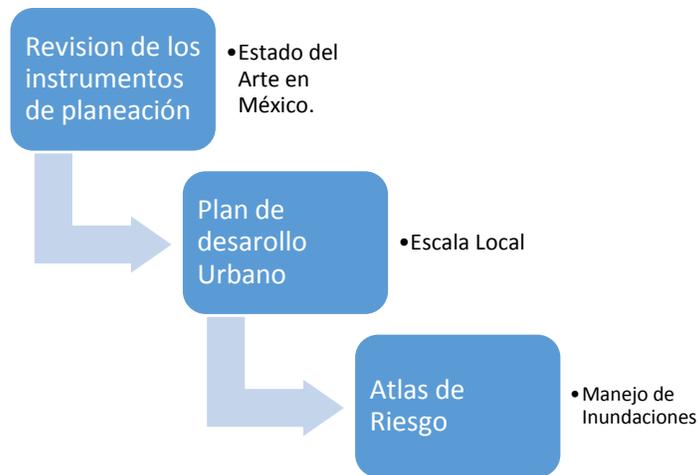


Figura 10. Etapa 1 Revisión de los instrumentos de planeación, referente al manejo de riesgo por inundación.

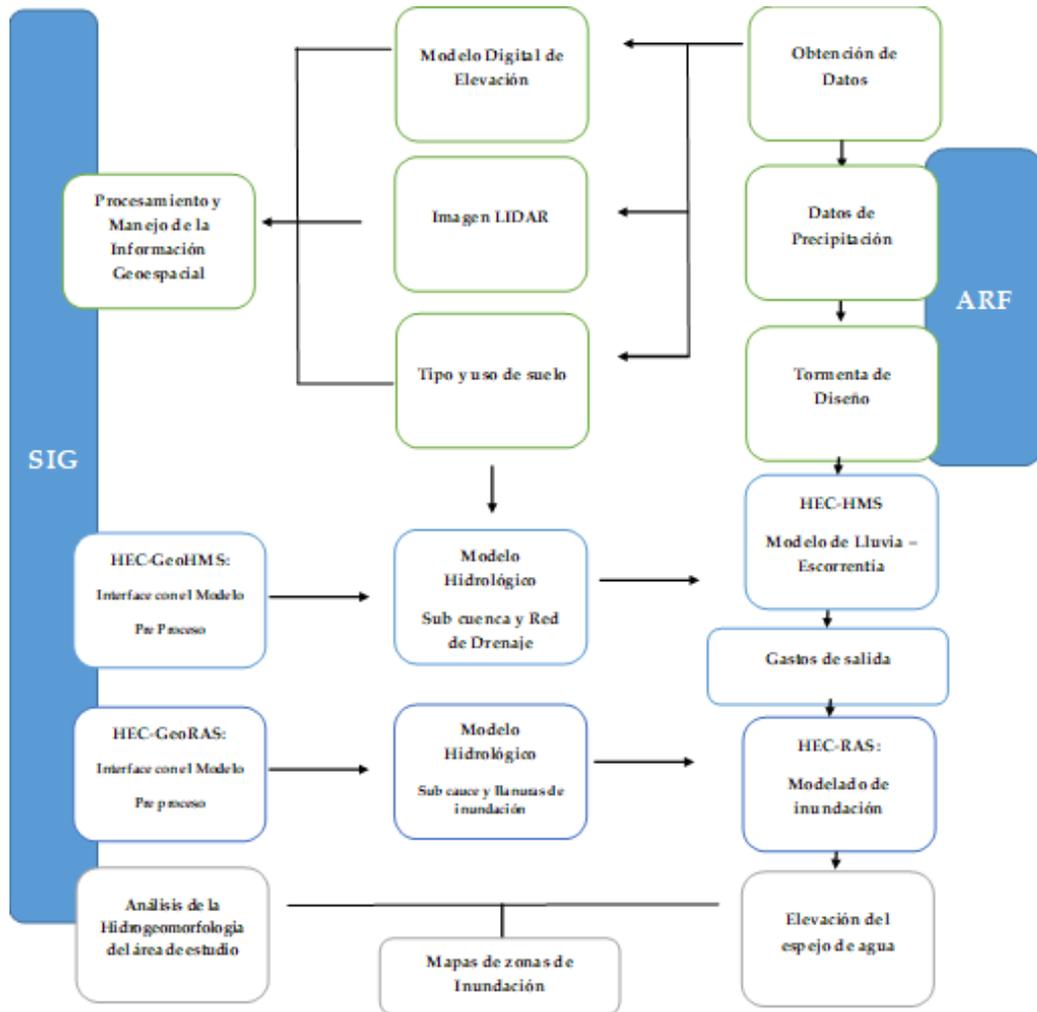


Figura 11. Diagrama del modelo hidrológico e hidráulico basado en SIG.

Para la realización de esta investigación se utilizaron los registros históricos de precipitación obtenidos de 35 estaciones meteorológicas y los registros de caudal de una estación hidrométrica ubicada en el trasvase del Río Nuevo en la frontera con Estados Unidos. En el caso de México fueron obtenidos a través del Extractor Rápido de Información climatológica (ERIC III), del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Así mismo, fueron considerados los datos de una estación ubicada en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California en las coordenadas 3°11,466.36 m latitud norte y 116,886.57 m longitud oeste. Por otro lado, para Estados se utilizaron los registros durante el periodo correspondiente a los años de 1930 al 2016, del archivo de datos climáticos de California (CalClim, por sus siglas en inglés). En la tabla 1, se presenta la localización de las estaciones climatológicas con las cuales se procedió a realizar un análisis regional de frecuencia de 24 horas usando el enfoque de los L-momentos en la subcuenca del Río Nuevo (figura 12).

Tabla 1. Estaciones Meteorológicas

Estación	Localidad	Latitud Oeste	Longitud Norte	Tipo	No.Datos
Anza	CA	33.555	116.67	Diario	32
Brawley	CA	32.954	115.558	Diario	71
Bataquez	BA	32.551	115.069	Diario	44
Beaumont	CA	33.929	116.975	Diario	57
Beaumont 2	CA	33.925	116.967	Diario	67
Beaumont Plumbing	CA	33.983	116.967	Diario	60
Borrego Desert Park	CA	33.331	116.414	Diario	64
Coyote Wells	CA	32.85	116.62	Diario	13
Calexico	CA	32.688	115.464	Diario	73
Col. Rodríguez	BA	32.419	115.036	Diario	22
Coyote Canyon	CA	33.433	116.5	Diario	10
Deep Canyon Lab	CA	33.651	116.376	Diario	41
Desert Resort RGNL	CA	33.627	116.159	Diario	63
Ejido Islitas	BA	32.353	114.914	Diario	19
El Centro 2 Ssw	CA	32.777	115.562	Diario	77
Gold Rock RCH	CA	32.883	114.867	Diario	27
Hayfield Pump PLT	CA	33.704	115.629	Diario	77
Imperial	CA	32.85	115.57	Diario	77

Imperial Faa Airport	CA	32.83	115.58	Diario	33
Indio Fire Station	CA	33.709	116.582	Diario	80
Instituto de Ingeniería	BA	32.631	115.445	Diario	11
Mecca 2 Se (Fire Station)	CA	33.571	116.077	Diario	55
Mexicali (Rio Nuevo)	BA	32.667	115.459	Diario	53
Mexicali Campo Agrícola	BA	32.55	115.744	Diario	43
Morongo Valley	Ca	34.033	116.583	Diario	18
Niland	CA	33.278	115.524	Diario	63
Ocotillo 2	CA	32.746	116.001	Diario	28
Ocotillo Wells	CA	33.15	116.133	Diario	19
Palm Springs	CA	33.827	116.51	Diario	88
Presa Morelos (Rio Colorado)	BA	32.705	114.731	Diario	49
Ranchita	CA	33.233	116.533	Diario	18
San Luis Rio Colorado	SO	32.423	114.754	Diario	46
Yuma Date Orchard	AZ	32.717	114.65	Diario	19
Yuma Quartermaster Dt	AZ	32.733	114.617	Diario	17
Yuma Valley	AZ	32.717	114.717	Diario	56

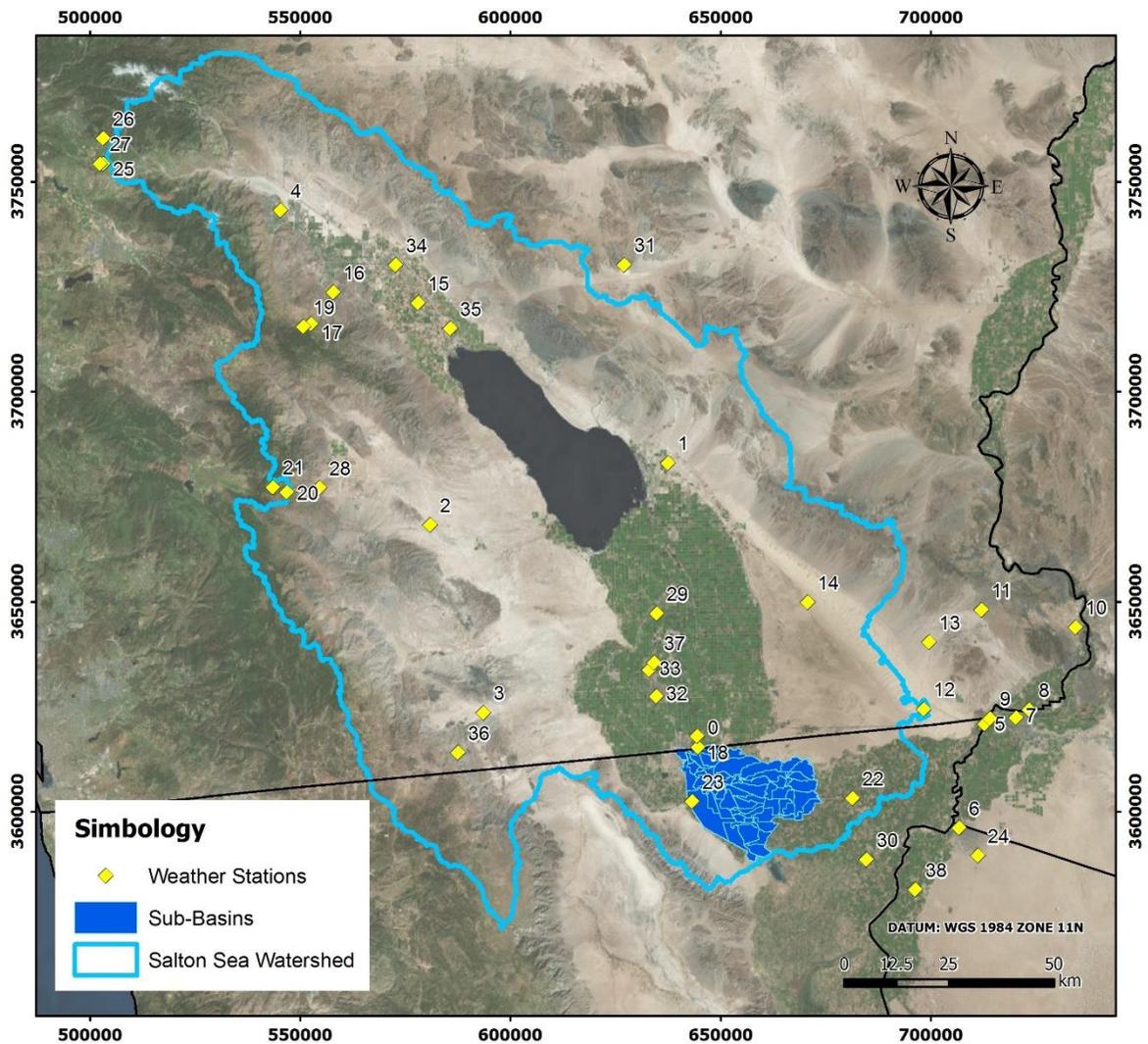


Figura 12. Representación espacial de las estaciones que formaron parte del análisis regional de frecuencia.

