



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**DISTRIBUCIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA
PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN LA CIUDAD DE MEXICO Y SU
APLICACIÓN A LA PLANEACIÓN URBANA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA
TIERRA**

**ORIENTACIÓN CIENCIAS
AMBIENTALES**

P R E S E N T A:

LUIS ÁNGEL BETANZOS JIMÉNEZ



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. VÍCTOR LUIS BARRADAS MIRANDA
2016**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno
Betanzos
Jiménez
Luis Ángel
55174053
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
308008353
2. Datos del tutor
Dr.
Víctor Luis
Barradas
Miranda
3. Datos del sinodal 1:
Dra.
Graciela
Lucía
Binimelis de Raga
4. Datos del sinodal 2:
Dra.
María
Engracia
Hernández
Cerda
5. Datos del sinodal 3:
Dra.
Blanca
Lucía
Prado
Pano
6. Datos del sinodal 4:
Dr.
Rodolfo
Omar
Arellano
Aguilar
7. Datos del trabajo escrito
Distribución Temporal y Espacial de la Precipitación Pluvial en la Ciudad de México y su Aplicación a la Planeación Urbana
83p.
2016

“What a queer planet!” he thought. “It is altogether dry, and altogether pointed, and altogether harsh and forbidding. And the people have no imagination. They repeat whatever one says to them . . . On my planet I had a flower; she always was the first to speak . . .”

— Antoine de Saint-Exupéry, as *The Little Prince*

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por todo su compromiso, amor y apoyo brindados a lo largo de mis 25 años. A mi hermana por cuidarme, entenderme y apoyarme en los momentos más difíciles. A todo el resto de mi familia por estar siempre ahí. A mi abuelo Juan que me está viendo desde el cielo y quien forjo los cimientos de mis sueños.

A mis amigos más cercanos que estuvieron siempre tanto en las buenas como en las malas (el orden de los sumandos no altera la suma): Pedro y familia Sánchez Rodríguez, Armando y familia Lara Díaz Infante, Jonathan, Gisell, Yuriko, Pedro Cervera, Wendy, Andrea, Alejandra, Xarhini, familia Loera, Raiza, Xanath, Martha Aide, Jun, Edith, Esteban y a todas aquellas personas con las que he compartido momentos y hasta amistades.

A Yael por su alegría, optimismo, palabras de aliento, apoyo y ayuda durante todo el proceso de este trabajo.

A mi director de tesis, Dr Víctor Barradas, por sus consejos, apoyo y ayuda en todo momento, significó el para mí un verdadero mentor. Y a su equipo de trabajo con el que tuve la dicha de trabajar.

A PAPIIT por la beca brindada para que pudiera elaborar este trabajo, al igual que a Coca Cola por la experiencia de mi vida (hasta el momento).

A cada uno de los sinodales por sus valiosas aportaciones y opiniones que sirvieron para enriquecer esta tesis.

A la UNAM por darme la oportunidad de estudiar, de desarrollarme como persona y por invertir en mi futuro.

A Grupo Selome por mi primera experiencia laboral y en especial a la Dra. Norma Fernández por creer en mí y por ser la mejor jefa y ejemplo a seguir.

To my beloved UW and Seattle, to all my friends Tung, Kazuha, Dakota, Naomi, Tatsuya, Yuzuke, Bruce, Katy, Kara, Jing, Ricardo and Ondrej, you will always be on my heart and mind. To the professors Dargan Frierson and Ed Waddington, I will never forget such valuable lessons, advices and incredible support.

A Dios y a la vida por dejarme llegar a este momento...

“Brick walls are there for a reason. The brick walls aren't there to keep us out. The brick walls are there to show us how badly we want things.” .- Randy Pausch

Índice

1.1. Abstract	10
1. Resumen.....	11
2. Introducción	13
4. Hipótesis y Objetivo	29
5. Método.....	30
6. Resultados	36
7.- Distribución del número de eventos de inundaciones reportados (SNIDN)	59
8.- Discusión	71
7.- Conclusiones	76
9. Referencias.....	78

Lista de Tablas y Figuras

TABLAS

Tabla 1. Estaciones meteorológicas cuyos datos se utilizaron en este estudio (Servicio Meteorológico Nacional, s/f).

Tabla 2.- Tendencia de la Pp total

Tabla 3.- Tendencia de la Intensidad de la Pp

Tabla 4. Distribución poblacional de la ZMVM. La CDMX cuenta con 8,918,653 millones de habitantes en lo que va del 2016 (INEGI, 2015).

Tabla 5.- Posible captura de agua en una superficie (Ejemplo 200 m² en función de las cantidades de precipitación (Precipitación total actual al mes de agosto 2015 en el DF: 347.8mm)

Tabla 6.- Datos y resultados obtenidos de agua de captura de la azotea en una superficie de 200 m² en las proyecciones por regresión lineal para los años 2020 y 2050.

Tabla 7.- Agua capturada en las estaciones de San Juan de Aragón, GAM y Desviación el Pedregal, Tlalpan tomando en cuenta la máxima y mínima intensidad actual.

FIGURAS

Figura 1.- Inundación de 1952 en el Centro Histórico de la Ciudad de México (Guzmán, 1952) (A) y el 16 de septiembre de 1952 (Benítez, 1952)(B).

Figura 2. Figura extraída de Agua, sostenibilidad y ahorro: Hidrología Sostenible, 2016. Modelos que muestran que es lo que sucede con el agua de lluvia en una zona sin urbanización y en una con urbanización.

Figura 3.- Modelo de Hidrograma/Pluviograma que representa la diferencia de picos de escorrentía entre la urbanización y la no urbanización. Figura modificada de Biología sur.

Figura 4.- Crecimiento del área urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México de 1910 a 2010.

Figura Modificada: UAM, s/f.

Figura 5.- Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Google Earth) y la distribución de las 14 estaciones meteorológicas que formaron parte del estudio (Tabla 1).

Figura 6.- Intensidad de la precipitación en San Miguel Tlaixpan, Texcoco (A) y en Colonia Santa Úrsula, Coapa, Coyoacán (B).

Figura 7.- Distribución de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. Las fechas azules hacia arriba representan, la tendencia positiva y las flechas azules hacia abajo, la tendencia negativa dentro del periodo de tiempo estudiado para la intensidad de la lluvia.

Figura 8. Distribución de la Pp total anual (mm) promedio (1970-2010) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Figura 9. Distribución de la tendencia de la precipitación total anual (mm/año) en el periodo de estudio. Los puntos representan estaciones meteorológicas de referencia.

Figura 10. Distribución de la intensidad de la precipitación (mm/día) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Los puntos representan estaciones meteorológicas de referencia.

Figura 11. Distribución de la tendencia de la intensidad de la precipitación pluvial (mm/día). Los puntos representan estaciones meteorológicas de referencia.

Figura 12. Distribución de la máxima precipitación anual en un día (mm) (Rx1day) (A) y máxima precipitación anual en cinco días consecutivos (mm)(Rx5day)(B).

