

---

# VALORACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL DERIVADO DE LOS PROCESOS DE URBANIZACIÓN EN LAS INMEDIACIONES DEL RÍO TIJUANA, MÉXICO

---

Manuel Gutiérrez, Alejandro Sánchez-Atondo, Alejandro Mungaray-Moctezuma y Julio Calderón

## RESUMEN

*La expansión de las ciudades y concentración de cada vez más población en ellas requiere obras de urbanización que producen transformaciones del medio natural, tales como el aumento de área impermeable por reducción de la superficie de cobertura vegetal y la disminución de recarga de los acuíferos. El presente trabajo discute las implicaciones del crecimiento histórico de la mancha urbana de Tijuana, centrando su atención en el impacto social y ambiental de estas modificaciones sobre las*

*márgenes del Río Tijuana - Arroyo Alamar. Asimismo, se lleva a cabo para la Cuenca del Río Tijuana un análisis regional de frecuencias basado en la metodología de L-momentos para estimar la recurrencia de episodios de sequía meteorológica, y la lluvia esperada para diferentes periodos de retorno. La información expuesta representa un insumo para la elaboración de planes de manejo de los recursos hídricos disponibles en la región, así como el desarrollo de ciudades resilientes y sustentables.*

---

## Introducción

La región transfronteriza Tijuana-San Diego ha desarrollado amplias relaciones a lo largo del tiempo. Destacan los cruces fronterizos por fines comerciales y de consumo que registran  $60 \times 10^6$  viajes anuales en promedio tan solo por la garita de San Ysidro (BTS, 2020). Por otro lado, esta región comparte recursos como el traspase de ríos entre México y Estados Unidos de América (EUA) y aspectos de calidad del aire que motivan a la elaboración conjunta de planes de desarrollo fronterizo (SANDAG, 2014).

Así, el crecimiento urbano de Tijuana ha estado estrechamente relacionado a la condición fronteriza de esta ciudad y su relación con California, EUA, exhibiendo faltas de regulación y control en las políticas de uso de suelo. En este sentido, el

presente trabajo discute diversos impactos sociales y ambientales del acelerado proceso de urbanización de Tijuana, así como las implicaciones que este tiene en los actuales procesos de planeación urbana, tanto a nivel local como transfronterizo, en donde una perspectiva de resiliencia es fundamental. El trabajo se organiza en tres apartados. En el primero, se presentan las etapas de expansión urbana de Tijuana, el acelerado aumento de la población, así como la presencia cíclicamente de personas desplazadas/migrantes sobre las márgenes del Arroyo Alamar-Río Tijuana (RT), y su vulnerabilidad ante eventos extremos de precipitación. En la segunda parte se explican estas afectaciones a la población referida en función de la hidrología urbana de Tijuana y una combinación de aspectos climatológicos, topográficos, características y uso del suelo de la Cuenca

del Río Tijuana (CRT). Finalizando con una serie de obras civiles llevadas a cabo para disminuir las afectaciones por inundaciones en las inmediaciones del cauce. En un tercer apartado, debido a que la CRT se encuentra en una región semiárida, se realiza un análisis de frecuencias con el propósito de identificar episodios de sequía en la cuenca y estimar la lluvia esperada para diferentes periodos de retorno. Se concluye con una serie de reflexiones y recomendaciones sobre los impactos que derivan de la urbanización y la necesaria resiliencia de las ciudades ante eventos extremos de precipitación y sequía.

## Conformación histórica del sistema urbano de Tijuana

La Cuenca del Río Tijuana es un sistema ambiental transfronterizo en el que dos terceras

partes se encuentran en México y una tercera parte en EUA. En esta unidad territorial viven y desarrollan sus actividades poco más de 1.679.145 de personas (COLEF, 2018). La CRT presenta discontinuidades en la administración de sus recursos hídricos, inicialmente establecida por el tratado de Guadalupe-Hidalgo en 1848, cuando México vende territorio a Estados Unidos, generando dos administraciones totalmente distintas para la cuenca, pues del lado americano la preservación del medio ambiente y los recursos naturales es parte de las estrategias del desarrollo, ejemplo de ello es la reserva del Estuario del Río Tijuana, que ha sido considerada un referente en preservación de humedales. Por su parte, del lado mexicano el crecimiento de la ciudad de Tijuana se ha dado de forma desordenada y vertiginosa por efecto de la

---

## PALABRAS CLAVE / Cuenca del Río Tijuana / Impacto Ambiental / Inundación / Procesos de Urbanización / Sequía /

Recibido: 23/11/2020. Aceptado: 04/05/2021.

**Manuel Gutiérrez.** Doctor en Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), México. Profesor-Investigador Facultad de Ingeniería, UABC, México. <https://orcid.org/0000-0001-8371-7354>.

**Alejandro Sánchez-Atondo.** Doctor en Ciencias, Universidad

Autónoma de Baja California (UABC), México. Profesor-Investigador Facultad de Ingeniería, UABC, México. <https://orcid.org/0000-0003-1313-3200>.

**Alejandro Mungaray-Moctezuma** (Autor de correspondencia). Doctor en Ingeniería de Caminos,

Universidad de Castilla-La Mancha, España. Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería, UABC, México. <https://orcid.org/0000-0003-0437-7238>. Dirección: Unidad Universitaria. Benito Juárez S/N esq. Ignacio López Rayón, Mexicali, Baja California, México.

e-mail: [alejandromungaray@uabc.edu.mx](mailto:alejandromungaray@uabc.edu.mx).

**Julio Calderón.** Doctor en Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), México. Profesor-Investigador Facultad de Ingeniería, UABC, México. <https://orcid.org/0000-0003-2841-0127>.

## ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL AND SOCIOECONOMIC IMPACT DERIVED FROM URBANIZATION PROCESSES IN THE VICINITY OF THE TIJUANA RIVER, MEXICO

Manuel Gutiérrez, Alejandro Sánchez-Atondo, Alejandro Mungaray-Moctezuma and Julio Calderón

### SUMMARY

*Expansion of cities and the concentration of more and more population in them requires urbanization works that produce transformations of the natural environment such as an increase in the impervious area due to the reduction of the surface of vegetation cover and the reduction of recharge of aquifers. This paper discusses the implications of the Tijuana urban area's historical growth, focusing its attention on these modifications' social and environmental impact on the banks of the*

*Tijuana River - Arroyo Alamar. Likewise, a regional frequency analysis based on the L-moments methodology is carried out for the Tijuana River Basin to estimate the recurrence of meteorological drought episodes with expected rainfall for different return periods. The information presented represents an input in preparing management plans for the available water resources in the region and the development of resilient and sustainable cities.*

## VALORAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL E SOCIAL DERIVADO DOS PROCESSOS DE URBANIZAÇÃO NAS IMEDIAÇÕES DO RIO TIJUANA, MÉXICO

Manuel Gutiérrez, Alejandro Sánchez-Atondo, Alejandro Mungaray-Moctezuma e Julio Calderón

### RESUMO

*A expansão das cidades e concentrações cada vez maiores de suas populações, exigem obras de urbanismo que provocam transformações do meio natural tais como o aumento da área impermeável devido à redução da superfície de cobertura vegetal e diminuição da recarga dos aquíferos. O presente artigo discute as implicações do crescimento histórico da área urbana de Tijuana, considerando principalmente o impacto social e ambiental de estas modificações sobre as margens do Rio Tiju-*

*ana - Arroio Alamar. De igual forma, é realizada uma análise regional de frequências baseada na metodologia de L- para a Bacia do Rio Tijuana com o fim de estimar a recorrência de episódios de seca meteorológica e a expectativa de chuva para diferentes períodos de retorno. A informação exposta representa um insumo para a elaboração de planos de gestão dos recursos hídricos disponíveis na região, bem como para o desenvolvimento de cidades resilientes e sustentáveis.*

explosión demográfica y los flujos migratorios. Esta acelerada expansión del área urbana y acciones antropogénicas sobre el territorio a lo largo del tiempo han modificado la función original de la cuenca y han generado impactos negativos al suelo, la calidad del aire y la disponibilidad de agua en Tijuana.

En las primeras décadas del siglo XX, la modificación del medio natural no se dio tanto por la actividad agrícola o ganadera, sino principalmente por factores demográficos y procesos mercantiles, que detonaron exponencialmente la llegada de nuevos negocios y visitantes extranjeros (Piñera-Ramírez y Ortiz-Figueroa, 1989). La primera estructura urbana se estableció alrededor del punto de comunicación con EUA y la población allí asentada se dedicaba a la actividad económica terciaria y de servicios. En el año 1933, con la declaración de

‘zona libre para la industrialización’, se impulsó a Tijuana como ciudad económicamente emergente, con un flujo continuo de capital mercantil y humano, por lo que cada vez más personas emigraban hacia la ciudad, atraídas por mejores condiciones de vida, así como el intercambio comercial y cultural entre las dos partes de la frontera que explicaban su desarrollo económico. Entre 1920 y 1950 el crecimiento poblacional se dirigió hacia el este y sureste de la cuenca ascendiendo sobre los cerros y cañadas de manera concéntrica (Hernández y Rabelo, 2009). Con la construcción de la Presa Abelardo L. Rodríguez en el año 1936, para garantizar el abastecimiento de agua potable también se promovió el desarrollo del distrito de riego agrícola a lo largo del RT (Piñera-Ramírez y Ortiz-Figueroa, 1989). Este cauce representó un elemento de discontinuidad

urbana, que segregaba los asentamientos humanos e industriales, los cuales se incrementaron de forma vertiginosa entre los años 1950-1970. Debido a factores tales como la consolidación del sector manufacturero entre Tijuana y San Diego, el bajo nivel de mediación técnica y jurídica del Estado sobre la regulación del uso de suelo urbano, y la especulación sobre el valor de la tierra, se propició la venta masiva de terrenos ejidales contiguos al cauce antes destinados a la actividad agrícola, para la construcción de fraccionamientos (Hernández y Rabelo, 2009). Esta etapa de la expansión de la ciudad entre 1950-1970 representa la de mayor extensión territorial (Figura 1) y, asimismo, revela un patrón preocupante en el que a mayor crecimiento concéntrico existía mayor marginación y cantidad de asentamientos informales, en su mayoría de migrantes y

población en situación de pobreza.

A partir de los años 70 gracias al Programa de Industrialización Fronteriza se consolidó y diversificó la actividad económica de Tijuana. Nuevamente este hecho repite los ciclos migratorios que han venido presentándose históricamente. Con ello, se observaron esfuerzos del gobierno por intervenir como regulador-promotor del suelo y urbanización de la ciudad (Ranfla González y Álvarez, 1986). Un ejemplo de esto fue la urbanización en 1972, de 400ha en la zona del RT, cuando se desalojaron los enclaves irregulares que se establecieron a las orillas del río en 1963; estas familias fueron reasignadas a fraccionamientos periféricos bajo un esquema urbano regulado (Hernández y Rabelo, 2009). Durante el período 1970-1984, se manifestaron los resultados de las políticas urbanas de dirigir la

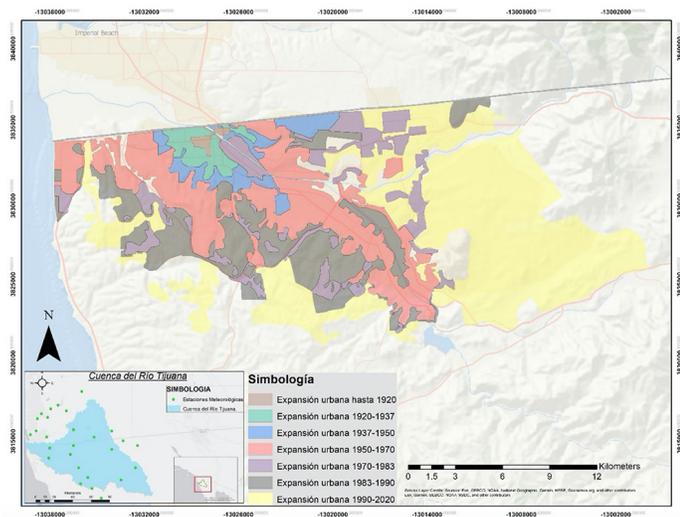


Figura 1. Crecimiento histórico de la ciudad de Tijuana.