Para iniciar el estudio, se estableció la precipitación bajo diferentes periodos de retorno a fin de obtener la relación de lluvia escurrimiento, a partir de un análisis regional de frecuencia.

Análisis regional de frecuencia

La metodología del análisis regional de frecuencia utilizada en el presente estudio se basa en los trabajos de Wallis et al. (2007) y Schaefer et al. (2007) referida por (Nuñez Cobo, Verbist, Ramirez Hernandez, & Hallack Alegria, 2010), y que consta de cuatro pasos básicos: 1.-selección de los datos, 2.-identificación de

regiones homogéneas, 3.- selección de la distribución de frecuencia, y 4.- estimación de la función de cuantiles.

Selección de los datos

El análisis comienza con la categorización de los sitios en arreglos de posibles regiones homogéneas utilizando el criterio de discordancia. Dado que el número de estaciones en las regiones puede variar, y la serie de datos es relativamente pequeña, se considera analizar los valores críticos de discordancia recomendados por Hosking y Wallis (1997). La medida de discordancia es un indicador secundario que apoya en la toma de decisión al considerar mover una estación de una región a otra. Para continuar con el procedimiento de exploración de datos se efectúan dos criterios adicionales: que los datos sean estacionarios en el periodo de registro, y la independencia serial de los datos en cierto sitio (Nuñez Cobo, Verbist, Ramirez Hernandez, & Hallack Alegria, 2010).

Identificación de regiones homogéneas

Posterior a la exploración de datos se identificaron regiones climáticamente homogéneas. Este es un proceso iterativo donde algunos de los métodos más utilizados para formular a priori regiones homogéneas son: el análisis cluster, métodos multivariados, métodos basados en atributos geográficos y climáticos del área de estudio, región de influencia, lógica difusa, mapas auto organizados e índice de estacionalidad (Nuñez Cobo, Verbist, Ramirez Hernandez, & Hallack Alegria, 2010). Para este estudio, se utilizó el criterio de estacionalidad y magnitud de la precipitación media anual, como criterio de agrupamiento de estaciones.

Las medidas de heterogeneidad han sido desarrolladas por Hosking y Wallis, como indicadores del grado de heterogeneidad en las relaciones de los L-momentos, para un grupo de mediciones (Schaefer M., Barker, Taylor, & Wallis, 2006). El criterio de homogeneidad en este estudio se basa en el trabajo de Wallis et al. (2007), que sugieren los rangos presentados en la tabla 2.

Tabla 2. Valores críticos de heterogeneidad actualizados

Heterogeneidad	Wallis y colaboradores 2007
Homogénea	$H < 2$
Posiblemente heterogénea	$2 < H < 3$
Heterogénea	$H > 3$

Fuente: (modificado a partir de Núñez et al, 2010).

Las estadísticas H_1 y H_2 miden la variabilidad relativa del coeficiente de L-Variación (L-Cv, en inglés) y L-Skewness (equivalente L-momento al coeficiente de asimetría convencional) observadas (Núñez et al, 2010), para sitios en una subregión. Específicamente, estas medidas comparan la variabilidad observada con la esperada de una muestra mayor tomada de una región homogénea representada por la distribución Kappa, según la propuesta de Hosking y Wallis de 1988 (Schaefer M. , Barker, Taylor, & Wallis, 2006).

Uno de los criterios utilizados en la integración de regiones homogéneas fue que las estaciones que la integran no presenten propiedades que las hagan discordantes con las demás estaciones que la conforman. La medida de discordancia (D_i), es una medida estadística basada en la diferencia entre los índices L-momento de un sitio y el promedio L-momento de un grupo de sitios similares (Malekinezhad & Zare-Garizi, 2014). En la tabla 3 se presentan los valores críticos de D_i según el número de estaciones que conforman la región.

Tabla 3. Valores críticos de discordancia (Di) (modificado a partir de Núñez et al, 2010).

Número de Sitios	Valor Crítico
10	2.491
11	2.632
12	2.869
13	2.971
14	2.971
15	3

Selección de la distribución de frecuencia

Posteriormente a la identificación de las regiones homogéneas, se identificó la distribución de probabilidad apropiada para describir el comportamiento de los datos climáticos de interés. La distribución de frecuencia se eligió basándose en el diagrama de los L-momentos-ratio y la medida de bondad de ajuste Z^{Dist} . La bondad de ajuste juzga cuán bien la L-kurtosis teórica de una distribución coincide con la L-curtosis promedio regional de los datos observados (Malekinezhad & Zare-Garizi, 2014).

Siguiendo la metodología de Hosking y Wallis (1997), se utilizó el estadístico de la prueba de bondad de ajuste Z. El procedimiento indica una distribución como “aceptable” para $Z \leq 1.64$, el cual corresponde a la falla de rechazo de la distribución hipotética con un nivel de significancia del 90% (Hosking y Wallis 1997).

En este estudio se utilizaron cuatro distribuciones de probabilidad que mejor se ajustaron a los datos como se muestra en la tabla 4:

Tabla 4. Distribuciones de probabilidad

Distribución	Función de densidad de probabilidad	Rango
Normal Generalizada	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	$-\infty \leq x \leq \infty$
Pearson tipo III	$f(x) = \frac{\lambda^\beta (x-\varepsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(x-\varepsilon)}}{\Gamma(\beta)}$	$x \geq \varepsilon$
Generalizada de Valor Extremo	$f(x) = \alpha^{-1} e^{-(1-k)y - e^{-y}}$ $y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\} & k > 0 \\ (x - \xi)/\alpha & k = 0 \end{cases}$	$-\infty < x \leq \xi + \alpha/k \quad k > 0$ $-\infty < x < \infty \quad k = 0$ $\xi + \alpha/k \leq x < \infty \quad k < 0$
Kappa de 4 parámetros	$f(x) = \alpha^{-1} \{1 - k(x - \xi)/\alpha\}^{1/k-1} \{F(x)\}^{1-h}$	Límite superior es $\xi + \alpha/k$ si $k > 0$, ∞ si $k \leq 0$; Límite inferior es: $\xi + \alpha(1 - h^{-k})/k$ si $h < 0$ $\xi + \alpha/k$ si $h \leq 0$ y $k < 0$, $y - \infty$ si $h \leq 0$ y $k \geq 0$

Estimación de función de cuantiles

Una vez que se ha identificado la distribución de probabilidad para la región homogénea, se procede a determinar los cuantiles para diferentes periodos de retorno usando el método Índice de Avenidas, el cual se expresa como: $Q_{-}(i)(F) = \mu_{-i} q(F)$, donde: $Q_{-}(i)(F)$ es el cuantil regional estimado; μ_{-i} es la media de la distribución de frecuencia del sitio y $q(F)$ es la curva de crecimiento de la región (Núñez et al, 2011).

Modelo Hidrológico

Las simulaciones hidrológicas se realizaron empleando la herramienta HEC-HMS 3.2 del Hydrologic Engineering Center. Este software de código abierto se utilizó por ser considerado por muchos investigadores como el modelo más versátil para el modelado del proceso de lluvia escorrentía (Bedient & Huber, 1992). El programa permite representar el proceso de lluvia escorrentía de manera simplificada, simulando el hidrógrama que se produce en un determinado punto de la red fluvial como consecuencia de un episodio de lluvia (López, y otros, 2012).

El modelo en HEC-HMS consideró cuatro componentes (Zema, Labate, Martino, & Zimbone, 2016): 1.-Modelo de cuenca, utilizado para estimar pérdidas hidrológicas, precipitación-escorrentía, flujo base, enrutamiento y especificaciones generales de la cuenca (Kamali et al., 2013); 2.- Modelo meteorológico, el cual indicó la precipitación de entrada requerida por un elemento de la subcuenca (Ali et al., 2011); 3.- Especificación de control, con él se determinó el inicio y el período de simulación (Kamali et al.,2013); y 4.- Datos de entrada, utilizados para proporcionar las variables hidrológicas observadas en el modelo, como son datos de series de tiempo (USACE), 2015.

Determinación de los parámetros de tipo de uso de suelo

En este estudio la modelación del escurrimiento se basó en el método del Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS). Este método se utilizó para predecir el volumen de escurrimiento directo en un evento de lluvia dado. Fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, del Servicio de Conservación de Suelos. El método del CN se basa en la ecuación de balance de agua, el cual dentro del HEC-HMS estima la precipitación en exceso o precipitación efectiva en función de la precipitación acumulada, cobertura del suelo, uso del suelo, y humedad antecedente (Magaña-Hernández, Bá, & Guerra-Cobián, 2013). A fin de determinar con mayor precisión los tipos de suelo y estimar el tamaño de sus áreas y la proporción porcentual de cada tipo representado espacialmente en la zona, en este estudio se procesaron 1500 polígonos mediante un SIG sobreponiendo la capa de uso de suelo del Instituto

Nacional de Geografía Estadística e Informática (INEGI) a las imágenes obtenidas a través de la plataforma Google Earth. Posteriormente, para la obtención del CN se consideraron los valores de la tabla de regiones semiáridas (NRCS (Natural Resources Conservation Service), 1986). Debido a que esta variable es el parámetro más sensible (González, Scaini, Goñi, Valdenebro, & López, 2012), posteriormente se realizó una calibración del modelo ajustando el CN.

Delimitación de sub-cuenca y micro-cuencas

Una cuenca hidrográfica suele ser delineada como varias sub-cuencas antes de aplicar el análisis con el HEC-HMS (Patel, 2009). Por lo tanto, la delimitación de las cuencas y redes de drenaje fueron obtenidas utilizando un MDE generado a partir de datos de elevación de alta resolución (LiDAR) de 5x5 metros (INEGI, 2010) mediante un SIG.

Modelo Hidráulico

Los modelos hidráulicos se utilizaron para simular el comportamiento del flujo en el canal principal y la llanura de inundación del Río Nuevo (Alaghmand y otros, 2010). Los gastos de diseño de escorrentía generados, se utilizaron como entrada para el modelado en HEC-RAS (Reinfelds y otros, 2010). La geometría del río fue procesada usando la extensión del HEC-GeoRAS. La realización del modelo hidráulico se constituyó por tres procedimientos fundamentales:

Pre-proceso. Se utilizaron los datos geométricos del modelo hidráulico conformados por el eje del río, secciones transversales, distancia de separación entre secciones, puntos de control, así como el coeficiente de Manning y coeficientes de contracción/expansión.

Proceso-Simulación hidráulica con HEC-RAS. Durante la etapa del proceso se establecieron las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo en la modalidad de flujo permanente. Cabe mencionar que, debido a la falta de referencia del nivel del agua, se optó por la condición de frontera de tirante crítico (US Army Corps of Engineers, 2016). Posteriormente se definió el régimen de flujo mixto a fin de correr la modelación y como parte de este apartado, finalmente se llevó a cabo la calibración del modelo mediante la relación caudal-tirante de agua.

El caudal se obtuvo mediante mediciones in-situ utilizando un velocímetro doppler acústico y los resultados fueron utilizados para ajustar el modelo matemático de tal manera que reproduzca el fenómeno en estudio (Parhi, Sankhua, & Roy, 2012).

Post-proceso. Una vez calibrado el modelo hidráulico se elaboraron mapas de inundación (profundidad) para los diferentes escenarios de flujo. El modelado hidráulico en esta investigación se realizó sin considerar la infraestructura del embovedado del Río Nuevo, debido a que, en regiones áridas y semiáridas los eventos de inundaciones repentinas son causados por tormentas de alta intensidad y corta duración con alto grado de variabilidad espacial. Estas tormentas suelen presentar crecidas intensas en tiempos muy cortos incluso para cuencas grandes, lo que resulta en cantidades significativas de sedimentos transportados afectando la infraestructura hidráulica de las instalaciones aguas abajo (Maksimovic, 2001). La modelación hidráulica con una extensión de 14.17 km del cauce principal del Río Nuevo incluyendo el cuerpo lagunar al sur de la ciudad, fue analizada mediante 143 secciones transversales distribuidas en intervalos aproximados a los 100 metros.