Figura 13. Distribución del número de días al año en que la precipitación fue mayor o igual a 10 mm (PRCP \geq 10mm) (A) y en que la precipitación fue mayor o igual a 20 mm (PRCP \geq 20mm) en el periodo estudiado (B).

Figura 14. Escenario de la distribución de la cantidad total anual (mm) (A) y de la intensidad (mm/h) (B) de la precipitación en el año 2020.

Figura 15. Escenario de la distribución de la cantidad total (A) y de la intensidad (B) de la precipitación en el año 2050

Figura 16. Gran Canal km 27+250 , Ecatepec de Morelos (A) y San Francisco Tlalnepantla, Xochimilco (B) Pp totales de décadas distintas.

Figura 17. Distribución del número de eventos de inundaciones en el periodo comprendido de 1970 a 2013 en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Figura 18. Imagen satelital obtenida a través de ArcMap de la Ciudad de México y de los tres municipios tomados en cuenta para el estudio.

Figura 19. Capas que constituyen el diseño de la azotea verde, incluyendo el sustrato de arcilla limoso. Imagen modificada de Charleston Green Roofs (2015).

Figura 20. De acuerdo a sus características de permeabilidad se muestran a la arena, limo y arcilla.

Figura 21.- Modelo de azotea verde con superficie de 200 m², el tanque en forma de cilindro se encuentra en el perímetro del edificio (modelo creado a partir de HomeByMe)

Figura 22. Modelo de tanque sobre muro azul de 12.5 m² con envase de botellas de PET de 2L (Modelo creado a partir del software HomeByMe).

1. Abstract

Droughts and floods have been a major concern around the world because of their connection with climate change, in some parts of the planet we are witnessing changes in the patterns of both of them. Mexico City, one of the biggest cities in North America, is experiencing more episodes of floods than of droughts. In this study we examined the spatial and time distribution of the amount of pluvial precipitation (mm) and its intensity (mm/day). Using the software RCLindex, which specialize in the study of climatic variables, we studied the different rates and properties of rain through the last four decades. Our results showed up that the amount and intensity are higher in southwest of the city than in the northeast. In addition, reviewing data set of natural disasters, the highest amount of flood reports by the citizens focuses in the north. Climate change models predict changes in the amount of rain, and in its in Mexico City, so we need to get prepare to prevent future floods and to adopt plan such as rain tanks or green roofs.

1. Resumen

Los fenómenos de inundaciones se presentan en distintas escalas y por diferentes motivos, actualmente la ciudad de México pudiera estar viviendo más episodios de inundaciones que de sequías. Se realizó un estudio de la distribución espacial y temporal de la precipitación pluvial en los últimos 40 años, usando distintos índices obtenidos a través del software RCLimindex que se encarga de analizar variables climáticas. Entre los resultados obtenidos se encuentra que tanto la precipitación pluvial total (Pp) como la intensidad de Pp se concentran más en el suroeste de la zona urbana, otros índices al igual que los análisis de tendencias también indican una mayor inclinación hacia la misma zona de la ciudad. Al analizar datos de reportes ciudadanos de inundaciones realizados en los últimos 43 años, se aprecia que en el noreste y centro de la ciudad es donde más se han presentado. La relación entre estos reportes y los índices obtenidos no coinciden entre sí, esto se puede deber a diversos motivos, desde la diferencia de densidad de drenaje hasta la diferencia en la distribución poblacional dentro del área urbana, además de que podría existir un mayor número de reportes en ciertas zonas.. El contexto social no debe de quedar de lado en un trabajo como el de este tipo, es por eso que se integra tanto el contexto científico como histórico y social, con el fin de aportar algunas soluciones de mitigación de inundaciones como son los tanques de captura de agua de lluvia y/o las azoteas verdes.

“From this moment on you are rock...

You absorb nothing, you say nothing and nothing breaks you.”

- Frank Underwood

2. Introducción

Era la tarde del 03 de septiembre del 2015 cuando en la Ciudad de México empezaron a caer las primeras gotas de lluvia que presagiaban lo que podía ser una tarde complicada para los capitalinos. Según información proporcionada por el gobierno de la ciudad horas más tarde, se reportaron cerca de 15 inundaciones que iban de los 15 centímetros a los 2 metros de altura. Aunque no se reportó ningún lesionado, los servicios de emergencia tuvieron que rescatar en lanchas inflables a diez personas que se encontraban atrapadas dentro de una combi del transporte público ruta 27 en San Antonio a la altura de Periférico.

En la delegación Álvaro Obregón se produjo un deslave debido a la intensa lluvia que afectó a tres viviendas en la colonia Ampliación La Cascada. Por precaución, las autoridades tuvieron que desalojar a varias viviendas aledañas a los hechos (El Universal, 2015).

El Sistema de Aguas (SACMEX) informó que cerca de 62 vialidades fueron afectadas por los severos encharcamientos. Entre las cuales se encontraban Paseo de la Reforma, Viaducto Miguel Alemán y Vértiz, Río Churubusco, Calzada de Tlalpan, así como Periférico y Barranca del Muerto.

Una parte de las instalaciones del Palacio de los Deportes, en específico la sala de prensa, se inundó mientras se llevaba a cabo un evento deportivo internacional de basquetbol entre México y Brasil. Personal del lugar al igual que de la Federación Internacional de Basquetbol (FIBA) tuvieron que idear la forma para contener el agua y que así no causará mayores estragos al lugar.

La misma Secretaria de Protección Civil informó que durante lo que el año 2015 se registró un aproximado de 2, 653 encharcamientos e inundaciones, mientras que en el año 2014 se registraron 5, 029 emergencias del mismo tipo.

De igual forma en el 2015 la delegación Iztapalapa se colocó como la zona más afectada con 353 eventos, le siguen la Cuauhtémoc con 378, Gustavo A. Madero con 333, Benito Juárez con 297, Venustiano Carranza con 261 y Coyoacán con 240 (El Universal, 2015).

Otro episodio que es necesario mencionar es el que se presentó en la tarde del 1 de julio en el paradero de Indios Verdes donde cerca de 1 km de la avenida de Insurgentes Norte se vio inundado, ocasionando un caos vial que duró algunas horas así como automóviles atrapados en medio del agua, parte del servicio del sistema de transporte subterráneo del metro tuvo que ser suspendido.

Una lluvia de 20 milímetros concentrada en un área muy pequeña aunado a un pobre funcionamiento del sistema de drenaje del lugar y a la basura que puede tapar las coladeras, fueron los ingredientes que propiciaron el caos en Indios Verdes. La altura de este encharcamiento/inundación puede llegar a más de 1 m de altura que fue lo que sucedió en esta ocasión (Televisa Noticias, 2015).

La vida urbana se ha vuelto el centro cultural, económico y político de la sociedad moderna. La aceleración de la urbanización ha ido en aumento con el pasar de los siglos, y esto nos ha llevado a observar con mayor frecuencia el abandono del campo. En 1850 la población mundial únicamente se concentraba en un 11% en las ciudades y, para el año 2000 cerca del 48% ya se concentraba en las grandes urbes (Harper, 2012).