expansión de la ciudad hacia terrenos menos accidentados en el este y sureste, persistiendo algunos asentamientos informales en zonas geográficas no aptas para la vivienda (Alegría, 2011). La expansión de Tijuana en la actualidad continúa hacia el este (Figura 1), e históricamente responde a la concentración poblacional y la actividad económica de la ciudad. En este sentido, se destacan momentos claves que han influido en esta expansión. En primera instancia, se señala que de acuerdo con el censo de 1940 se registraron 21.997 habitantes; es aquí cuando motivados por el programa ‘Bracero’ comenzó el desplazamiento de mexicanos hacia la frontera y en 1950 la población alcanzó un total de 59.962 (Herzog, 1990). La etapa de explosión demográfica se suscita a partir de 1960, pues de 165.590 habitantes, pasó a 333.125 en 1970, e intempestivamente alcanzó 600.000 habitantes en 1976 (Padilla, 1994), cerrando la década en torno a 800.000 habitantes. Posteriormente, en el censo del año 2000 se contabilizaban un total de 1.352.035 habitantes; alcanzando 1.751.430 habitantes en 2010 y para el 2015 Tijuana superaba los 1.840.710 habitantes. La tasa de crecimiento medio anual ha mostrado una tendencia a la baja, pues de un valor de 5,5% en la década de 1990-2000,

desciende a 2,54% entre los años 2000-2010, y finalmente en la década reciente exhibe un crecimiento medio anual de 1,56% en promedio y una densidad media urbana de 85hab/ha (CONAPO, 2018).

### Hidrología urbana en la Cuenca del Río Tijuana

La Cuenca del Río Tijuana tiene un área total de 4.532km<sup>2</sup>, su sistema de elevaciones va desde 1994msnm hasta el nivel del mar, el 75% de la precipitación escurre hacia los municipios de Tijuana y Tecate, Baja California, México. Los principales tributarios de la cuenca son el Cottonwood Creek (EUA), Pine Creek (EUA) y el sistema del Río Las Palmas y Río Tijuana (México); este último conduce el agua hacia el Estuario del Río Tijuana en Estados Unidos, el cual alberga 30% de especies endémicas y en peligro de extinción. El clima de CRT es mediterráneo, con temperaturas medias anuales que oscilan de 8 a 18°C y precipitación promedio entre 150 y 650 mm/año (SDSU, 2005). En el caso específico de Tijuana, se registran 239mm de lluvia en promedio anual, cifra que fue superada en los años de 1931 (401,5mm), 1933 (426,7mm), 1941 (401,0mm) 1965 (413,5mm), 1978 (456,7mm), 1983 (440,6mm), 1993 (470,4mm) y 1998

(495,6mm) (Rodríguez Esteves, 2007). Este escenario de lluvia representa un riesgo de inundaciones y deslave en cerros por saturación de taludes, lo que afecta principalmente asentamientos irregulares en condición de marginación. De hecho, derivado de los estragos de estos eventos el cruce fronterizo internacional se trasladó al extremo noroeste del RT, donde permanece en la actualidad.

El río Cottonwood Creek continúa su curso en México a través del Arroyo Alamar, que es uno de los afluentes del RT, el cual regresa el agua de nuevo a Estados Unidos. El RT, como se mencionó anteriormente, ha sido un elemento que ha definido el crecimiento de la mancha urbana de Tijuana y también ha sido objeto de distintas obras civiles como su encauzamiento, canalización, revestimiento de concreto en distintas etapas, puentes y vialidades que corren paralelas al río. Dichas obras, incluyendo la construcción de la presa Abelardo L. Rodríguez, han buscado resolver los problemas ocasionados por fuertes avenidas en época de lluvias, inundaciones y del desbordamiento del RT a lo largo del tiempo, así como salvaguardar la vida de miles de familias asentadas de manera informal en las inmediaciones del cauce.

Para la década de los 80 solo 20% del área de la cuenca era utilizada para la agricultura. Sin embargo, la situación migratoria de la década de los 90 que se asentó en las periferias de la ciudad desplazó la actividad agrícola hacia el sureste, en dirección a Valle de las Palmas, que a la fecha retiene su función natural. Entre 1972 y 1994 se perdieron casi 500ha, con un promedio 23ha al año (Ojeda-Revah y Espejel-Carbajal, 2008), tendencia que continúa en la actualidad.

El proceso y avance de la urbanización a lo largo del territorio de la cuenca incrementa la magnitud y la frecuencia de las inundaciones en cuatro aspectos: 1) creación de superficies altamente impermeables, 2) superficies hidráulicas suaves,

3) reducción de la capacidad de transporte de agua en el cauce y 4) saturación de los drenajes por escurrimientos de agua en el área urbana. El resultado se percibe sobre todo en los cañones y valles formados a escasos kilómetros del cauce. Asentamientos irregulares como en el caso del cañón Los Laureles y los correspondientes en el margen del arroyo Alamar son ejemplos de espacios altamente vulnerables, que de acuerdo a SDSU (2005) se caracterizan por el siguiente patrón: 1) régimen de lluvias ocasional pero intenso, 2) terreno formado por mesetas y cañones estrechos de laderas empinadas, 3) crecimiento urbano y pérdida de la vegetación natural, y 4) el sistema de desagüe urbano es inadecuado para tratar la escorrentía que generan las tormentas invernales intensas. Adicionalmente, Tijuana cuenta con altas pendientes en 25% de la superficie de la ciudad, lo que constituyen áreas de alto riesgo por la velocidad que pueden alcanzar las avenidas en lluvias intensas; asimismo existen más de 90 sectores que son propensos a inundación en zonas adyacentes a un cauce (Rodríguez Esteves, 2007). En el caso de zona de Los Laureles, además de ello presenta problemas de contaminación por residuos sólidos municipales, arrastre de sedimentos e incluso deslizamiento de taludes (IMTA, 2004).