Identificación de Servicios Eco-sistémicos

Con el fin de identificar la morfología del complejo lagunar de Mexicali, se procedió primeramente a realizar un estudio topo-batimétrico en la zona de estudio.

El levantamiento de las superficies sub-acuáticas se realizó con la batimetría del sistema lagunar realizada en el área de estudio. Se efectuó un recorrido en el mes de marzo de 2016 por la zona de estudio para ubicar sitios de acceso a las lagunas, lo suficientemente amplio para entrar con el equipo necesario para llevar a cabo la batimetría, que puede complicarse debido a las restricciones de acceso, tanto geográficas como legales, por la existencia de propiedades privadas que colindan con el complejo lagunar. En la Figura 4 se observa un área dentro de la Laguna Campestre sin mediciones de profundidad debido a la densa presencia de vegetación en el sitio.

En cada laguna se instaló una regleta para medir el nivel del agua y con el fin de obtener la elevación del espejo de agua con respecto al nivel medio del mar, lo cual se realizó referenciando las regletas a bancos de nivel establecidos, utilizando sistemas de posicionamiento geográfico.

El levantamiento topográfico se realizó mediante el uso de equipo de topografía, una estación total y tecnología de sistemas de posicionamiento geográfico de doble frecuencia. Se utilizaron los métodos de levantamiento en tiempo real y estático con la referencia espacial correspondiente al sistema de coordenadas UTM zona 11N Datum WGS 1984. El levantamiento estático se caracteriza por la ocupación simultánea de dos o más puntos durante un periodo de tiempo suficientemente prolongado, mientras los receptores se mantienen estacionarios en tanto registran datos, con el fin de lograr precisiones inferiores al centímetro. El levantamiento en tiempo real utiliza un radio para transmitir señales de la estación base al receptor móvil que luego calcula sus posiciones en tiempo real. A partir de la topografía y batimetría obtenidas se elaboró un Modelo Digital del Terreno (MDT) en formato Raster.

Posteriormente a los estudios realizados se procedió a zonificar los servicios ambientales en las lagunas mediante el apoyo de sistemas de información geográfica.

Resultados y Discusión

Este capítulo reúne toda la información recopilada y se centra en responder los objetivos planteados como base de esta investigación, si bien es cierto que desde el planteamiento del marco conceptual, en referencia a las dos partes del primer bloque que se refiere a relación de la planeación del riesgo de inundación con los instrumentos de gobierno, se realizó una investigación del estado del arte que no solo se circunscribió a la Ciudad de Mexicali sino que se extendió por las ciudades de zonas áridas y semiáridas del país, a fin de identificar el potencial impacto de este trabajo en un contexto nacional.

Posteriormente los resultados siguientes, son parte de un análisis del modelo hidrológico, alimentado por el análisis regional de frecuencias con enfoque en los I-momentos, y el acoplamiento con el modelo hidráulico para establecer las áreas de inundación del cauce principal del Río Nuevo e identificar la afectación a la infraestructura urbana en cada escenario propuesto para 20, 50, 100 y 500 años.

Finalmente utilizando las herramientas de un sistema de información geográfico, se identificaron las zonas donde se prestan servicios ecosistémicos del complejo lagunar de la ciudad de Mexicali, a fin de reconocerlos para incluirlos en los instrumentos de planeación del municipio.

Relaciones entre planeación y la hidrología urbana

El documento que recoge las estrategias de planeación de desarrollo en el municipio de Mexicali, es el Plan Municipal de Desarrollo, en su edición 2017-2019 en la política pública tres, denominada: Gestión de la Seguridad Pública, en su estrategia 3.6. Cultura de la seguridad civil, establece lo siguiente: “Difundir la cultura de la seguridad civil, con conocimientos sobre prevención de riesgos y respuesta derivados de los fenómenos geológicos, hidrometeorológicos, físico-químicos, sanitarios y socio-organizativos, con la finalidad de formar ciudadanos preparados para reaccionar positivamente en caso de un desastre”.

En la política pública cuatro, denominada: Gestión de la Planeación del Territorio y Movilidad Urbana, se establece como objetivo Asegurar un sistema efectivo de planeación del territorio, en un marco de desarrollo sustentable que contribuya al ordenamiento urbano y ecológico para el bienestar de la población, a través de la actualización de la normatividad y su adecuada instrumentación. La estrategia 4.1.7. Atlas de riesgo, tiene como fin el actualizar, promover y difundir el atlas de riesgo con la finalidad de dar a conocer las áreas de riesgo del municipio de Mexicali.

Luego entonces, tanto la política tres como la cuatro, mencionan la gestión de seguridad y la prevención del riesgo de eventos hidrometeorológicos, así como la implementación de un sistema de planeación del territorio en el marco del desarrollo sustentable. Sin embargo se establecen generalidades en este documento, por lo que se procedió a revisar el atlas de riesgo de Mexicali, para verificar si existe alguna directriz con respecto a inundaciones súbitas.

Atlas de Riesgos del Municipio de Mexicali Baja California (marzo-agosto de 2011)

Dentro del Atlas de Riesgos del Municipio de Mexicali se pueden encontrar medidas de mitigación de riesgos hidrometeorológicos, entre los cuales se encuentra el riesgo a inundaciones, algunas de las medidas de prevención y mitigación empleadas dentro de la ciudad y zonas pobladas del valle son:

- Implementar un programa permanente de limpieza y desazolve de canales, drenes y cuerpos de agua. Así como campañas de concientización y medidas de control para evitar la disposición de basura en ellos.
- Establecer pendientes mínimas en los proyectos y la construcción de drenajes alternos al tubo del Río Nuevo. Analizar la capacidad de conducción del tubo del Río Nuevo y sugerir medidas al respecto (zona del Río Nuevo).

En el apartado de riesgos hidrometeorológicos, se refiere que en el mes de agosto de 1977 el huracán Doreen, convertido en tormenta tropical, sin ingresar al Estado de Baja California, ocasionó diferentes niveles de precipitación en el municipio de Mexicali. El máximo valor acumulado se registró en Presa Morelos

con 154 mm, provocando serios daños en el municipio, a tal punto que el gobernador declaró a la ciudad zona de desastre; el 80% de las colonias resultaron inundadas, particularmente el centro de la ciudad, también hubo viviendas y postes derrumbados, la suspensión de servicios básicos; la carretera a Tijuana resultó seriamente dañada, desapareció un cementerio y hubo incendios y derrame de gasolina.

El Atlas de Riesgo presenta una relación histórica de las lluvias del municipio y hace referencia al estudio de Rodríguez (2002), así como a reportes periodísticos que mencionan que no es necesario que se presente una lluvia intensa (p.ej. > 50 mm) en Mexicali, para ocasionar problemas, sino que basta que sea de 10 mm en un período de 24 horas, para provocar daños, por lo que el registro de las veces que han ocurrido lluvias de 10 mm a más, puede indicar la frecuencia de problemas de inundaciones o daños que se han presentado en Mexicali.

Posteriormente se hace una zonificación de áreas afectadas por ríos, canales y drenes, definidas de la siguiente forma: “Para obtener las zonas expuestas a estos peligros hidrográficos se asignaron distancias de 300 metros a ríos y 50 metros a canales. La figura 13 muestra el resultado de la asignación de radios de afectación donde puede observarse que éstos se distribuyen por todo el valle de Mexicali, aunque en relación con los ríos, éstos se concentran en la zona sur y oriente”.

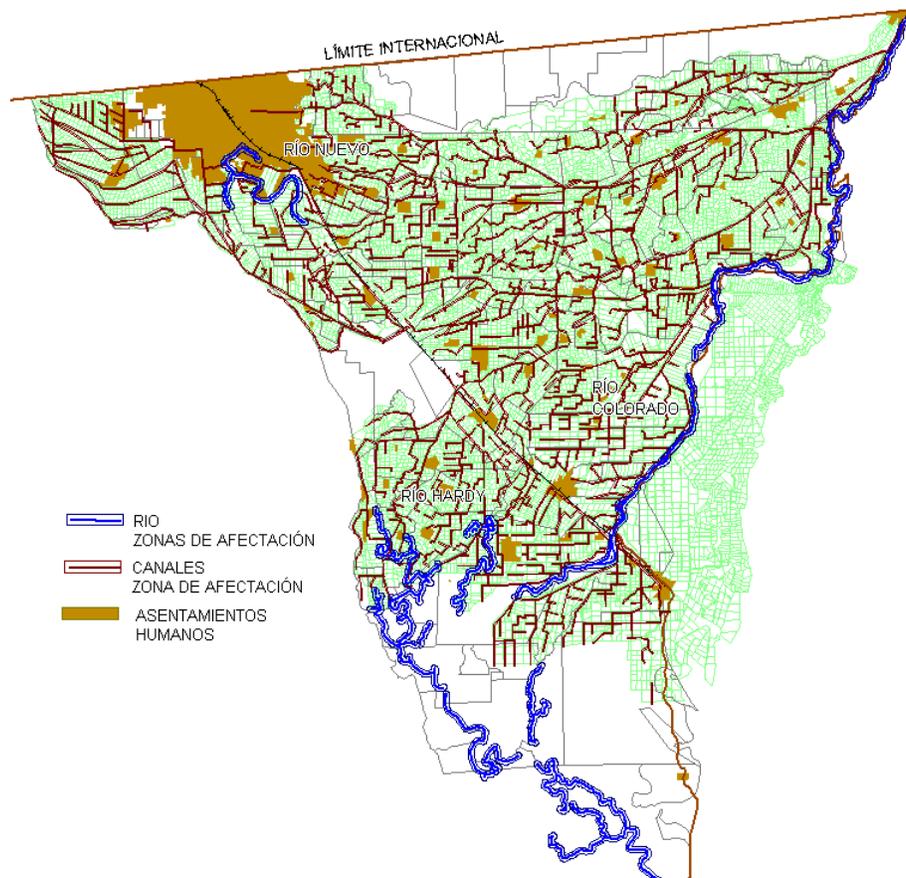


Figura 13. Zonas de afectación según el atlas de riesgo de Mexicali

Como puede observarse actualmente la planeación de la zona urbana de Mexicali en materia de manejo de riesgo de inundación se encuentra según la propuesta de OPW. 2009, en la Etapa 1. Donde se presenta la identificación del riesgo de inundación y la posible problemática del agua superficial relacionada con este tipo de eventos. Por lo que se requiere utilizar las directrices de planificación regional y planes de desarrollo que puedan garantizar una mayor investigación en el lugar de estudio.

Como área de oportunidad de los instrumentos de planeación a fin de situarse en la Etapa 2. Se requiere contar con análisis detallados de la hidrodinámica de la cuenca, y su interacción con el medio urbano más allá de una relación histórica de eventos de inundación. Lo anterior con el fin de dotar al Plan de Desarrollo Urbano y al Atlas de Riesgo de Mexicali, de una herramienta análisis de la hidrología urbana que establezca con claridad la metodología para su

análisis, permitiendo conocer con mayor certeza el comportamiento hidrodinámico del complejo lagunar y el Río Nuevo, las interacciones del mismo con el entorno urbano y la zonificación de las áreas afectadas bajo distintos periodos de retorno.

El estado del arte indica que la generación espacial de la escorrentía en las zonas áridas y semiáridas como lo es la cuenca del Río Nuevo no es uniforme. Sin embargo, los mecanismos de precipitación dominantes son usualmente tormentas de alta intensidad y corta duración (Wang, Zhang, & Baddo, 2016), condiciones que se cumplen en el área de estudio. Cabe destacar que este trabajo es el primero con estas características que se realiza en esta zona, acoplado el modelo hidrológico con el hidráulico, por lo que se espera que sus resultados sean utilizados como referencia para análisis posteriores.