Las ciudades no representan un tema nuevo, la antigua Babilonia llegó a tener una población de 50,000 habitantes, Atenas cerca de los 80,000 y Roma 500,000. Gran parte de la población en aquellas épocas se concentraba en el campo, esto debido a que gran parte de la economía se basaba únicamente en las actividades agrícolas y ganaderas, además de que las ciudades de aquellos tiempos representaban focos importantes de contaminación y de epidemias. El índice de mortalidad era más bajo si se vivía en el campo que en alguna ciudad (Harper, 2012).

La ciudad de México, con un total de 20,843,000 habitantes, es la cuarta ciudad más poblada del mundo, solo por detrás de urbes como Tokio, Delhi y Shanghai (ONU, 2014). La densidad poblacional de la ciudad de México es de 5,967 personas por kilómetro cuadrado (INEGI, 2015) mientras que la de Tokio es de 4,400 por kilómetro cuadrado, la de Delhi 12,000 por kilómetro cuadrado y la de Shanghai 6,100 por kilómetro cuadrado (Allianz, 2016).

La ONU estima que para el año 2030 será superada por otras ciudades asiáticas y africanas. La densidad de población es de resaltar, ya que esto podría acentuar aún más los problemas ambientales que actualmente se viven.

El estudio de la precipitación pluvial en una zona urbana como la de este tipo, adquiere una relevancia aún mayor si consideramos la problemática de las inundaciones. Se tiene la noción de que con el cambio climático, los patrones de sequías y de inundaciones a lo largo del planeta podrían verse altamente modificados; por lo que es de esperarse que la Ciudad de México no represente ninguna excepción.

Se tienen estimaciones de que la temperatura media de la Ciudad de México podría incrementarse hasta 4 °C hacia el año 2080 y la precipitación pluvial (Pp) podría decrecer en un 20%. Aunque existen distintos modelos de precipitación hechos para esta ciudad, no se puede aún confiar totalmente en ellos (Romero, 2010). Se piensa que la intensidad de la Pp podría igual verse modificada en la ciudad, lo cual está conectado directamente con fenómenos como las inundaciones repentinas (IPCC, 2007).

3.1. Historia de la Capital Azteca

En la historia de la capital mexicana, han habido tanto temporadas intensas de inundaciones como también de sequías. Entre 1450 y 1900, se tiene el registro de cerca de 136 episodios de sequías. De igual forma, la inundación de 1959, históricamente la de mayor impacto, representa un claro reflejo de posibles cambios de patrones de precipitación que se han venido dando a lo largo de las últimas décadas (Romero, 2010).

Para poder entender de mejor manera esta relación temporal de sequías e inundaciones en la Ciudad de México, resulta importante mirar hacia el pasado y entender que ha sucedido desde los tiempos de la edificación de la gran Tenochtitlan.

La capital de la civilización mexicana la gran Tenochtitlan, se asentó en el valle de México, el cual en ese entonces se caracterizaba principalmente por ser una cuenca cerrada (endorreica) en cuyo interior existían una serie de lagos y lagunas procedentes principalmente de precipitaciones pluviales, de ríos permanentes o semipermanentes y de manantiales (Villalonga, 2007).

La civilización mexicana tenía como principal característica el respeto hacia la naturaleza, al crear una ciudad con tecnologías avanzadas en su época para el control del nivel del agua así como el correcto reciclaje de los desechos, se erigían como una sociedad que vivía en armonía con su entorno (Legorreta, 1997).

En el año 1500, la cuenca de México estaba integrada por un sistema compuesto por cinco subcuencas llamadas Chalco, Xochimilco, Texcoco, Xaltocan y México, que llegaron a ocupar entre 800 y 1000 km². Estas subcuencas, se encontraban a una altura aproximada de 2240 msnm y fueron de gran utilidad ya que podían funcionar como forma de comunicación entre los distintos poblados vecinos (Villalonga, 2007).

Los aztecas idearon diversas estrategias para aprovechar el agua de lluvia de la mejor manera posible. Para ello, se utilizaron los sistemas naturales como los manantiales, arroyos y ríos, y se optó también por crear sistemas artificiales que pudieran captar y retener el agua para desviarla a los diversos campos de cultivo que se tenían (Villalonga, 2007). Quedarse sin el vital líquido no era una opción para los mexicas, ya que su población iba en aumento constante, demandando cada vez más alimentación. El problema radicaba en que el sistema lacustre estaba compuesto de lagos de agua dulce y salada, por lo que se tenía que tener cuidado de no mezclarlas.

Los mexicas construyeron un sistema para contener las invasiones de agua salada. Dentro del lago se comenzó la construcción de un sistema innovador de cultivo: las chinampas, también llamados “jardines flotantes” o “sementerías” y “camellones” (Villalonga, 2007). Segmentos de tierra totalmente artificiales colocados por diversos motivos dentro de los lagos (Gibson, 1975). La aparición de las chinampas marca el inicio de las obras de infraestructura hidráulica dentro de Tenochtitlan. La construcción del acueducto de Chapultepec, que proveía de agua dulce a la ciudad representó un parteaguas en la ingeniería hidráulica de aquel entonces.

Es importante mencionar que el tlatoani Izcoatl, al principio ofrecía la producción de las chinampas como parte de tributo a los tepanecas, pero cuando finalmente los pudo derrotar, decidió mandar a construir la primera obra pública de grandes dimensiones. La gran calzada, que tenía como funciones el comunicar a gran parte de la ciudad y al mismo tiempo servía como dique para detener las invasiones del agua salada principalmente (Villalonga, 2007).

Con el paso del tiempo las obras hidráulicas fueron en aumento, propiciado en parte por las fuertes inundaciones que fueron azotando cada vez más a la ciudad (Villalonga, 2007). En 1449 el tlatoani Nezahualcóyotl mandó construir el albarradón, el cual era un gran dique que se encontraba dentro de una calzada. La construcción del mismo, significó en su momento no solo la solución a las inundaciones, sino que a su vez, subdividió en dos el lago de Texcoco. El albarradón representó una obra monumental para la época y se requirió de mano de obra de otros poblados como Texcoco. Dicha edificación era principalmente de madera y piedra (Villalonga, 2007).

Los resultados de la obra fueron muy buenos ya que se pudo crear el lago de México, el cual procedía de la separación de la parte occidental del gran lago. El agua era menos salobre y pudo cumplir la función de sustentar a las chinampas. Además de que sirvió para una mejor captura del agua de lluvia, lo que ocasionó menos inundaciones (Villalonga, 2007). Tenochtitlan vivía sus mejores épocas en cuanto a producción agrícola, y la ciudad seguía en constante crecimiento.