Una situación similar de riesgo y vulnerabilidad ante eventos extremos de precipitación se ha dado en la región del arroyo Alamar, con asentamientos irregulares de familias y condiciones precarias de vivienda. La Figura 2 muestra las tres zonas que conforman la región del Alamar, la cual ha sido alcanzada e impactada por el fenómeno de conurbación alrededor del primer cuadro de la ciudad y la ubicación de las garitas internacionales, quedando las dos primeras zonas de este espacio natural inmersas entre complejos habitacionales y las actividades productivas de la dinámica ciudad de Tijuana. La zona 1 abarca desde la confluencia del río Tijuana

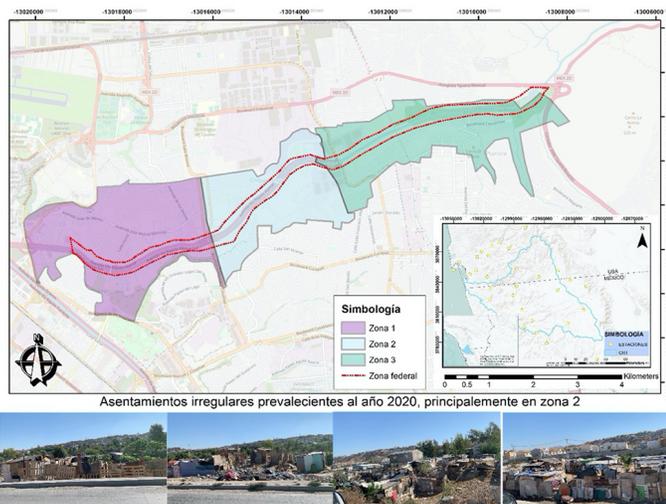


Figura 2. Zonas que integran la región Alamar y situación actual. Elaborada a partir de Moctezuma y Maldonado (2012).

(llamada Bocina) hasta el eje vial Manuel J. Clouthier, y se caracteriza por su amplia urbanización y muy alta densidad poblacional. La zona 2 es la de menor extensión y se encuentra delimitada por los ejes viales Clouthier y Héctor Terán Terán; cuenta con alta densidad poblacional y altos niveles de marginación. La zona 3 ubicada entre el eje vial Terán Terán y el Cañón del Padre es la de mayor extensión, aunque con baja densidad de población; concentra los más altos niveles de marginación de la región Alamar. La zona 3 es la única zona que aún no ha sido revestida de concreto, representa un espacio defendido por la sociedad civil y organizaciones ambientales, dada la riqueza riparia y diversas especies que alberga.

En la actualidad se han llevado a cabo proyectos de infraestructura en la zona 1 y 2 del Alamar, los que modificaron la función natural del arroyo y dejarían de infiltrar un volumen medio anual de  $3,01 \text{ hm}^3$  (Ponce 2001), debiendo recargar el acuífero por medios manuales. Cabe señalar que estos proyectos se dieron prácticamente de manera obligada, derivado de los procesos de urbanización que habían impactado estas zonas, las cuales requerían obras como puentes y nodos viales para comunicar

eficientemente la ciudad separada por el cauce existente. Adicionalmente, con la operación de la garita internacional de Otay II se atrajeron 43.000 camiones de carga que requieren pasar por la región Alamar para el traslado de mercancías hacia San Diego y para redistribuir el tráfico de Tijuana (Mungaray-Moctezuma *et al.*, 2012). Por otra parte, motivados por el riesgo ante inundaciones, se desalojaron asentamientos irregulares y marginales en torno a la zona federal del cauce, llevándose a cabo proyectos como el 'Encauzamiento del arroyo Alamar y construcción de la vialidad vía rápida Alamar del km 0+000 al km 10+205' buscando mantener un canal eco-hidrológico con cauce piloto de  $550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  y de  $1.720 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  para la sección completa. Aunque las zonas 1 y 2 ya se encontraban parcialmente impactadas por obras previas, era importante llevar a cabo las medidas de mitigación indicadas en el estudio de impacto ambiental de la vía rápida Alamar y proyectos asociados para la recuperación del sistema ambiental regional (GEBC, 2013), a través de proyectos complementarios pendientes como 'Arquitectura sustentable del arroyo Alamar, Tijuana' (Ponce *et al.*, 2004) con el propósito de generar un corredor ecológico y avanzar

hacia un desarrollo urbano sustentable en el que se recuperen espacios de áreas verdes para la sociedad. Por último, hay que considerar la situación de asentamientos irregulares prevalente al año 2020. La Figura 2 incluye fotografías de viviendas improvisadas al costado de la vía rápida Alamar, principalmente en la zona 2, los cuales, si bien tras estas obras son menos vulnerables ante inundaciones, por su condición de marginación requieren el diseño de políticas públicas para su atención.

### Análisis de eventos de sequía en la CRT

Se ha mencionado el acelerado proceso de urbanización en el cauce del Arroyo Alamar, así como proyectos de infraestructura para mitigar las afectaciones ante eventos de inundación; sin embargo, se debe tener en cuenta que este la CRT se encuentra en una región semiárida y enfrenta episodios recurrentes de sequía que recientemente han sido prolongados. En el caso de Tijuana, al comenzar a agotarse las reservas hidrológicas del Río Tijuana y no haber planeado las extracciones de agua de la Presa Abelardo L. Rodríguez (Padilla, 1994), la ciudad ha recibido agua desde el año 1983 a través de un acueducto de 167km de longitud desde la ciudad de Mexicali, a fin de cubrir las necesidades de su creciente población, situación que persiste a la fecha (Ramírez-Hernández, 2006).