Análisis Regional de Frecuencias

Debido a la limitada infraestructura en estaciones meteorológicas y disponibilidad de registros de precipitación en México, el enfoque probabilístico del análisis regional de frecuencia se contempla como una opción válida para estimar la ocurrencia de un evento de precipitación extremo, que será utilizado como dato de entrada de un modelo hidrológico. Según los resultados del ARF se definieron 20 estaciones en la cuenca del Salton Sea consideradas homogéneas (Tabla 5). Seleccionándose la distribución Pearson Tipo III, que fue validada con las funciones Normal Generalizada y Generalizada de Valor Extremo.

Tabla 5. Estaciones de la región homogénea utilizada en el estudio.

Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste	PMA	L-CV	L-SKEW	L-KURT	Discordancia (Di)
Brawley	634781.34	3647110.12	47.1	0.366	0.242	0.175	0.26
Bataquez	681308.65	3603156.81	36.7	0.413	0.227	0.144	1.48
Calexico	643996.85	3617742.02	44.7	0.357	0.171	0.139	0.33
Col Rodríguez	684677.21	3588577.52	36.1	0.402	0.183	0.174	1.75

Deep Canyon Lab	557860.08	3723635.24	84.4	0.315	0.278	0.224	1.82
Desert Resort RG	578003.43	3721116.77	50.8	0.334	0.212	0.155	0.19
Ejido Islitas	696293.9	3581476.88	46.0	0.361	0.234	0.236	1.14
El Centro 2	634674.78	3627480.63	45.3	0.323	0.112	0.083	2.00
Hayfield Pump PL	627051.03	3730180.46	65.1	0.345	0.211	0.135	0.32
Imperial Faa Airport	633815.99	3635564.07	43.1	0.317	0.144	0.122	1.00
Indio Fire Station	538732.66	3729969.65	50.7	0.382	0.237	0.103	1.93
Mecca 2	585664.6	3714972.54	47.8	0.386	0.175	0.148	0.90
Mexicali (Río Nuevo)	644499.45	3615420.52	49.2	0.313	0.208	0.174	0.53
Mexicali Campo Agrícola	617926.28	3602097.2	68.7	0.354	0.239	0.214	0.48
Niland	637453.84	3683078.33	44.5	0.358	0.265	0.222	0.79
Ocotillo 2	593590.88	3623570.42	66.5	0.333	0.186	0.194	0.66
Ocotillo Wells	580855.45	3668250.7	43.5	0.310	0.147	0.123	1.11
Palm Springs	545342.18	3743082.29	81.2	0.343	0.253	0.125	1.85
Presa Morelos	712686.4	3620860.17	33.9	0.387	0.225	0.161	0.48
Yuma Valley	713970.32	3622219.06	49.2	0.317	0.212	0.217	0.99

Posteriormente fueron determinados los cuantiles correspondientes a los T_r de 20, 50, 100 y 500 años respectivamente, que se presentan en el tabla 6.

Tabla 6. Cuantiles correspondientes a los periodos de retorno de 20, 50, 100 y 500 años.

Cuantil	Periodos de Retorno	Normal Generalizada	Generalizada de Valor Extremo	Pearson Tipo III	Kappa
0.950	20.00	2.25	2.25	2.26	2.26
0.980	50.00	2.79	2.81	2.75	2.79
0.990	100.00	3.20	3.25	3.10	3.19
0.998	500.00	4.21	4.36	3.91	4.16

Características de los modelos hidrológico e hidráulico

Se obtuvieron 20 microcuencas definidas durante el pre proceso en HEC-GeoHMS, las cuales cuentan con una extensión variable para un área total de 562 km². El punto de interés fue ubicado en la salida del Río Nuevo en el trasvase a California, Estados Unidos, como se muestran en la figura 14. Una vez definidas las características físicas de la cuenca, el proyecto fue exportado al HEC-HMS como se muestra en figura 15.

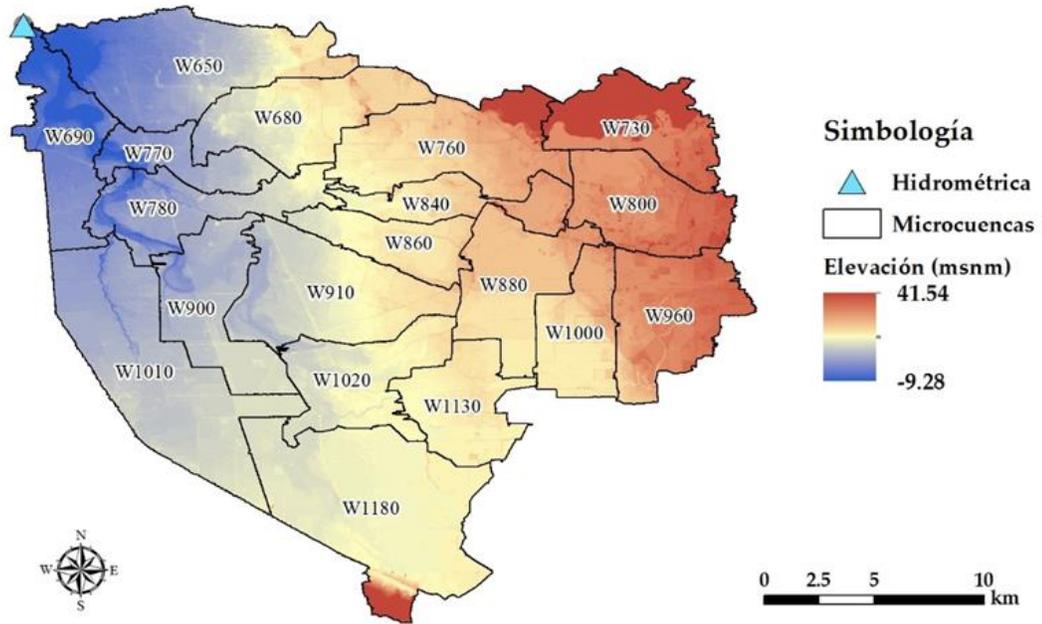


Figura 14. Trasvase entre Rio Nuevo y California, Estado Unidos.

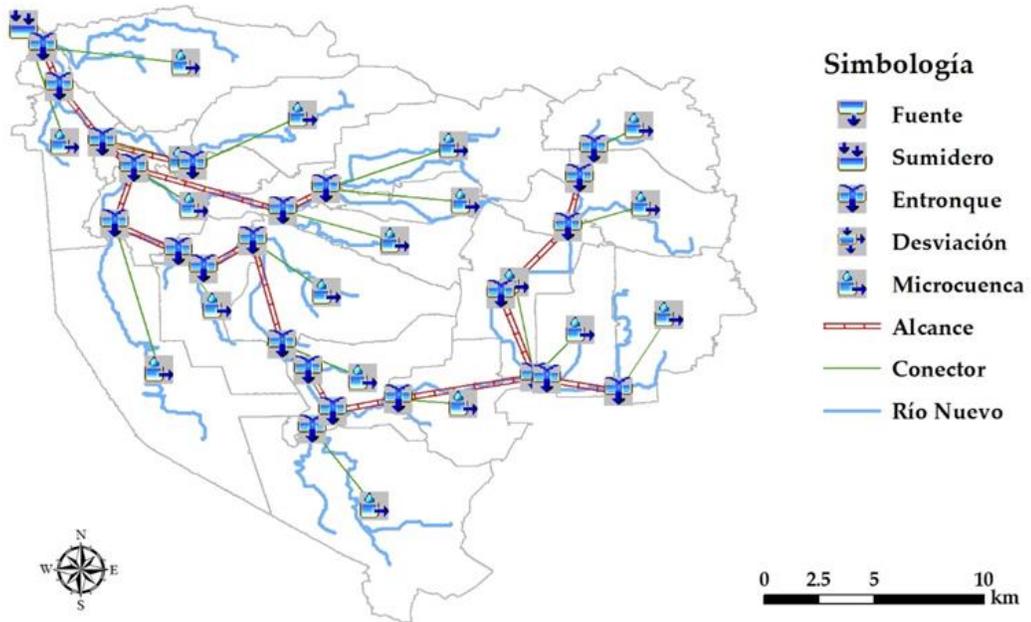


Figura 15. Modelo del HEC-HMS de la sub cuenca del Río Nuevo.

Posteriormente se definieron los datos de entrada de los métodos de pérdida, transformación y enrutamiento, a fin de establecer los parámetros del modelo donde posteriormente se analizaron los diferentes periodos de retorno. Por su parte, los gastos máximos en las simulaciones sirvieron de base para el análisis hidráulico (Tabla 7). Cabe señalar que para aumentar la precisión del CN, se propuso la abstracción mediante un SIG, de los diferentes tipos de uso de suelo a fin de disminuir los errores debido a la generalización de los datos propuestos en los manuales.

Tabla 7. Datos de entrada del modelo

Microcuencia	ENTRADAS					SALIDAS				
	CN	T.C Kirpich (horas)	Lag Time (minutos)	S	la	Área de drenaje (km ²)	Gasto Máximo			
							Tr 20	Tr 50	Tr 100	Tr 500
W650	86	10.58	380.82	41.35	8.27	45.10	8.50	12.20	14.50	20.60
W680	82	12.13	436.81	55.76	11.15	29.67	4.30	6.40	7.80	11.50
W690	82	8.28	297.91	55.76	11.15	24.09	3.50	5.20	6.30	9.40
W730	64	6.22	223.92	142.88	28.58	25.12	0.10	0.40	0.60	1.50
W760	68	10.38	373.61	119.53	23.91	37.02	1.30	2.60	3.60	6.40
W770	88	10.54	379.48	34.64	6.93	14.49	3.10	4.40	5.10	7.20
W780	86	9.19	330.93	41.35	8.27	24.89	4.70	6.70	8.00	11.40
W800	70	11.41	410.78	108.86	21.77	26.32	0.40	0.90	1.40	2.70
W810	86	1.36	49.01	41.35	8.27	0.29	0.10	0.10	0.10	0.10
W840	72	12.53	451.02	98.78	19.76	15.79	0.80	1.40	1.80	3.10
W860	88	10.26	369.23	34.64	6.93	16.67	3.60	5.00	5.90	8.20
W880	72	12.31	443.21	98.78	19.76	27.47	0.70	1.40	2.00	3.60
W900	77	11.69	420.96	75.87	15.17	27.40	2.70	4.40	5.50	8.50
W910	82	11.84	426.12	55.76	11.15	37.76	5.50	8.20	9.90	14.70
W960	68	10.80	388.98	119.53	23.91	29.76	0.30	0.80	1.30	2.60
W1000	76	9.75	350.98	80.21	16.04	20.44	0.80	1.40	1.90	3.20
W1010	78	19.21	691.70	71.64	14.33	54.20	5.90	9.30	11.50	17.70
W1020	82	10.24	368.81	55.76	11.15	25.94	2.60	4.00	4.90	7.60
W1130	80	8.68	312.59	63.50	12.70	22.22	1.50	2.40	3.10	5.00
W1180	70	28.22	1015.91	108.86	21.77	60.38	1.70	3.20	4.40	7.80
TOTAL						565.02	34.20	51.20	62.10	92.30

Número de curva (CN), tiempo de concentración (T.C), abstracción inicial (la), retención máxima (S) y lag por microcuencia (entrada), además salido del modelo: área de drenaje (km²) y gastos máximos (m³/s) por periodo de retorno analizado.

Determinación de las zonas de inundación por periodo de retorno

Considerando que los peligros de inundación en zonas áridas y semiáridas son poco entendidos debido a la falta de información acerca de su comportamiento hidrológico e hidráulico, inciden en la vulnerabilidad de la infraestructura ubicada en las llanuras de inundación. Por lo tanto, este tipo de análisis es necesario para ubicar las zonas expuestas a riesgos por escorrentía asociadas con inundaciones repentinas. En el caso del cauce del Río Nuevo, estas zonas fueron definidas utilizando el acoplamiento del modelo hidrológico e hidráulico, como se presentan a continuación.