Otra de las aportaciones de Nezahualcōyotl a la construcción hidráulica, fue un nuevo acueducto para proveer de agua dulce a la gran ciudad, que dejó pendiente su antecesor Ahuizotl (1486-1502), que después de una fuerte inundación en 1499 al este de la isla de México, mandó construir el segundo dique o albarradón. También mandó edificar otro acueducto dentro de la ciudad, aunque esta vez de cal y piedra, que contó de nuevo con la cooperación de otros poblados como Texcoco, Azcapotzalco, Coyoacán y Xochimilco (Villalonga, 2007).

El siglo XVI para los mexicas, puede ser considerado como un periodo de constante preocupación por las inundaciones, a excepción de 1555-1556 quizás, donde no se tienen registros de haber alcanzado altos niveles del agua (Gibson, 1975).

Las inundaciones más serias, que ocasionaron daños incalculables a la ciudad se produjeron en los años 1604 y 1607. El aumento de intensidad de las inundaciones pudo haber sido consecuencia de diferentes factores entre los que están la tala de los bosques circundantes y de la progresiva desaparición de los lagos de la ciudad. Además de que las obras hechas, ya no se estaban dando abasto con los volúmenes de agua que podían contener, volviéndose poco funcionales.

La inundación de 1607 fue aún más grave que la de 1604, pero juntas lograron algo de lo que no se tenía precedente alguno creándose el programa más ambicioso de ayuda y reparación del siglo XVI. El albarradón de San Lázaro fue reconstruido, al igual que distintas calzadas que separaban el lago de Xaltocan del de Texcoco (Salomón, s/f).

Un nuevo plan de Desagüe General se conformó ahora bajo la dirección del ingeniero de origen alemán Enrico Martínez y con la colaboración del otro ingeniero Adrian Boot, que consistió en construir un túnel el cual cruzara a través de las montañas en el extremo noroeste del valle, cerca de Huehuetoca y así poder conducir el exceso de agua mediante una serie de canales. El canal principal, nombrado el tajo de Nochistongo, tenía como objetivo drenar el Lago Zumpango, así como acarrear agua del río Cuauhtitlán (Domínguez, 2000).

Desafortunadamente, al inicio el proyecto no funcionó de la forma en que se esperaba, además de que aún se encontraba inconclusa parte de la obra, aunado a todo esto en las primeras décadas del siglo XVI se vivieron inundaciones muy intensas. La inundación de 1629-1635 fue de tal magnitud, que se estima que murieron cerca de 30,000 personas, además de los daños irreparables que sufrió la ciudad. Se dice que durante esos seis años la ciudad permaneció bajo el agua. Todo esto ocasionó que muchos europeos decidieran salir de la misma en busca de refugio (Domínguez, 2000). Fue tal el desastre que ocasionaron las inundaciones, que se llegó a pensar en mudar a la capital a otro lugar. Las consecuencias de querer implementar un modelo urbano

europeo en un nuevo ambiente totalmente distinto se estaban viviendo. El mismo ingeniero Martínez fue encarcelado, aunque posteriormente fue liberado y regresó a trabajar en la ingeniería hidráulica.

Las mismas características urbanas propias de la nueva ciudad española, la deforestación y la paulatina desaparición de sus lagos, condujeron a todas estas inundaciones. Además de una total falta de planeación urbana y una mala toma de decisiones (Everett, 1975).

Una de las problemáticas que se tenía que atacar de manera inmediata en ese entonces era el lago de Texcoco que al no tener posibilidades de descarga fuera del valle, era una constante amenaza para la ciudad, de tal forma que esto llevó a pensar en construir el Gran Canal o Canal del desagüe. Esta obra se inició hasta 1866, construyendo un canal de 39.5 km cuyo trayecto iniciaba en el lago de Texcoco y culminaba con el túnel de Tequixquiac, de casi 10 km. La obra constituyó la segunda salida artificial para el drenaje del valle de México después del Tajo Nochistongo y fue terminada en el año 1900, con lo que se pensó que con esto sería suficiente para dar por terminado este problema de la ciudad (Domínguez, 2000).

En 1930, se calcula había una población de un millón de habitantes, para 1940 ya habían dos millones, para 1950 tres y cinco más en 1960, siendo una gran explosión demográfica lo que se vivió en esas épocas. A pesar de todos esos trabajos desarrollados, entre 1941 y 1951 acontecieron diversas inundaciones de gran magnitud (Domínguez, 2000) (Figs 1(A), 1(B)).

Entre 1954 y 1967 se construyeron de nueva cuenta miles de kilómetros de recolectores, plantas de bombeo con capacidad acumulada de más de $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, el interceptor del poniente, el entubamiento de los ríos Churubusco, de la Piedad, Consulado, el sistema Lerma, entre muchos otros. Sin embargo, debido a diversos motivos como el crecimiento acelerado y el hundimiento de la ciudad, los cambios no se observaron (Domínguez, 2000).



Figura 1. Inundación de 1952 en el Centro Histórico de la Ciudad de México (Guzmán, 1952) (A) y el 16 de septiembre de 1952 (Benítez, 1952)(B).

Fue entonces que en 1967 se propuso una nueva solución: El Sistema de Drenaje Profundo. Esta obra fue considerada nuevamente como la “definitiva” y se inauguró en 1975. Mientras que en 1976 comienzan los trabajos de construcción del sistema Cutzamala, el cual tenía como principal objetivo capturar y suministrar de agua potable a la ciudad de México (Domínguez, 2000).

Finalmente entre el periodo de 2008 y 2012 se construyó el Túnel Oriente Grande con 62 km de largo, 25 pozos, de entre 55 y 150 m de profundidad y un diámetro de 7 m, siendo considerado a la fecha como la obra más grande que se haya realizado dentro de la Ciudad de México para mitigar las inundaciones (Domínguez, 2000).

En resumen las cuatro obras más importantes que se han hecho para la prevención de las inundaciones en la historia de la capital mexicana son las que se mencionan a continuación: Tajo de Nochistongo (1637), el Gran Canal del Desagüe (1900), el Drenaje Profundo (1975) y ahora el Túnel Emisor Oriente o TEO.

3.2. Inundaciones

Las inundaciones son eventos meteorológicos que pueden tener consecuencias importantes a la población a nivel global. En las ciudades, lugares con altas densidades poblacionales, además de afectar a la infraestructura, pueden llegar a cobrar vidas humanas.

De acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial, las inundaciones han afectado a cerca de 1,500,000,000 millones de personas alrededor del mundo entre 1990 y 2001. Dichas inundaciones suelen presentarse en distintas escalas, distinta intensidad y por ende distinto volumen de agua. Por lo que no resulta tarea fácil hacer un comparativo de todos esos eventos, ya que depende del lugar en donde se lleven a cabo.

El origen de dicho evento se encuentra en los principios de la evaporación. Mientras el calentamiento global calienta los océanos del planeta, las moléculas del agua que se encuentran más próximas a la superficie del océano se vuelven más energéticas y se evaporan más fácilmente. Es a través de este proceso que el aire gana más vapor de agua (Henson, 2011).