La sequía es considerada como una de las amenazas naturales más importantes, debido a que pone en riesgo la disponibilidad de recursos hídricos para satisfacer las demandas humanas y del ambiente (Dracup *et al.*, 1980; Seth, 2005). Esto debe ser tomado en cuenta por las autoridades de gobierno y grupos de interés para desarrollar políticas públicas y soluciones de largo plazo que permitan afrontar los eventos extremos de sequía (Gocic y Slavisa, 2014). Cada vez con más frecuencia debido al cambio climático, es común

que una región sea abatida por distintos eventos extremos precipitación, alternándose periodos de sequía con altos volúmenes de precipitación asociados a fenómenos océano-atmosféricos extraordinarios como el Niño Oscilación del Sur (ENOS) y el periodo de retorno de estos eventos (Wilhite y Glantz, 1985; Cantos *et al.*, 2000).

Existen diferentes tipos de sequía, como la meteorológica, la hidrológica y la agrícola. La meteorológica es el resultado de la ausencia de precipitación; la hidrológica es a consecuencia de la meteorológica, por la deficiencia en el volumen de agua almacenado; la agrícola ocurre cuando, debido a la insuficiente humedad en el suelo, el abastecimiento de humedad para cultivos se ve reducido (Asadi Zarch *et al.*, 2015). Es posible que una región se encuentre abatida por uno o más tipos de sequía, lo que está relacionado con la severidad con que esta es percibida.

En este sentido, para entender las implicaciones que tiene la falta de regulación en los procesos de urbanización de Tijuana ante estos escenarios de sequía, se realiza un análisis regional de frecuencias basado en L-Momentos, ya que este permite estimar la recurrencia de episodios de sequía, incluyendo la intensidad y frecuencia de los eventos de lluvia. La intensidad de precipitación se refiere a las diferencias sucesivas de las medidas de precipitación acumuladas en un intervalo definido de tiempo, mientras que la frecuencia corresponde a la repetición de eventos característicos similares en intensidad y duración, la que se relaciona directamente con el periodo de retorno, es decir, el número de años que transcurre para que un evento se iguale o exceda (Pereyra-Díaz *et al.*, 2004).

El ARF L-m se lleva a cabo evaluando registros de precipitación históricos. El periodo de registro analizado fue de los años 1890-2015 a escala de tiempo anual, a partir de los totales mensuales de cada año en que estuvieron en operación

las estaciones. Se utilizaron registros de precipitación de un total de 30 estaciones meteorológicas de las cuales 15 están ubicadas en Estados Unidos y 15 en México. La fuente de los datos corresponde, del lado estadounidense de la cuenca, al Regional Climate Centers de los Estados Unidos (WRCC, 2016), que tiene registros disponibles desde 1850 hasta el presente; con respecto al lado mexicano de la cuenca los registros fueron proporcionados por Comisión Nacional del Agua, que datan de 1926 (CONAGUA, 2015). La Cuenca del Río Tijuana recibe el 85% de su precipitación durante los meses de noviembre a abril, por lo que se presentan veranos secos que se extienden desde mayo a octubre con marcada ausencia de lluvia. La Figura 3 presenta la precipitación media mensual característica de la zona de estudio.

El análisis regional de frecuencias basada en los L-momentos se basa en la metodología propuesta por Hosking y Wallis (1997), la cual consta de cuatro etapas: 1) preparación de los datos y control de calidad; 2) conformación de las regiones homogéneas; 3) selección de la distribución de probabilidad; y 4) estimación de cuantiles. Los L-momentos se definen como una combinación lineal de los estadísticos de orden que describen la ubicación, escala y forma de las distribuciones de probabilidad. Esta técnica permite realizar análisis robustos para el ajuste de distribuciones de probabilidad a un conjunto de datos y permite calcular la magnitud de la precipitación, asociado a un periodo de retorno. El procedimiento tiene como ventaja que compensa la carencia de información en el tiempo por su abundancia en el espacio (UNESCO, 2010), de tal manera que los valores estimados son confiables, incluso cuando los registros disponibles de precipitación tienen series de tiempo de corta duración o parcial; es decir, que la información de estaciones dentro de una región clasificada como homogénea se ve

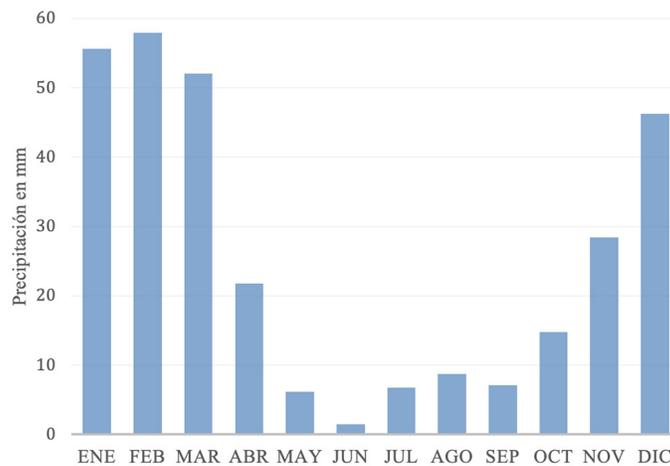


Figura 3. Precipitaciones mensuales en la cuenca del río Tijuana (CRT).

compartida y complementada por los registros de otras estaciones que pertenecen al sitio.