Las profundidades y al área de inundación para los diferentes periodos de retorno analizados se muestran en la tabla 8, donde se observa que durante el periodo de retorno de 500 años el rango de profundidad alcanzó hasta los 6.0 metros y una superficie inundable de 237.83 ha, mientras que en el de 20 años, la profundidad alcanzó los 4.80 metros y un área de 190.55 ha.

Tabla 8. Áreas de inundación y profundidades para cada periodo de retorno analizado.

Periodo de Retorno	Área de inundación (ha)	Rango de Profundidad (m)
20	190.55	0.10 - 4.80
50	206.25	0.10 - 5.20
100	216.66	0.10 - 5.50
500	237.83	0.10 - 6.00

En las siguientes figuras (16, 17, 18, 19, 20 y 21) se muestra la representación de la zona inundable para los periodos de retorno de 20 y 500 años, mismas que muestran las profundidades mínimas y máximas obtenidas en

este estudio (Figura 16). Por su parte, en las figuras 17, 18, 19 y 20 se presenta la simulación hidráulica en cinco sitios de importancia sobre el cauce del Río Nuevo por medio de las secciones transversales (RS): 1,520.513, 3,360.577, 4,581.119, 8,292.628 y 9,334.141. Cabe mencionar que a partir del periodo de retorno de 20 años hasta el de 500 se observó un comportamiento similar con variaciones en la profundidad de las zonas inundadas debido a que se observa que el cauce se encuentra definido por pendientes pronunciadas en las márgenes este y oeste.

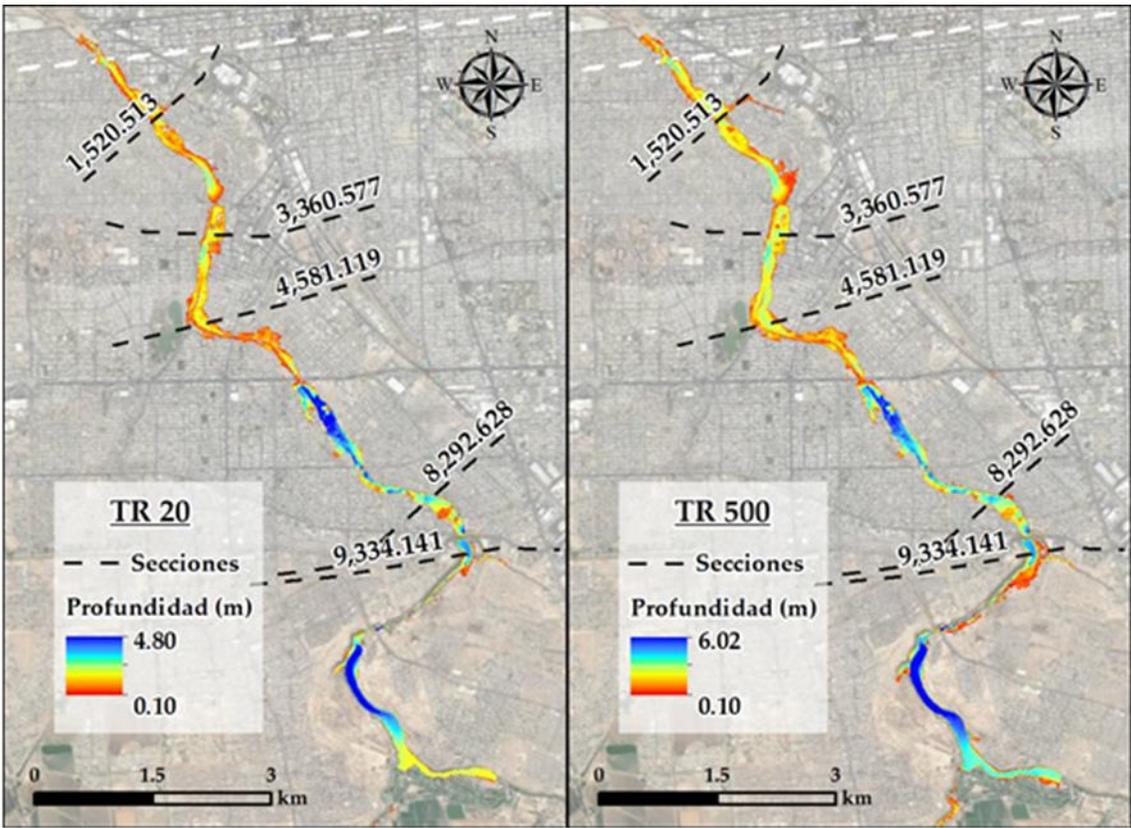


Figura 16. Extensión de la inundación y distribución de profundidad generada por HEC-RAS para eventos con periodos de retorno de 20 y 500 años.

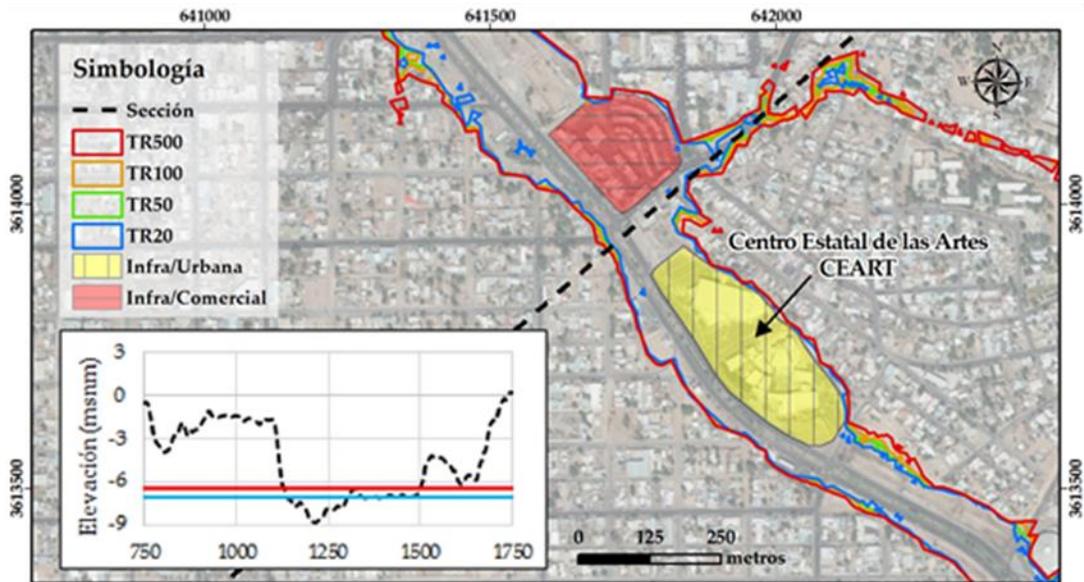


Figura 17. Zonas inundables correspondientes a la sección 1520.513, con afectaciones a infraestructura comercial y urbana.

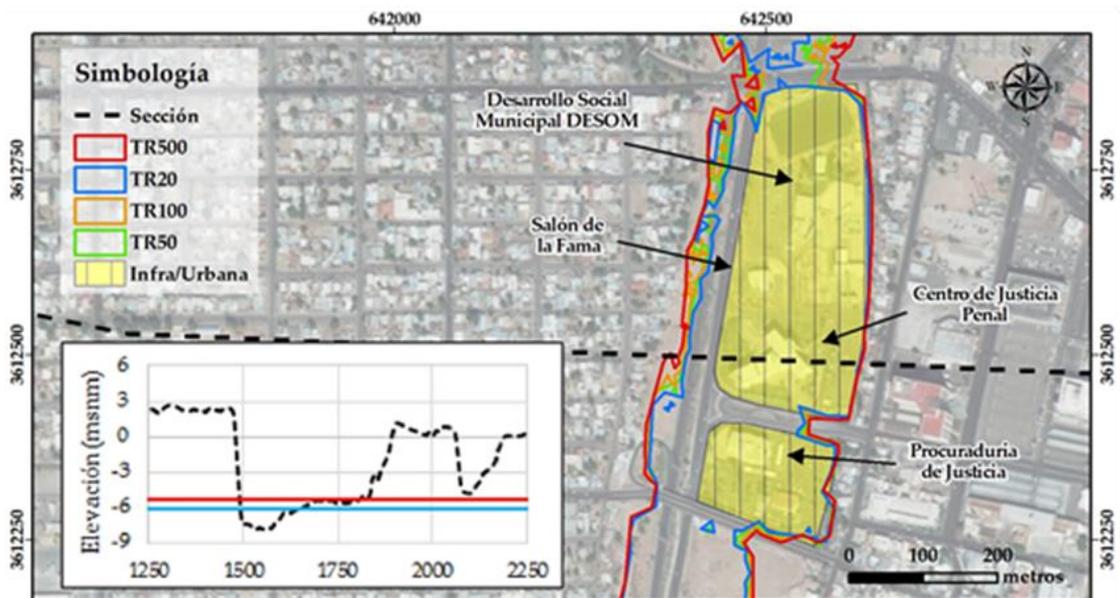


Figura 18. Zonas inundables sección 3,360.577 con afectaciones urbanas (edificios públicos e instalaciones deportivas).

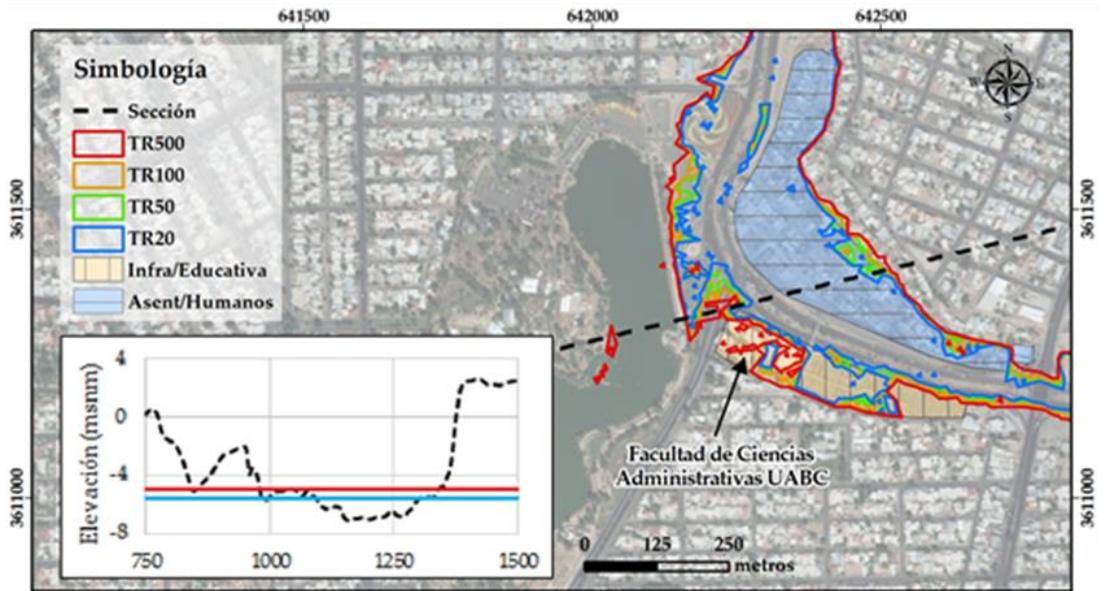


Figura 19. Zonas inundables sección 4,581.119 con afectaciones en asentamientos humanos e infraestructura educativa (asentamientos humanos con aproximadamente 200 familias).