Posteriormente ese vapor de agua llega hasta las capas más altas de la atmósfera, por lo que se enfría y se forman pequeñas gotas las cuales al llegar a un tamaño específico caen por efecto de la gravedad a la superficie terrestre (proceso de condensación) en fase líquida o en fase sólida con nieve.

Conforme cae el agua, esta se queda en la superficie terrestre o se evapora o logra penetrar al suelo. Si se satura el suelo, es decir, se supera la capacidad de agua del suelo, entonces el agua excedente pasa a formar parte de las aguas superficiales, originando escurrimientos que pueden llegar a ríos, lagunas y mantos acuíferos.

El problema empieza cuando al tener las calles pavimentadas, se limita la salida del agua dentro de la ciudad y se origina un estancamiento de lo mismo y a la postre una inundación.

La definición que brinda la CENAPRED (2004) para todo aquel fenómeno de inundación es: *“aquel evento que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre de agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o prenetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura.”* Debido al crecimiento de los asentamientos alrededor del mundo, el fenómeno de las inundaciones se ha acentuado. Aunado a esto la degradación ambiental, deforestación, erosión, etc, influyen en el ciclo hidrológico dentro de las cuencas como donde se encuentra la Ciudad de México (CENAPRED, 2004).

El cambio de uso de suelo en las ciudades ha propiciado la generación de encharcamientos más pronunciados como se aprecia en la Fig.2, además de que los daños materiales se han vuelto más perceptibles a la población (CENAPRED, 2004).

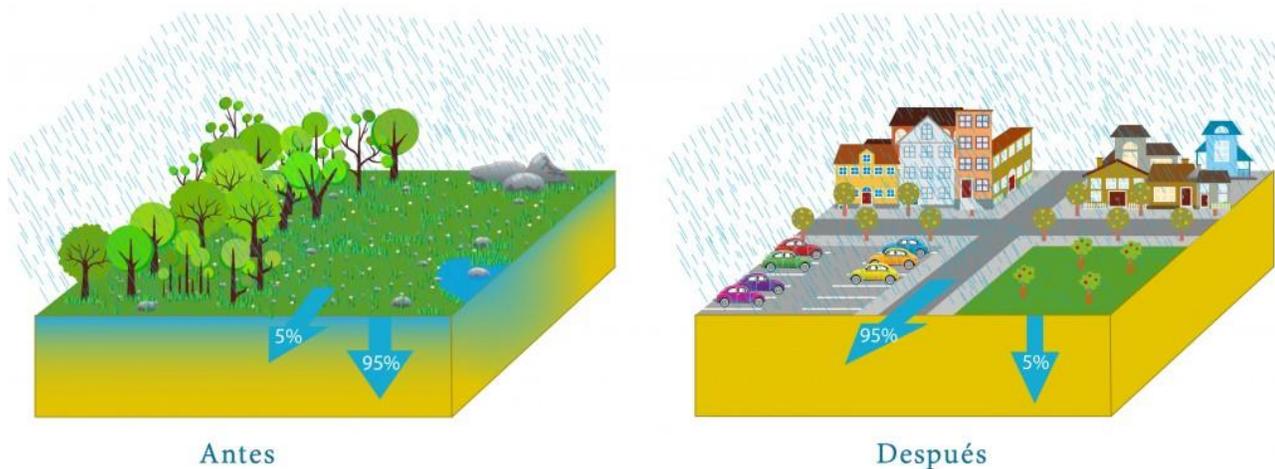


Figura 2. Figura extraída de Agua, sostenibilidad y ahorro: Hidrología Sostenible, 2016. Modelos que muestran que es lo que sucede con el agua de lluvia en una zona sin urbanización y en una con urbanización.

Con observaciones satelitales para medir la temperatura superficial de los océanos del planeta que se han realizado desde 1988, se llega a la conclusión de que el vapor de agua se incrementa hasta en un 1 % cada década en la tropósfera superior. Mientras que el vapor de agua en el aire cerca de la superficie terrestre se ha incrementado hasta en un 5 % de 1973 a 1993 (Henson, 2011).

Siempre que se habla de la precipitación pluvial, se involucran muchos factores a considerar en su comportamiento, por ejemplo si resultase cierto que la celda de Hadley se está expandiendo, sería difícil saber hasta qué grado se modificarán las tendencias de la precipitación global, o en qué manera el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur también pueda influir en dichas tendencias (Frierson, 2007).

Otra problemática que presenta la capital del país es el de la subsidencia. La ciudad se abastece de agua principalmente a través de los mantos acuíferos, los cuales se recargan en gran medida gracias a la precipitación pluvial. El agua llega hasta los mantos debido al proceso de infiltración del suelo, entonces el incremento de calles pavimentadas impide la infiltración y la recarga aumentando el riesgo de inundación. Una de las consecuencias de la sobreexplotación del agua de los acuíferos es precisamente el hundimiento actual que está sufriendo la ciudad. Lo cual modifica las pendientes de calles y a largo plazo puede beneficiar/perjudicar el encharcamiento en diversas zonas de la misma. El proceso de inundación de la Ciudad de México cuenta con una relación estrecha con el bombeo y el drenaje de las aguas del subsuelo (Mazari, 2001).

Otra de las consecuencias que puede traer la sobreexplotación de agua del subsuelo, es un agrietamiento, producido por la pérdida de humedad de la arcilla superior lo cual ocasiona una mayor cohesión y por un ende una subsidencia y filtraje de contaminantes. Además de también un mayor agrietamiento y flujos de agua contaminada que pudieran colarse hasta los mantos acuíferos. Actualmente, el hundimiento en zonas como Chalco-Xochimilco alcanzan los 48 cm/año y en la subcuenca de Texcoco se observan hundimientos de cerca de 30 cm/año (Mazari, 2001).

Aún no existen suficientes estudios sobre las tendencias de la precipitación en la Ciudad de México y tampoco se habla mucho sobre su conexión con el cambio climático. Se han elaborado estudios para mejorar los modelos de pronóstico a corto plazo en la ciudad de México con miras a mitigar inundaciones (Magaña, 2013), así como estudios donde se analiza la relación entre la topografía, la condición socioeconómica y la vulnerabilidad ante eventos extremos.

Además se ha relacionado la presencia de los aerosoles con el cambio de intensidad de la Pp (Ochoa et al, 2015).

De la misma forma trabajos sobre la llamada “isla de agua” (Jáuregui, 2000) y modelos de tendencias de Pp total e intensidad en el área metropolitana (PACCM, 2014). Inclusive el Banco Mundial ha emitido documentos donde se estudia el cambio climático dentro de la Ciudad de México.

La investigación del comportamiento de la Pp que se ha realizado hasta ahora es limitada y menos aún existen investigaciones donde se relacione la vulnerabilidad a la que está expuesta la población humana ante las posibles pérdidas causadas por las inundaciones y/o las sequías (Romero, 2010).