En la etapa de preparación de los datos y control de calidad se revisa la base de datos de estaciones climatológicas, para identificar errores de captura, así como parcialidades en las series de tiempo; este estudio conserva aquellas con un mínimo 15 años de registro. La conformación de las regiones homogéneas bajo la metodología de L-momentos agrupa las estaciones de regiones climáticamente homogéneas tras un proceso iterativo en el que se toman en cuenta la latitud, longitud, elevación, precipitación media anual y la discordancia de cada una de las estaciones respecto al grupo de estaciones de la región propuesta (Wallis *et al.*, 2007; Hallack-Alegría *et al.*, 2012). Con respecto a la discordancia, esta permite evaluar el grado en que los L-momentos de una estación se apartan significativamente del patrón de los L-momentos regionales, considerándose como discordantes valores superiores a 2,87 respecto al valor de referencia de la región analizada. Adicionalmente, se prueban las medidas de heterogeneidad H1, H2 y H3 de cada grupo de estaciones, para confirmar la homogeneidad de cada una de las regiones propuestas. H1 mide la variabilidad relativa del coeficiente de variación y es considerada como la medida

de heterogeneidad más importante de las tres; los estadísticos H2 y H3 corresponden a relaciones de L-momentos que describen asimetría y curtosis respectivamente. Se considera que una región es homogénea cuando los resultados de este procedimiento son  $\leq 1$ ; en contraste, valores  $\geq 2$  corresponden a regiones heterogéneas (Hosking y Wallis, 1997). En la selección de la distribución de probabilidad que mejor ajuste el conjunto de datos, se emplea la medida de bondad de ajuste  $Z^{DIST}$  a cinco distribuciones de tres parámetros, elegidas porque cumplen mejor el propósito de esta etapa: Pearson Tipo III (PE3), Generalizada Normal (GNO), Generalizada Logística (GLO), Generalizada Pareto (GPA) y Generalizada de Valores Extremos (GVE). Finalmente, la última etapa de estimación de cuantiles se basa en el procedimiento denominado 'Índice de Avenidas', que utiliza la función:

$$\widehat{Q}_1(T) = \lambda_1^i \widehat{q}(T) \quad (1)$$

donde  $\widehat{q}(T)$ : cuantil regional estimado, y  $\lambda_1^i$ : factor de escala, definido como la media regional de precipitación.

Como herramienta de apoyo para el análisis y procesamiento de los datos se utiliza el software L-RAP (MGS, 2008), y la información generada es representada mediante

sistema de información geográfica.

## Resultados

Se consideraron 30 estaciones climatológicas de 37 disponibles para la CRT; la reducción fue en base a los criterios expuestos para la etapa 1 del ARF L-m. Estas estaciones cumplieron satisfactoriamente todas las medidas de discordancia y heterogeneidad, dando lugar a la conformación de dos regiones climáticamente homogéneas. La región 1 se encuentra ubicada cerca de la costa que presenta elevaciones que van de moderadas a bajas, cuenta con 17 estaciones y una precipitación media anual (PMA) de 302,95mm; mientras que la región 2, se encuentra en la zona mediterránea-serrana de la cuenca y posee elevaciones de moderadas a altas, cuenta con 13 estaciones y tiene una PMA de 311,74mm. Las distribuciones de probabilidad que cumplieron con la prueba de bondad de ajuste  $Z^{DIST}$  en ambas regiones a escala anual fueron PE3, GNO y GVE. La Tabla I permite comparar los cuantiles estimados y elegir la distribución que mejor representa los volúmenes de lluvia esperados, que para este caso fueron los cuantiles de la distribución de probabilidad Pearson Tipo III (PE3). Adicionalmente, como PE3 procede de la distribución gamma, es posible hacer análisis complementarios para clasificar la severidad de sequía utilizando el índice SPI (Ruiz-Gibert *et al.*, 2020).

El ARF L-m para la CRT permitió determinar la probabilidad de no excedencia de precipitación respecto de la media anual, lo que se muestra en la Tabla I para los periodos de retorno (PR) de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. De acuerdo con esta información, en el caso del PR 20 años se espera en la región 1 por lo menos un evento tan bajo como 127mm de PMA, y para el mismo periodo de retorno se espera en la región 2 al menos un evento tan bajo como 115mm de PMA. La Figura 4 muestra la

TABLA I  
CUANTILES REGIONALES ESTIMADOS Y LLUVIA ANUAL ESPERADA EN CRT

Probabilidad de no excedencia	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5
Región 1 - PE3	0,30	0,34	0,42	0,50	0,62	0,93
Región 1 - GNO	0,27	0,32	0,41	0,51	0,63	0,93
Región 1 - GVE	0,26	0,32	0,41	0,51	0,63	0,93
Región 2 - GNO	0,23	0,28	0,36	0,45	0,57	0,89
Región 2 - PE3	0,28	0,31	0,37	0,44	0,56	0,89
Región 2 - GVE	0,21	0,26	0,36	0,45	0,58	0,90
Periodo de retorno (años)	100	50	20	10	5	2
<b>REGION 1 - PE3</b>						
Lluvia anual esperada (mm)	91	103	127	151	188	282
<b>REGION 2 - PE3</b>						
Lluvia anual esperada (mm)	87	97	115	137	175	277

distribución de precipitación anual estimada en la CRT para los periodos de retorno de 20 y 50 años.

Se puede observar los episodios de sequía se acentúan con mayor intensidad al paso del tiempo, y cabe señalar

adicionalmente que los mayores volúmenes de lluvia tienden a precipitarse sobre la parte estadounidense de la cuenca, que solo representa un tercio de esta, mientras que la mayor extensión ubicada en el lado mexicano tiende a captar volúmenes cada vez menores. Los resultados indican que las cantidades de lluvia esperadas para las próximas décadas disminuirán, particularmente en el escenario dentro de 20 años, cuando se esperan reducciones por debajo de la media anual actual. Dicha sequía meteorológica tiene el potencial de comprometer los recursos hídricos para uso humano, agrícola y ecosistémico, por lo que requiere de acciones en el corto plazo, tales como la desalación de agua de mar, la urgente recarga de acuíferos y planes de manejo de los recursos hídricos, para reducir las afectaciones derivadas de esta sequía.

impactos ambientales como la modificación de la función original de la CRT del lado mexicano y la ha sometido a una demanda intensa de recursos naturales. Es comprensible que las personas están migrando hacia las ciudades por múltiples factores como accesibilidad a empleo, educación y servicios, trayendo consigo grandes retos para el funcionamiento de estas (CEPAL, 2017), pero es indispensable hacer planeación urbana sustentable para disminuir estos impactos. Sobre esto la Organización para las Naciones Unidas establece la necesidad de buscar ‘ciudades y comunidades sostenibles’ como parte de los Objetivos del Desarrollo Sostenible.