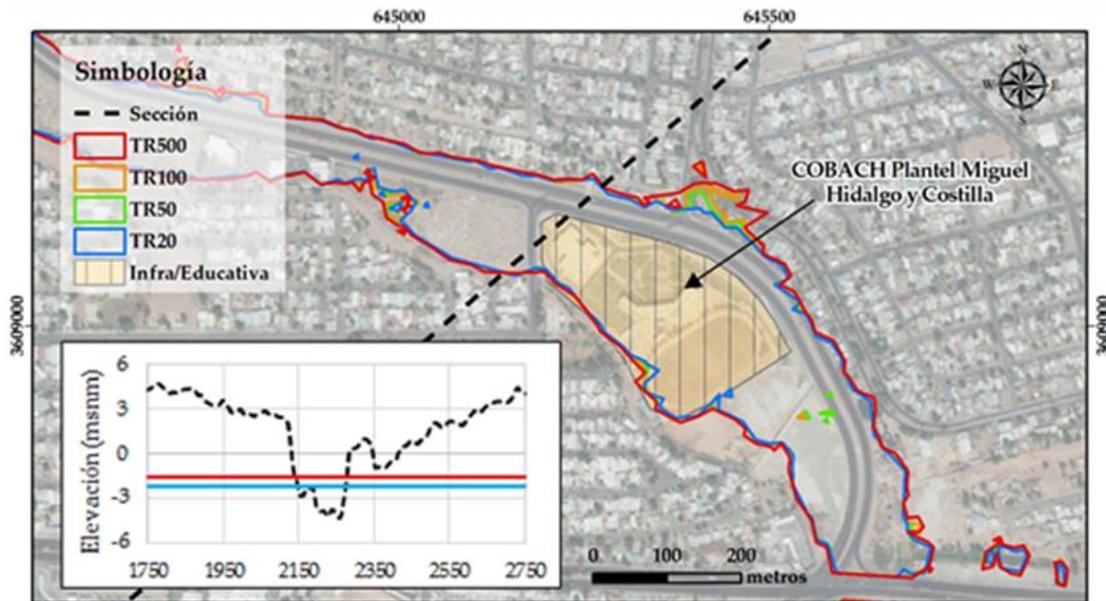


Figura 20. Zonas inundables correspondientes a la sección 8,292.628 con afectaciones en infraestructura educativa.

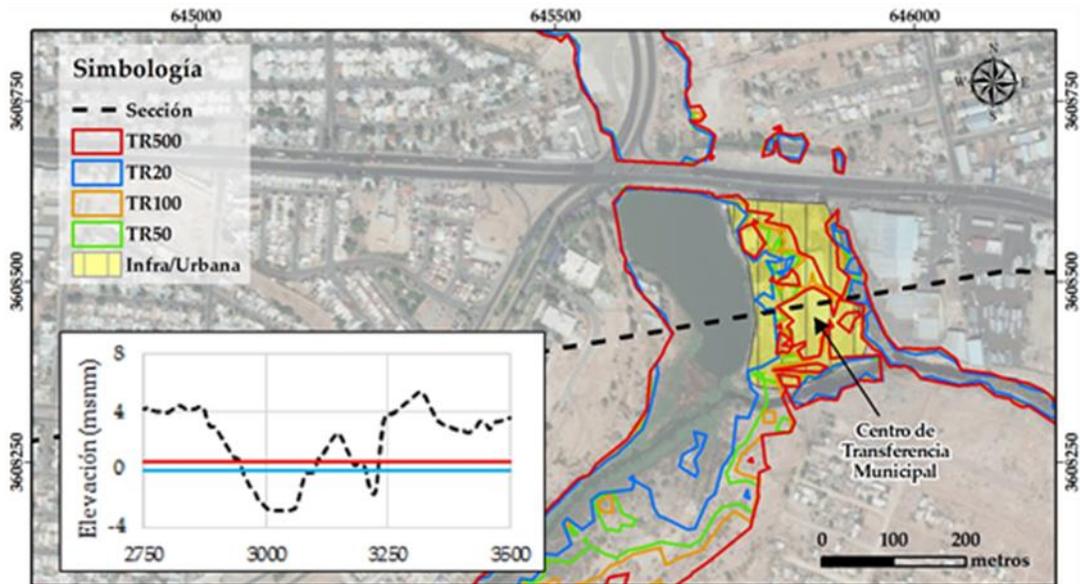


Figura 21. Zonas inundables correspondientes a la sección 9,334.141 con afectaciones en infraestructura urbana (Centro de transferencia de Residuos Sólidos Urbanos de Mexicali).

Identificación de Servicios Eco-sistémicos

Se obtuvieron un total de 30,112 puntos de control dentro del complejo lagunar. Mediante el diseño de un sistema de información geográfica, con los puntos obtenidos en campo se realizó un modelo digital de profundidad (MDP), en el cual se pueden observar las variaciones de profundidad en el sistema lagunar, que oscilan entre 0.20 y 3.50 metros. Una vez obtenido el MDP (Figura 22), se obtuvieron contornos de profundidad, los cuales sirven de apoyo para visualizar las diferentes profundidades que se encuentran dentro de las lagunas (Figura 23).