Se requiere de más trabajos que ayuden a generar un panorama más claro sobre esta problemática que se podría agudizar aún más en el futuro, es imposible predecir cuál será la respuesta de la población. Ante situaciones de este tipo, siempre se han tratado de resolver desde la perspectiva de la ingeniería hidráulica, pero lo que se requiere actualmente es la investigación multidisciplinaria en donde se trate al problema como un conjunto de variables que se conjugan para producir un efecto sobre la población urbana.

3.3. Resiliencia del Sistema Urbano

La resiliencia en el modelo de una ciudad requiere de la idealización de un sistema integrado y aproximado a la complejidad del problema con el que se está tratando. El estudio del sistema urbano como si se tratase de un ecosistema ayuda a alcanzar esa aproximación. Al momento de tomar las decisiones una serie de cuestiones debe de salir a flote, cuáles son las condiciones ambientales del lugar, cuáles son los costos y

beneficios, así como la inclusión social, la capacidad de adaptación de la ciudad, las tensiones sociales existentes, y qué es lo más práctico y eficiente por hacer (The World Bank, 2010).

Hay una distinción entre la mitigación y la adaptación al cambio climático. Los esfuerzos por mitigar están encaminados a prevenir los efectos del cambio climático. La adaptación se refiere más al hecho de tener que reajustar nuestro modelo de vida partiendo del hecho de que el cambio climático ya está sucediendo. Una política efectiva de cambio climático en una ciudad requiere de combinar ambos aspectos y así integrarlo a los planes de trabajo que se tengan (The World Bank, 2010).

Los costos y beneficios entre la mitigación y la adaptación cuentan con una escala con muchas diferencias. La adaptación tendrá principalmente impactos en una escala local, los costos podrían ser bastante elevados, especialmente en la implementación de construcciones que eviten las inundaciones, cambios en sistemas de drenaje así como facilidades para el bombeo del agua. El reducir el riesgo de los impactos puede resultar caro para los tomadores de decisiones pero muchas veces el precio de prevenir puede resultar mejor que el costo del desastre.

La mitigación es un esfuerzo global que requiere de un cambio tanto en la tecnología como en el comportamiento de los ciudadanos. Es decir, resulta ser un cambio de mentalidad y en la forma de tomar decisiones. Dichas estrategias suelen ser caras en el corto plazo, pero en el largo plazo los beneficios son incalculables. Un cambio en la infraestructura de una ciudad representa un reto pero aquí no solo se está pensando en las generaciones del presente sino también en las del futuro. Alcanzar un sistema urbano sustentable debe ser una prioridad para los tomadores de decisiones. Con el tiempo el costo de mitigación se compensará con lo ahorrado en desastre naturales.

Las ciudades necesitan adoptar más este tipo de planes que integren la mitigación, la adaptación y el desarrollo urbano. El querer mejorar la calidad de vida de los ciudadanos requiere ya de la idea de adaptar la infraestructura existente que se tenga al cambio climático y en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Las ciudades alrededor del mundo con excelentes servicios son aquellas que generan una mayor resiliencia. Un sistema de drenaje eficiente puede reducir las inundaciones, así como servicios médicos equipados correctamente pueden atender cualquier emergencia. Sistemas de alerta a la población y una correcta infraestructura de transporte va a permitir a una mayor cantidad de ciudadanos el evacuar ante cualquier emergencia (The World Bank, 2010). Al final del día no basta con invertir grandes cantidades de dinero y cambiar las políticas y sistemas económicos de la sociedad actual, el cambio debe de ser profundo y verdadero, un cambio en la forma de pensar de la gente, una idea que genere una cadena de cambios (Klein, 2015).

Dentro de los 7 pasos que propone el Instituto de Estocolmo para alcanzar la sustentabilidad en una sociedad moderna, se encuentra el número 3, en el cual se describe como los sistemas socio-ecológicos tienden a adaptarse a cambios en sus ambientes, así como a cualquier impacto que los intente alterar. Por lo que cuando se presenta algún cambio, el sistema tiende a reaccionar y generar una respuesta a el mismo y así evitar cualquier perturbación al sistema (Simonsen et al, s/f).

Para poder alcanzar una resiliencia dentro de nuestro sistema urbano, se deben de pensar en las formas de ayudar a contrarrestar los efectos que se pudieran presentar debido a una inundación por ejemplo (Simonsen et al, s/f).

3.4. Medidas de mitigación para inundaciones

Actualmente la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) cuenta con un sistema de drenaje bastante complejo, con tres salidas artificiales denominadas: Gran Canal del Desagüe (Túneles de Tequisquiac), Emisor del Poniente (Tajo de Nochistongo) y el Emisor Central. Los tres fueron edificados en distintas épocas y en distintas situaciones, pero con la misma finalidad de equilibrar las entradas y salidas de agua en la ciudad (Aguilar, 2007). La cual al estar en una cuenca endorreica, la salida del agua es imposible a menos que se desarrollen grandes infraestructuras de desagüe y a la falta de ello puede acarrear serias consecuencias adversas a la población humana.

Diversas son las medidas de mitigación de inundaciones que se pueden encontrar hoy en día, para este trabajo se considerarán a manera de ejemplo los jardines de lluvia, el pavimento poroso, las azoteas verdes y los tanques de agua de lluvia. Destacando que estas no pretenden ser las únicas medidas que se puedan utilizar, son solo mencionadas a manera de ejemplos.

Jardines de lluvia

Entre una de las opciones para la mitigación de las inundaciones se encuentran los jardines de lluvia, los cuales tienen como principal encomienda el disminuir la escorrentía que se pueda producir debido a fuertes Pp. Esto

se debe a que el suelo del jardín está preparado para infiltrar la mayor cantidad de agua posible y así disminuir los encharcamientos o el flujo de la escorrentía. Lo que diferencia a este tipo de jardín de los demás, es precisamente esa capacidad de retener el agua por lo menos por unas 24 horas (Steiner, 2012).

Este tipo de jardines pueden sostener a distintos tipos de plantas endémicas así como especies de pájaros locales, por lo que se vuelven atractivos para las personas. Son también conocidos por ser sistemas de drenaje natural, ciudades como Seattle en Estados Unidos, actualmente implementan programas de sociales que incentivan a los ciudadanos para que instalen sus propios jardines de lluvia y así poder disminuir la contaminación por escorrentía de los principales lagos de la ciudad. A través del programa de RainWise el gobierno local paga parte de los costos de instalación del jardín (RainWise Program,2015).

Además de captar el agua de lluvia, el jardín también es capaz de retener el nitrógeno, el fósforo y los sedimentos que pueda contener el agua de lluvia, esto gracias a la misma acción de las plantas (Bardgett,2012).

Pavimento poroso

Un nuevo tipo de pavimento ha surgido en los últimos años para mitigar las inundaciones en las grandes urbes. Este pavimento, conocido como pavimento poroso, permite el paso del agua desde la parte superficial hasta la interna del material. Por lo que se previene cualquier tipo de inundación así como posibles escorrentías por diferencias de alturas dentro de la ciudad. El material que se usa para el mismo se le conoce como hormigón, el cual tiene como una de sus principales características el ser permeable, por lo que facilita la infiltración del agua.