En este trabajo se presentó la problemática de la expansión de la ciudad de Tijuana en el tiempo y cómo la falta de regulación del uso de suelo favoreció asentamientos irregulares de población en situación de marginación y pobreza en las márgenes del río Tijuana, que son zonas de riesgo ante inundaciones por las condiciones del terreno. Ante este escenario se presenta el dilema impacto ambiental - impacto socioeconómico; estando, por una parte, cuidar el medio ambiente, y por otro lado, promover el desarrollo urbano con vialidades para comunicar la ciudad, así como obras para el control de avenidas a través de canales revestidos que modificarán el hábitat e impedirían la infiltración al subsuelo. En el caso de estudio, las zonas del Arroyo Alamar-Río Tijuana han optado por proyectos de infraestructura como corredores eco-hidrologicos para minimizar el impacto ambiental, reducir la vulnerabilidad ante inundaciones e integrar la ciudad dividida por el cauce.

Tijuana no ha sido capaz de adaptarse al ritmo de crecimiento poblacional acelerado del que se ha visto sujeto a lo largo del tiempo, fenómeno que se replica en muchas ciudades Latinoamericanas y representa un reto dadas las condiciones de recursos escasos con los que cuentan. Sin embargo, es

### Conclusiones y Recomendaciones

La frontera entre Tijuana - San Diego es un espacio transfronterizo muy dinámico de redes de consumo, comercio y empleo, que ha motivado masivos asentamientos urbanos con alta densidad poblacional en la ciudad de Tijuana, por lo que han ido teniendo lugar conurbaciones y nuevas vías de comunicación para integrarlas. Sin embargo, la urbanización llevada a cabo ha generado

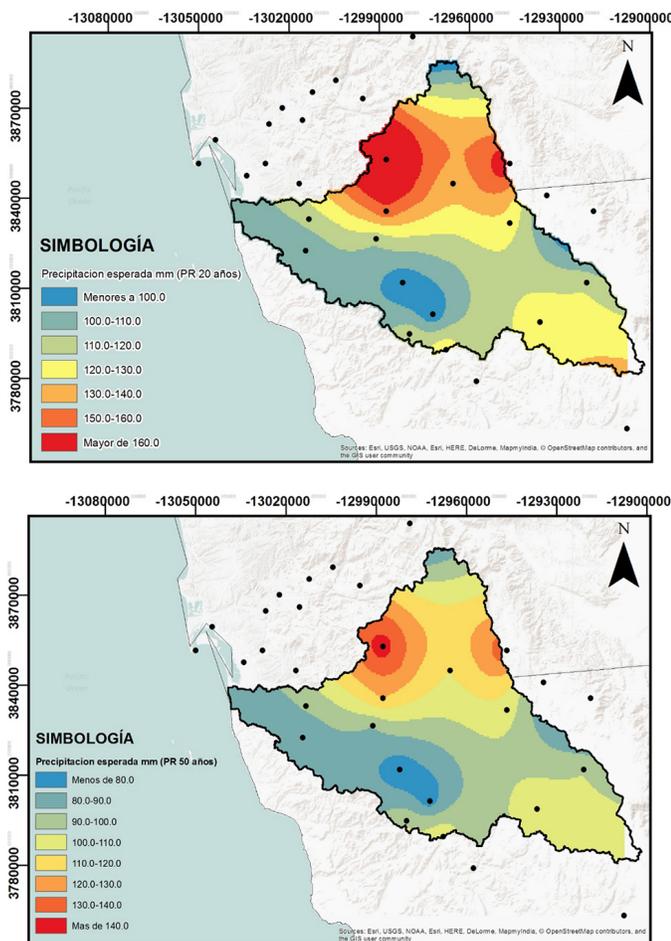


Figura 4. Precipitación esperada para los periodos de retorno 20 y 50 años en CRT.

posible aprender de su proceso de conformación y orientar las decisiones basadas en estudios que pronostiquen escenarios para mejorar la planeación de ciudades resilientes y la gestión de recursos hídricos de las cuencas a la que pertenecen.

En este sentido, los resultados del análisis regional de frecuencias para la CRT indican escenarios de sequía prolongada y señalan la necesidad de planes de manejo sostenible transfronterizos con mayor participación del lado mexicano, para garantizar la seguridad hídrica en la región. Se recomienda realizar el cálculo de otros indicadores de sequía y fenómenos océano-atmosféricos como el ENOS, que influyen en la climatología de la región, de tal forma que permitan definir con mayor claridad las variables que inciden en la presencia de las diferentes categorías de sequía.