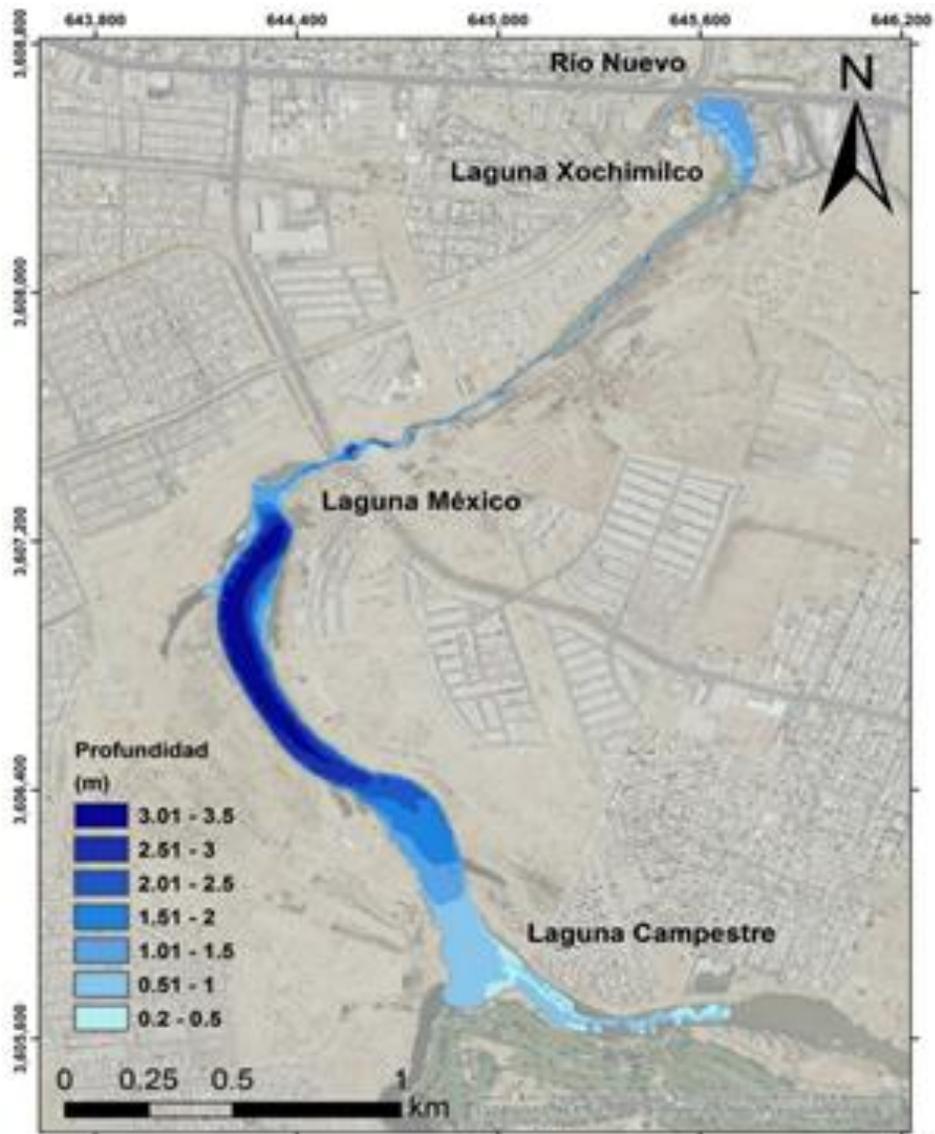


Figura 22. Modelo digital de profundidades del Sistema Lagunar

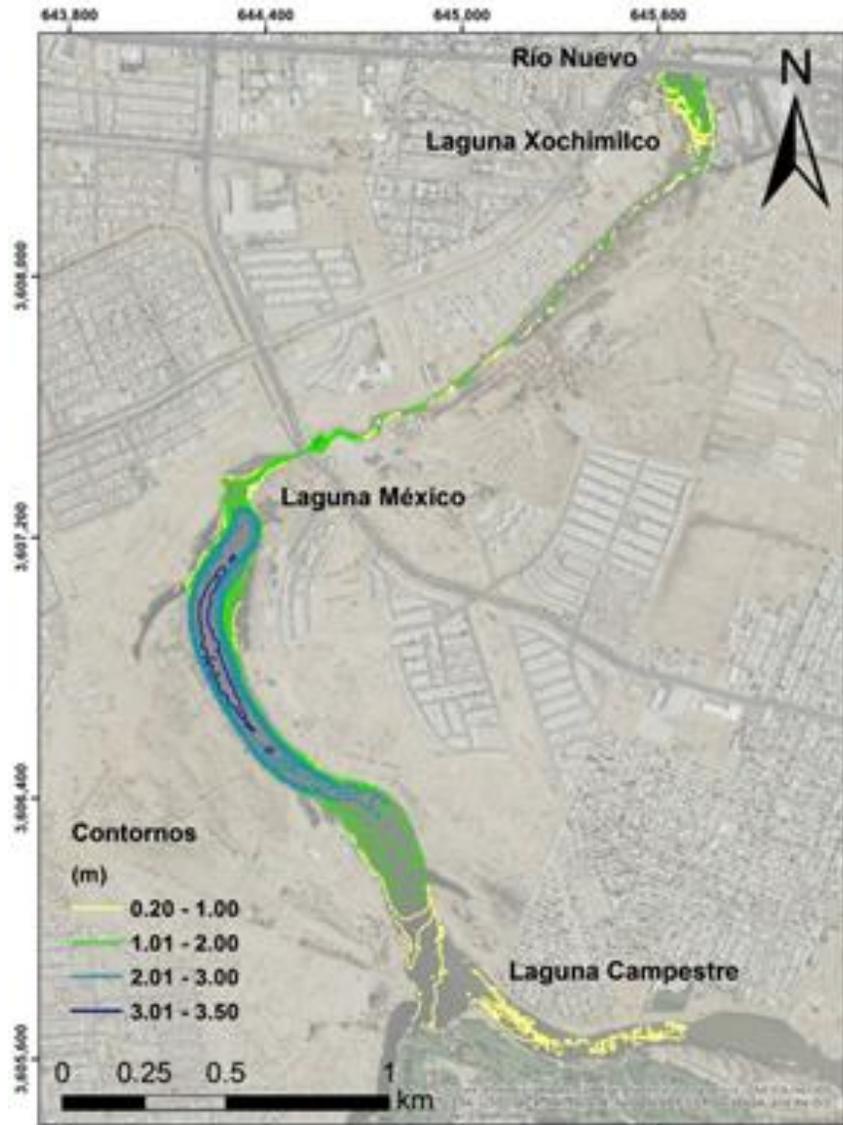


Figura 23. Mapa de contornos de profundidad

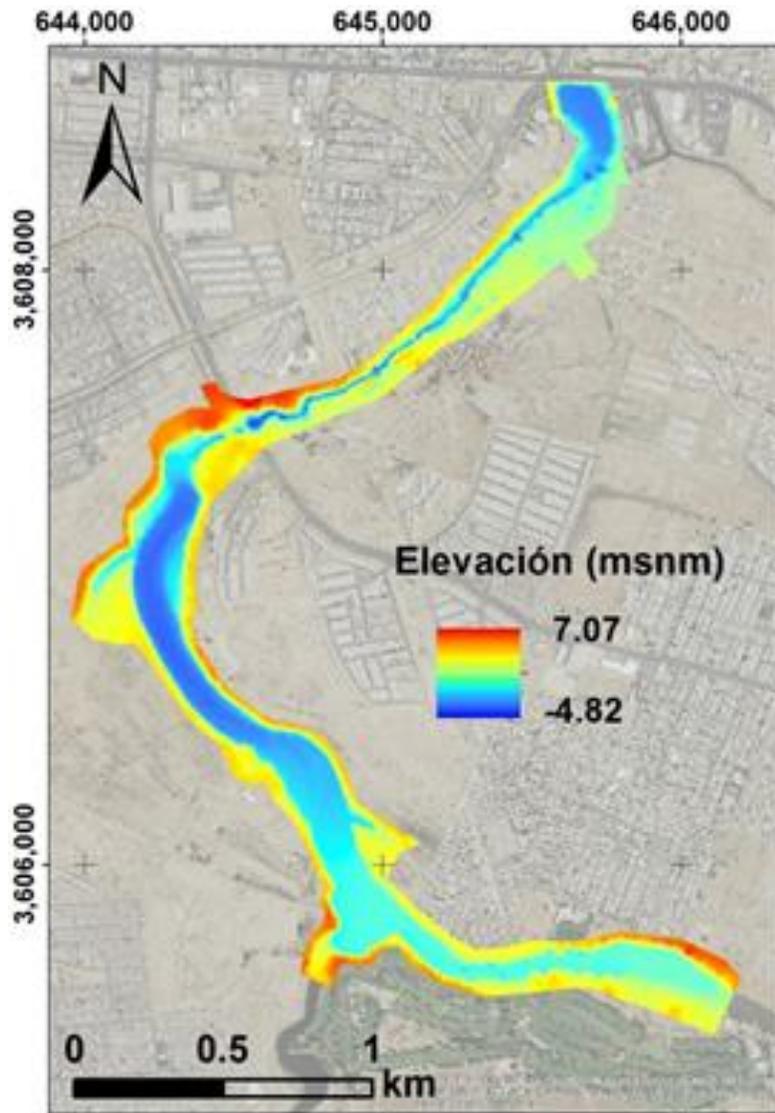


Figura 24. Modelo Digital de Terreno

Zonificación de los Servicios Ambientales en las lagunas mediante el apoyo de Sistemas de Información Geográfica.

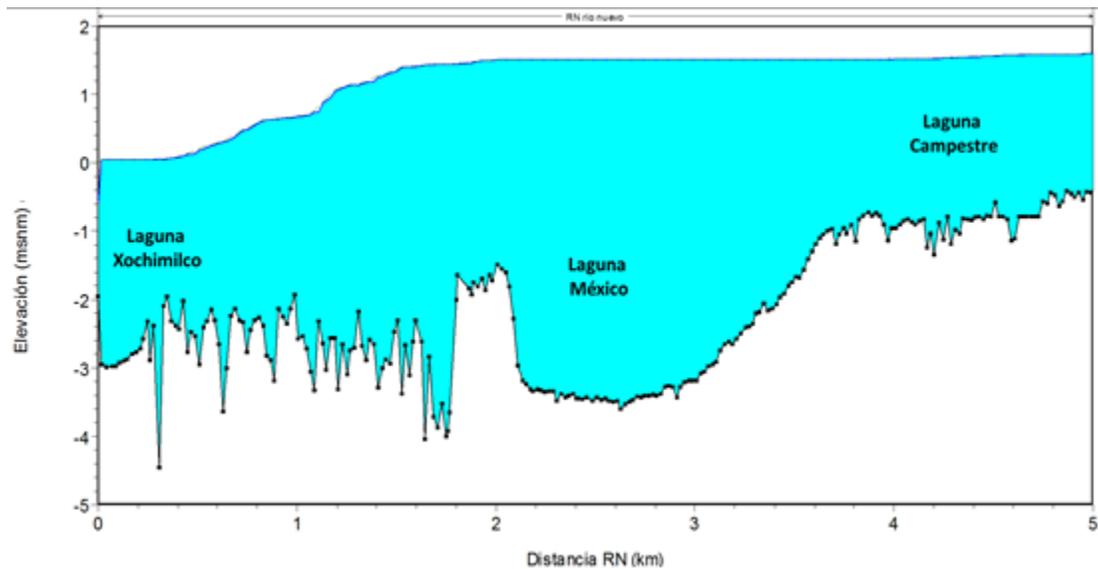


Figura 25. Perfil longitudinal del Sistema Lagunar

Para el cálculo de azolves, se realizó un raster de la topografía realizada en el año 2000 en un estudio previo y un raster generado por la topografía levantada por la UABC en 2016, y se realizó una resta entre el raster ambos en la figura 25, se observa un mapa donde se muestra el azolve en las lagunas, mayormente ubicado en el centro del canal. El volumen mayor de azolve se encuentre en la laguna México con un volumen de 93,034.49 m³ (Tabla 9).

Tabla 9. Volúmenes de azolve en el Sistema Lagunar

Laguna	Volumen de azolve actual (m ³)
Xochimilco	1,027.12
México	93,034.49
Campestre	32,214.17
Total	126,275.78

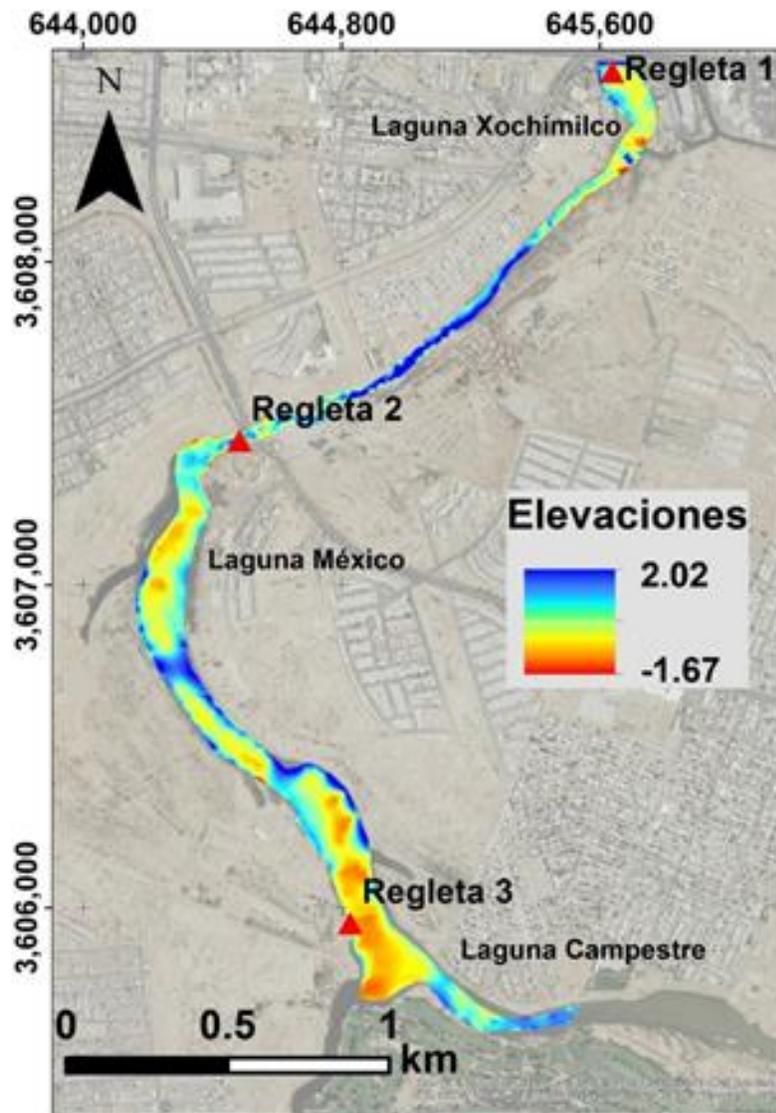


Figura 26. Azolves en el Sistema Lagunar

Para el cálculo de volumen de agua actual, se dividió por polígono a las lagunas para analizar el nivel de agua que le corresponde a cada una de ella. El cálculo se realizó con las herramientas de un SIG, en la Tabla 10, se muestra el volumen de cada una de las lagunas y un volumen total de 539,065.75 m³, se puede observar que la laguna México tiene una capacidad del 81.94% del total.

Tabla 10. Volumen de almacenamiento del Sistema Lagunar.

Laguna	Elevación espejo de agua	Volumen de agua actual (m ³)	%
Xochimilco	-1.543	35,692.17	6.62
México	-0.239	441,714.29	81.94
Campestre	-0.160	61,659.29	11.44
	Total	539,065.75	100

Actualmente en el Sistema Lagunar, se presentan afectaciones por residuos de la construcción y demolición (RCD) y residuos sólidos urbanos (RSU) (Figura 27), de hecho, el centro de transferencia de RSU, se encuentra a la vera de la Laguna Xochimilco. Así mismo actualmente no hay actividades recreativas o deportivas en el área. Por lo que es claro que el principal servicio ecosistémico que brinda el sistema lagunar a los habitantes de la ciudad de Mexicali es el de regulación, sin embargo, el área es propicia para un plan de recuperación.

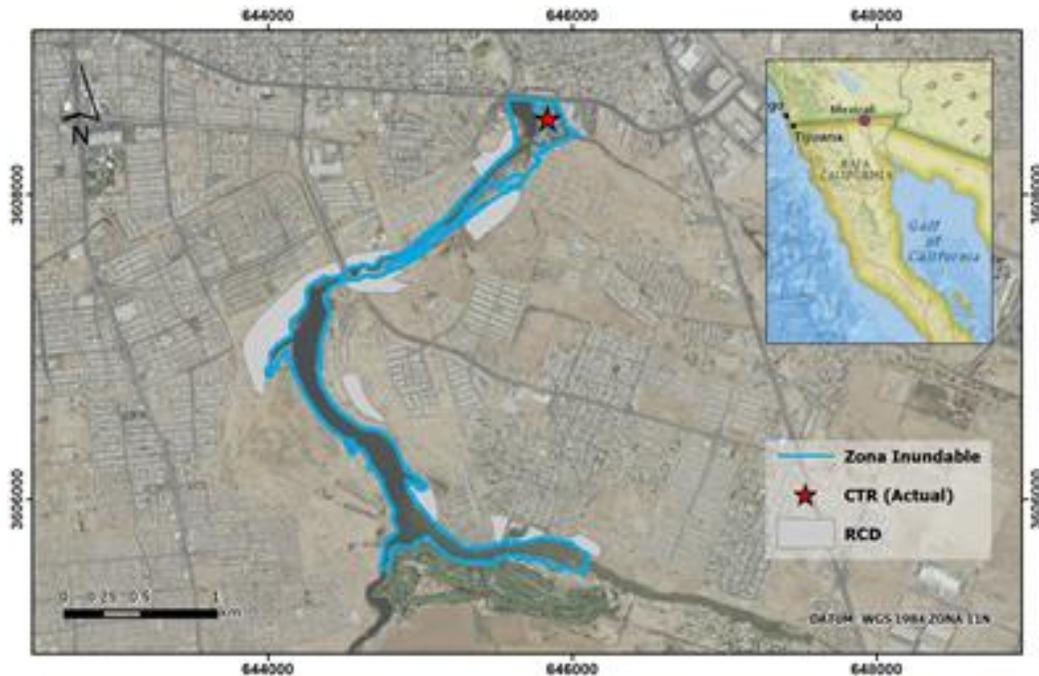


Figura 27. Centro de transferencia y afectaciones por residuos de la construcción y demolición (RCD) en el Sistema Lagunar.

Conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones teóricas

Para resolver los problemas derivados de la optimización de los planes de desarrollo, los planificadores urbanos buscan una variedad de formas para buscar la mejor opción basada en las previsiones del resultado de cada alternativa analizada, en este contexto es en el que esta investigación, pretende incidir al enfocar la hidrología urbana y la modelación hidrodinámica como una herramienta de vital importancia entre desarrollo urbano, gestión de riesgo, servicios ecosistémicos, medio ambiente y bienestar social. Por lo que es necesario pasar de un enfoque disciplinario ya sea desde el punto de vista de las ciencias sociales o de las ciencias naturales, como tradicionalmente se viene realizando, a un enfoque holístico, que resuelva integralmente los procesos de planeación urbana, logrando incidir en la mejora de la calidad de vida de la población, disminuir el riesgo de inundación y coadyuvar en la protección del medio ambiente.

Desde el punto de vista teórico la mayor aportación de este trabajo es la implementación de estudios de la hidrología urbana y la hidrodinámica de la cuenca, como herramienta del proceso de planeación enfocado en la gestión de riesgo.

Conclusiones Metodológicas

Metodológicamente este trabajo es el primero con estas características que se realiza en la zona de estudio acoplando un modelo hidrológico con uno hidráulico, utilizando el ARF con el enfoque en los L-momentos como punto de partida. En cuanto a la metodología propuesta, encontramos necesario proveer al modelo hidrológico de una herramienta fiable que solvete la falta de datos de una zona con pocas estaciones climatológicas y registros históricos de información, condición que es aplicable a la mayoría de los países en desarrollo. Además, resulto ser una herramienta útil en el procesamiento de datos y permite dar mayor certeza en el proceso de identificar los cuantiles de los periodos de retorno y estimar la altura de la precipitación, misma que fue base del modelo hidrológico. Por lo que se espera sirva de referencia para análisis posteriores.

Cabe hacer mención que el manejo de la información del SIG mediante las extensiones HEC-GeoRAS y HEC-GeoHMS, permitió llevar a cabo la preparación de los datos de entrada para el acoplamiento del modelo hidrológico HEC-HMS con el modelo hidráulico en HEC-RAS. El resultado de este acoplamiento de modelos en la región semiárida de la cuenca transfronteriza del Río Nuevo es relevante por ser la primera vez que se realiza. El acoplamiento del modelo hidrológico e hidráulico disminuye los errores al manejarse por separado, lo que según el estado del arte es lo más común en los estudios de este tipo, por lo tanto, se espera que sea la base para futuros análisis hidrológicos e hidráulicos de la zona, así como su incorporación a los planes de desarrollo de la ciudad, debido a que se puede llevar el análisis a un nivel de detalle de microcuenca, a fin de dotar a la planeación urbana de una poderosa herramienta que permita zonificar las áreas propensas a contar con obras de mitigación.

El acelerado crecimiento de la ciudad es condicionante en el incremento de sitios impermeables de la zona urbana y del volumen de descarga de la escorrentía. Por lo cual, se recomienda evaluar y ajustar periódicamente el CN por microcuenca según la metodología propuesta en este trabajo, con especial atención en las zonas aledañas a los escurrimientos principales dentro del núcleo urbano.

La metodología propuesta para afinar el CN, mediante un SIG, abstrayendo los diferentes tipo de uso de suelo, dentro de una zona que nominalmente pertenecería a un tipo predominante según los manuales, es una herramienta útil, para utilizarse sobre todo dentro de las zonas urbanas que por su dinámica de crecimiento cambian constantemente, aumentando el grado de error en el cálculo de los escurrimientos.

Conclusiones físicas.

Si bien es cierto que el aumento en la magnitud de la precipitación en los periodos de retorno de 20, 50, 100 y 500 años, generaron aumentos en el volumen de descarga, el área de inundación no se incrementó significativamente, esto debido a que el cauce principal del Río Nuevo se encuentra definido por taludes pronunciados en sus márgenes este y oeste.

Por lo tanto, la amenaza más significativa identificada en un evento extremo de precipitación, se relaciona con la profundidad del agua que alcanzan alturas de 4.80 m para el TR de 20 años hasta 6.0 metros en un TR de 500 años. Cabe mencionar que el incremento de profundidad durante estos eventos representan una amenaza, ya que en el área se ha desarrollado infraestructura vial; asentamientos humanos; edificios públicos y privados que albergan actividades de gobierno, y centros educativos.

Otra afectación inmediata se presenta en las vialidades que conectan la ciudad de este a oeste y que intersectan con el Río Nuevo, ya que se observó en los mapas de inundación una discontinuidad vial que divide a la ciudad en dos partes dificultando la comunicación. Este fenómeno se presenta en cualquiera de los 4 periodos de retorno analizados. Por otro lado se propone llevar a cabo este

análisis a nivel de microcuenca, para establecer el nivel de encharcamiento e inundación en diferentes partes de la ciudad.

Además, se propone analizar el comportamiento hidráulico del embovedado del Río Nuevo, integrándolo como parte de las variables de entrada del modelo a fin de optimizar los resultados obtenidos en HEC-RAS.

En el caso de los servicios eco-sistémicos del complejo lagunar, es evidente que actualmente este sistema provee a la ciudad de un servicio de regulación, que permite controlar en condiciones normales el caudal aguas abajo del río. Sin embargo además de lo anterior el área del sistema lagunar ha sido uno de los recursos naturales de mayor interés para la comunidad de Mexicali, y este interés se ve manifestado en las distintas actividades enfocadas en la restauración de la zona buscando el resguardo del hábitat de las diversas especies de aves que migran anualmente.

Por lo anterior y con la finalidad de aprovechar el potencial de los múltiples servicios ecosistémicos que pueden brindar los humedales, particularmente el sistema lagunar de Mexicali y con el afán de propiciar su recuperación y conservación mediante la rehabilitación total del sistema lagunar sería conveniente favorecer el frecuente convivio de la población, habilitando un área recreativa y deportiva, a su vez promover el cuidado del medio ambiente de la zona y mejorar la calidad de vida de los habitantes de la ciudad de Mexicali.

Finalmente, los resultados de esta investigación podrán ser utilizados por los planeadores urbanos, autoridades municipales, estatales, federales, sistemas de protección civil y la sociedad en general, a fin de planificar acciones que den soluciones integrales a la gestión de los riesgos asociados con inundaciones súbitas, así como el aprovechamiento de los servicios eco-sistémicos de la zona urbana de Mexicali.

Referencias bibliográficas

Alaghmand, S., Abdullah, R., Abustan, I., & Vosoogh, B. (2010). GIS-based River Flood Hazard Mapping in Urban Area (A case of Study in Kayu Ara River Basin, Malasya). *International Journal of Engineering and Technology* Vol.2, 488-500.

Álvarez-Enjo, M. A. (Enero de 2000). Análisis regional de frecuencia aplicado a las precipitaciones máximas y avenidas. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.

Dewan, T. (2015). Societal impacts and vulnerability to flood-frequency analysis Blangadesh and Nepal. *Weather and climate extremes*.

Francisco. SS. (2015). *Laudato si´*. Carta Encíclica. Ciudad del Vaticano: http://w2.vatican.va/content/francesco/es/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html

Garza. G." Planeación urbana en México en periodo de crisis (1983-1984). *Estudios demográficos urbanos*. Num 1, El Colegio de México. México 1986.

González, M. Á., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J. V., & López, J. J. (2012). Análisis del modelo HEC-HMS para la simulación de las avenidas del río Arga en Pamplona. *Agua y Ciudad*.

Heimhuber, V. (December de 2013). *GIS Based Flood Modeling as Part of an Integrated Development Strategy for Informal Settlements*. Tesis. Munich: Technische Universität München.

Hernández Uribe, R., Barrios Piña, H., & Ramírez, A. (2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y ciencias del agua*, 5-25.

Hernández-Guarín, W. T., & Moreno-Vivas, P. X. (2017). *Regionalización de sequía hidrológica en la cuenca del río Bogotá a partir del método de I-momentos*. Bogotá, Colombia: Universidad de santo tomas.

Imperial County. (2007). *Imperial County Flood Management Plan*. Imperial County.

Instituto de Estadística, Geografía e Informática. (2010). *Imagen Lidar*.

López, J. J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., José, V., & Gimena, F. N. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y Proyectos*, 15-30.

Magaña-Hernández, F., Bá, K., & Guerra-Cobián, V. H. (2013). Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencia*, Vol. 47, 739-752.

Maksimovic, C. (2001). *Urban drainage in arid and semi-arid climates*. Paris: UNESCO.

Malekinezhad, H., & Zare-Garizi, A. (2014). Regional frequency analysis of daily rainfall extremes using L-moments approach. *Atmósfera*, 411-427.

NRCS (Natural Resources Conservation Service). (1986). Technical release number 55. Washington, DC. U.S. Department of Agriculture.

Núñez Cobo, J., Verbist, K., Ramírez Hernández, J., & Hallack Alegría, M. (2010). Guía metodológica para la aplicación del análisis regional de frecuencia de sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en américa latina. Montevideo, Uruguay: UNESCO.

Ouma, Y., & Tateishi, R. (2014). Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. *Water*, 2073-4441.

Parhi, P., Sankhua, R., & Roy, G. (2012). Calibration of channel roughness for Mahanadi River (India), using HEC-RAS model. *Journal of Water Resource and Protection*, 847.

Patel, K. (2009). *Watershed modeling using HEC-RAS, HEC-HMS, and GIS models—A case study of the Wreck Pond Brook Watershed in Monmouth County, New Jersey*. New Brunswick. Rutgers the State University of New Jersey.

Pourreza Bilondi, M., Samadi, s., Akhoond Ali, A., & Ghahraman, B. (2016). Reliability of semiarid flash flood modeling. *Journal of hydrologic engineering*.

Rodríguez S., E. A., González P., R. A., Medina N., M. P., Pardo C., Y. A., & Santos R., A. C. (2007). Propuesta Metodológica para la generación de mapas de

inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de estudio en la parte baja del Río Las Ceibas (Neiva-Hulia). *Avances en Recursos Hidráulicos*, 65-78.

Rodríguez-Burgueño, J. E., Shanafield, M., & Ramírez-Hernández, J. (2017). Comparison of infiltration rates in the dry river bed of the Colorado River Delta during environmental flows. *Ecological Engineering*, 675-682.

Schaefer, M. G., Barker, B. L., Taylor, G. H., & Wallis, J. R. (2008). Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping of 24-hour precipitation for Oregon. Washington D.C: Oregon Department of Transportation.

Schaefer, M., Barker, B., Taylor, G., & Wallis, J. (2006). Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping of precipitation for 24-hour and 2-hour durations in eastern Washington. Washington State Department of Transportation.

Sivakumar, M., Das, H., & Brunini, O. (2005). Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. *Climate change*, 31.

The Salton Sea Authority. (2015). www.sci.sdsu.edu. Obtenido de The Salton Sea: www.sci.sdsu.edu/Salton%20sea%20description.html

Trivedi, A., Singh, A., & Indian, A. (2015). Analysis of key factors for waste management in humanitarian response: An interpretive structural modelling approach. Institute of management.

U.S Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2012). Colorado River Basin Water Supply and Demand Study. The U.S. Department of the Interior.

US Army Corps of Engineers. (2016). HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 5.0. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. User Manual.

Vargas-Castañeda, G., Ibañez-Castillo, L. A., & Arteaga-Ramírez, R. (2015). Development, classification and trends in rainfall-runoff modeling. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*.

Wang, M., Zhang, L., & Baddo, T. D. (2016). Hydrological Modeling in a Semi-Arid Region Using HEC-HMS. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*, 105-115.

Wolfs, V., Meert, P., & Willems, P. (2015). Modular conceptual modelling approach and software for river hydraulic simulations. *Environmental Modelling and Software*, 2-50.

Zema, D. A., Labate, A., Martino, D., & Zimbone, S. M. (2016). Comparing different infiltration methods of the HEC-HMS model: The case study of the Mésima torrent. *Land Degradation & Development*.