Entre las otras múltiples ventajas de implementar este tipo de pavimento, son la reducción de contaminación debido a escorrentía de agua de lluvia ya que retienen parte de los contaminantes, proporciona ventilación al suelo, además de que reduce el ruido de los automóviles entre otras cosas.

Azoteas Verdes

Las azoteas verdes o techos verdes son aquellos tipos de jardines construidos en las partes altas de las viviendas. Dichas azoteas pueden tener distintos propósitos, como lo son la captura de agua de lluvia, el aislamiento térmico y acústico de la vivienda, además de constituir un mejoramiento estético de la misma (Minke, s/f).

La idea de usar las azoteas verdes como forma de mitigación de inundaciones surge del conocimiento que se tiene de los múltiples servicios ecosistémicos que pueden brindar. Se ha comprobado que una azotea de este tipo puede retrasar el tiempo de escurrimiento del agua de lluvia de 0.5 a 4.5 h, así como disminuir su intensidad del 42 al 96 %, claro esto está sujeto a las características del lugar y del sustrato que se esté implementando. Gómez(2009) reportó que estas áreas cubiertas de vegetación pueden tener la capacidad de retener hasta el 50 % del agua de precipitaciones de 30 mm (Gómez, 2009).

Otra ventaja que tienen es que son capaces de retener hidrocarburos aromáticos altamente cancerígenos así como metales pesados como el plomo y el zinc. Al igual que el bióxido de carbono el cual se respira a diario debido a la contaminación. Por lo que es otro de sus múltiples servicios ambientales que pueden ofrecer a una comunidad (Reyes, 2015).

También son capaces de incrementar el aislamiento térmico y acústico, además de regular el cambio de temperaturas dentro de la vivienda al evaporar agua constantemente (Gauzin-Muller, 2002).

La importancia del sustrato, la capa que se encuentra debajo de la superficie del suelo, no solo radica en ser la base de donde se asentará y crecerá la vegetación sino que representa la superficie en donde el agua podrá ser absorbida, estando disponible para las plantas y así se podrá disminuir la velocidad de la escorrentía y dar tiempo a que los sistemas de drenaje de la ciudad no se saturen.

Un sustrato que contenga arcilla es siempre ideal para la retención del agua. La arcilla presenta una superficie mucho más grande que la arena y además se encuentra cargada. Tal circunstancia proporciona a las arcillas la capacidad de retener tanto nutrientes como agua de mejor manera (Thompson, 2002). Las plantas que se podrían usar en una azotea verde dentro de la Ciudad de México serían las que viven silvestres en zonas áridas y desérticas y que por ende se encuentran ya adaptadas a la sequedad y a las altas temperaturas, nos referimos a las plantas xerófilas. Estas plantas cuentan con tejidos carnosos los cuales son capaces de conservar el agua ya sea en los tallos, en las hojas o en el sistema radicular, lo que les permite sobrevivir varios

días sin agua. Las condiciones climáticas urbanas de la capital suelen ser extremosas a lo cual puede adaptarse este tipo de plantas dadas sus características (Shantz, 1956).

En la literatura se pueden encontrar diversas hipótesis sobre el coeficiente de escorrentía y el poder de retención de agua de las azoteas verdes. Por ejemplo una azotea verde con 20 cm de sustrato de tierra y arcilla expandida puede, según Dürr (1995), almacenar 90 mm de agua, lo que vendrían siendo 90 litros por m².

La norma alemana DIN 1986, parte 2, dice a manera de ejemplo que para superficies de azoteas verdes con un sustrato de espesor de 10 cm como mínimo, el coeficiente de desagüe de aguas pluviales puede llegar al valor de 0.3. Es decir solo el 30% del agua que cayó de lluvia llegará al drenaje, mientras que el 70% restante será retenida por el mismo sustrato. Estudios llevados a cabo por la Universidad de Kassel en Alemania encontraron que si se tiene un techo con una inclinación de hasta 12° y 14 cm de espesor de sustrato, después de un evento fuerte de lluvia con duración de 18 horas, puede haber un retraso de hasta 12 horas del desagüe pluvial. El agua termina de desaguar recién 21 horas después del primer reporte de lluvia (Katzschner, 1991).

Los techos verdes al retener la mayor cantidad de agua posible tienen la facultad de poder disminuir las altas crestas que se pueden presentar en un hidrograma, gráfica que caracteriza al flujo del agua de lluvia durante algún evento extremo. Justamente son esos “picos de desagüe” los que queremos mitigar con el fin de evitar cualquier encharcamiento o posible inundación (Fig. 3).

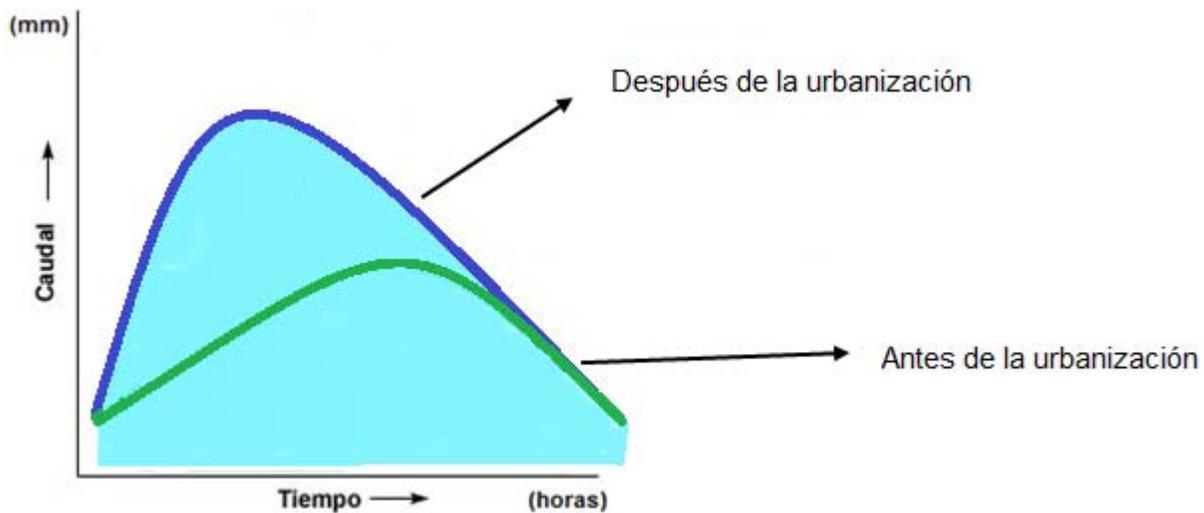


Figura 3. Modelo de Hidrograma/Pluviograma que representa la diferencia de picos de escorrentía entre la urbanización y la no urbanización. Figura modificada de BiologíaSur.