## REFERENCIAS

- Alegria T (2011) Revisión de la hipótesis y evidencias de Tijuana, México, y San Diego, Estados Unidos. *Metropolis Transfront.* 37: 163-165.
- Asadi Zarch MA, Bellie S, Ashish S (2015) Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI). *J. Hydrol.* 526: 183-195.
- BTS (2020) *Border Crossing Entry Data / Annual Data.* Bureau of Transportation Statistics. US Department of Transportation. Washington, DC, EUA. <https://explore.dot.gov/views/BorderCrossingData/Annual?isGuestRedirectFromVizportal=y&embed=y>
- Cantos J, Morales A, Rico A (2000) Diferentes percepciones de la sequía en España: adaptación, catastrofismo e intentos de corrección. *Invest. Geogr.* 23: 5-46.
- CEPAL (2017) *Panorama Multidimensional del Desarrollo Urbano en América Latina y el Caribe.* Comisión Económica para América Latina y el Caribe. ONU-Hábitat. [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/41974/S1700257\\_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/41974/S1700257_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- COLEF (2018) *Diagnóstico Socioambiental de la Cuenca del Río Tijuana.* Colegio de la Frontera Norte. México. <https://www.cuencariotijuana.org/wp-content/uploads/2019/11/191111-Diagnóstico-socioambiental-de-la-Cuenca-del-Río-Tijuana.pdf>
- CONAGUA (2015) *Información histórica de estaciones climatológicas de Baja California.* Comisión Nacional del Agua. México.
- CONAPO (2018) *Sistema Urbano Nacional.* Consejo nacional de población. México. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/400771/SUN\\_2018.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/400771/SUN_2018.pdf)
- Dracup J, Lee K, Paulson E (1980) On the definition of droughts. *Water Resour. Res.* 16: 297-302.
- EBC (2013) *Estudio de Manifestación de Impacto Ambiental para la Construcción de la Vialidad Alamar, Tramo Manuel J. Clouthier a Héctor Terán Terán, en la Ciudad de Tijuana, Baja California.* Gobierno del Estado de Baja California, México. pp. 89-92.
- Gocic M, Slavisa T (2014) Spatiotemporal characteristics of drought in Serbia. *J. Hydrol.* 510: 110-123.
- Hallack-Alegria M, Ramirez-Hernandez J, Watkins DW (2012) ENSO-conditioned rainfall drought frequency analysis in northwest Baja California, Mexico. *Int. J. Climatol.* 32: 831-842.
- Hernández E, Rabelo Y (2009) Segregación Socioespacial y Distribución del Ingreso en el Área Urbana de Tijuana, Baja California, México, 1990-2000. Universidad Autónoma de Baja California. México. pp. 42-47.
- Herzog LA (1990) *Where North Meets South: Cities, Space, and Politics on the United States-Mexico Border.* University of Texas Press. Austin, TX, EUA. 120 pp.
- Hosking J, Wallis JR (1997) *Regional Frequency Analysis.* Cambridge University Press. Cambridge, RU. pp. 35-42.
- IMTA (2004) *Diagnóstico Integral de la Subcuenca Hidrológica Los Laureles, Tijuana, B.C.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 29 pp.
- MGS (2008) *LRAP. Linear Regional Frequency Analysis Software versión 1.0.* MGS Engineering Consultants. Olympia, WA, EUA.
- Moctezuma Hernández P, Maldonado Bodart M (2012) *Gestión y Diseño de Políticas Públicas en Zonas Urbanas de Alto Riesgo: El Caso del Arroyo Alamar en Tijuana, Baja California.* Universidad Autónoma de Baja California. 237 pp.
- Mungaray-Moctezuma A, García J, Beas M (2012) La dimensión técnica en el arroyo Alamar, En Gestión y diseño de políticas públicas en zonas urbanas de alto riesgo: el caso del arroyo Alamar en Tijuana, Baja California. Universidad Autónoma de Baja California. México. pp. 137-152.
- Ojeda-Revah L, Espejel-Carbajal I (2008) La cuenca binacional del río Tijuana: un enfoque biohistórico. *Econ. Soc. Territ.* 8(26): 517-548.
- Padilla A (1994) El desarrollo urbano de la frontera. *Visión Histórica de la Frontera Norte de México.* Tomo VI. Kino. Tijuana, BC, México. pp. 151-152.
- Pereyra-Díaz D, Pérez-Sesma JA, Gómez-Romero L (2004) Ecuaciones que estiman las curvas intensidad-duración-período de retorno de la lluvia. *Geos* 24: 46-56.
- Piñera-Ramírez D, Ortiz-Figueroa J (1989-1989: Edición Conmemorativa del Centenario de su Fundación. Universidad Autónoma de Baja California. México. pp. 78-86.
- Ponce V (2001) *Hidrología de Avenidas del Arroyo Binacional Cottonwood-Alamar, California y Baja California.* San Diego, California. San Diego State University. San Diego, CA, EUA. <http://ponce.sdsu.edu/alar-mar/alar.html>
- Ponce V, Espinoza A, Magdaleno P, Castro A, Celis R (2004) *Arquitectura Sustentable del Arroyo Alamar, Tijuana, Baja California, México.* [http://ponce.sdsu.edu/alar\\_mar\\_sustainable\\_architecture\\_final\\_report.html](http://ponce.sdsu.edu/alar_mar_sustainable_architecture_final_report.html)
- Ramírez Hernández J (2006) *Una Visión de la Problemática Ambiental de Mexicali y su Valle: Elementos para su Gestión.* Universidad Autónoma de Baja California. México. 23 pp.
- Ranfla González A, Álvarez GB (1986). Expansión física, formas urbanas y migración en el desarrollo urbano de Tijuana, 1900-1984. *Cs. Soc.* 3(2): pp. 2-15.
- Rodríguez Esteves JM (2007) La conformación de los “desastres naturales”. Construcción social del riesgo y variabilidad climática en Tijuana, B.C. *Front. Norte* 19(37): 83-112.
- Ruiz-Gibert JM, Hallack-Alegria M, Robles-Morua A, Molina-Navarro E (2020) Using an integrated hydrological model to estimate the impacts of droughts in a semiarid transboundary river basin: the case of study of the Tijuana River Basin. *Int. J. River Basin Manag.* 18: 445-460. <https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1597727>
- SANDAG (2014) *California-Baja California Border Master Plan Update.* San Diego Association of Governments. San Diego, CA, EUA.
- SDSU (2005) *Tijuana River Watershed Atlas.* San Diego State University. San Diego, CA, EUA.
- Seth SM (2005) Human impacts and management issues in arid and semi-arid regions. *En Understanding Water in a Dry Environment.* CRC Press. Boca Raton, FL, EUA. pp. 305-357.
- UNESCO (2010) *Guía Metodológica para la Aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías Basado en L-Momentos Y Resultados de Aplicación en América Latina.* Documentos Técnicos N° 27. PHI-LAC / CAZALAC. Santiago, Chile. pp. 13-34.
- Wallis JR, Schaefer MG, Barker BL, Taylor GH (2007) Regional Precipitation-Frequency Analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington State. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11: 415-442.
- Wilhite D, Glantz M (1985) *Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions* *Water Int.* 10(3):111-120.
- WRCC (2016) *Western Regional Climate Center.* <http://www.wrcc.dri.edu/summary/Climsmsca.html>