En esto tiene mucho que ver lo que se conoce como capacidad de campo que se define como la cantidad de agua que el suelo puede retener en contra de la gravedad, por definición se dice que es el agua que puede mantener un suelo inicialmente saturado, después de 48 horas de drenaje. El agua se drena generalmente por los poros mayores de 0.05 mm de diámetro, sin embargo, también poros de 0.03 y 1 mm de diámetro corresponden a la capacidad de campo. Existen otros factores como el contenido de materia orgánica y la estructura del suelo, por ejemplo, un suelo bien estructurado llega a tener la capacidad de drenar en un tiempo corto (horas o días) el agua mientras que uno con una pobre estructura le puede llevar hasta semanas terminar de hacerlo (FAO, 2015).

Tanques de captura de agua de lluvia

Las cisternas o tanques de captura de agua de lluvia aparecen como otra alternativa para la mitigación de inundaciones. Uno de los orígenes de la idea del uso de este tipo de cisternas proviene de la necesidad de varias ciudades alrededor del mundo de crear una fuente más de agua que pueda ser potabilizada para su consumo humano. Ciudades en Australia, España y Jordania con problemas serios de sequías a lo largo del año fueron las primeras en plantearse esta disyuntiva (Sharma, 2015).

No obstante, otro de los usos que se les puede dar a este tipo de tanques es precisamente el de la mitigación de inundaciones, ya que el agua de las precipitaciones puede ser capturada para un uso exclusivamente doméstico y así se evitan los encharcamientos o inundaciones. Se deben de tomar las precauciones debidas ya que el agua recolectada no se recomienda en ninguna circunstancia para consumo humano por los contaminantes que pudiera contener, a menos que se realice su saneamiento.

Se han llegado a identificar diversos microorganismos en el agua de lluvia del sur del Distrito Federal tales como: *Bacillus subtilis*, *Bacillus brevis*, *Leuconostoc pseudomesenteroides*, *Leuconostoc lactis* y *Aerococcus viridans*, los cuales según la literatura no son una amenaza para los humanos (Rojas-Valencia et al., 2012).

Sin embargo, los que podrían afectar la salud humana, son las bacterias *E. coli* y *Enterobacter aerogenes*, las cuales a pesar de su mínima concentración, pueden representar un riesgo de infección y es por eso que no es recomendable su consumo (Rojas-Valencia et al., 2012).

Al comparar los datos obtenidos y la NOM-003-SEMARNAT-1997 se observa que el agua de lluvia captada cumple con los parámetros establecidos para contacto directo con el hombre (Rojas-Valencia et al., 2012).

El gran reto en este caso es el poder adaptar el diseño de un recipiente recolector dependiendo del sitio donde se encuentre para alcanzar una mayor eficiencia en la captura del agua. Esto se puede lograr teniendo la adecuada información sobre las características específicas de la precipitación pluvial (cantidad e intensidad). Otros aspectos importantes a considerar son la pendiente de la azotea donde se instale el tanque, así como los sistemas de bombeo que se tengan que instalar para acarrear el agua colectada.

Actualmente se han desarrollado en distintos países del mundo diferentes modelos que se dedican a probar la eficiencia de las cisternas o tanques en países como Australia, Brasil, Italia y España, entre muchos otros.

4. Hipótesis y Objetivo

4.1. Hipótesis

Los fenómenos de inundaciones en la Ciudad de México se presentan de manera más común, esto en parte debido a la distribución espacial y cuantitativa de la Pp y además al hecho de que pudiera existir una inadecuada planeación urbana y un cambio progresivo del uso de suelo en las últimas décadas dentro de la ciudad.

4.2. Objetivo general:

Determinar la tendencia de la intensidad y de la cantidad de la Pp en los últimos 40 años en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y relacionar dichas tendencias con episodios de inundaciones con el fin de aportar información valiosa para la planeación urbana con medidas de mitigación semejantes a las azoteas verdes.

4.3. Objetivos particulares:

- Hacer un recuento de los aspectos históricos y científicos ligados a las inundaciones en la capital mexicana.
- Realizar una descripción de la distribución, cantidad total e intensidad de las precipitaciones pluviales dentro de la ZMCM.

- A partir del Sistema de Inventario de los Efectos de Desastres Naturales evaluar la relación entre las afectaciones de inundaciones reportadas y la información obtenida a partir del estudio de las precipitaciones.
- Proponer modelos de sistemas de mitigación de inundaciones dentro de las condiciones ambientales de la ZMCM.

5. Método

5.1. Sitio de estudio

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México está constituida por 16 delegaciones de la Ciudad de México, 18 municipios del Estado de México y 1 municipio de Hidalgo. Cuenta con una población cercana a los 29 millones de habitantes (la sumatoria de la Ciudad de México, 18 municipios del Estado de México y 1 municipio de Hidalgo) y con una superficie de 3540 km² lo que representa el 37% de la cuenca del Valle de México (INECC,s/f).

Dicha Zona se ubica dentro de una cuenca, la cual se encuentra sobre los 19° 24' de latitud norte y 99° 05' de longitud oeste, cuya elevación promedio es de 2240 msnm y una superficie de 9540 km².

La cuenca se encuentra rodeada por montañas y esto provoca entre otras cosas precipitación orográfica y dificultad en el movimiento del viento y dispersión de contaminantes.

El clima de la cuenca es templado en el centro y sur, y seco de tipo estepa en la parte norte y oriente, donde hay mayor escasez de lluvias. La lluvia anual varía entre 400 y 550 mm. Las lluvias son más abundantes al sur en el piedemonte, esto debido al levantamiento orográfico donde caen entre 700 y 1200 mm de lluvia al año en promedio. En contraste en el centro y noreste, las lluvias son menos comunes. La temperatura anual oscila entre 15 y 17 °C (Jauregui, 2000).

En la etapa, que abarca de 1950 a 1980, denominada por diversos autores como la de "dinámica metropolitana", el área metropolitana de la ciudad de México sufrió un crecimiento urbano considerable hacia el norte, extendiéndose sobre municipios de Naucalpan, Chimalhuacán y Ecatepec (Sánchez, 2011).

Aunque hay que mencionar que el sur de la ciudad no ha estado exento de este crecimiento urbano acelerado, ya que también se ha observado un crecimiento y un cambio de uso de suelo en las más recientes décadas.

Los asentamientos irregulares se han hecho cada vez más comunes en las últimas dos décadas sobre todo en lo que viene siendo la periferia de la ciudad, la extinción de las áreas verdes es algo que se está viviendo a diario, al igual que la reducción en la extensión de los suelos de conservación, notablemente al sur de la ciudad (Salazar, 2005).

En delegaciones como Álvaro Obregón, Cuajimalpa de Morelos, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tlalpan, Tláhuac y Xochimilco se calcula que hay cerca de 50,703 viviendas dentro de asentamientos irregulares (PAOT, 2014).

En general el área urbana de la ZMCM ha aumentado su tamaño (km²) en estas últimas décadas como se puede apreciar en la Fig. 4.

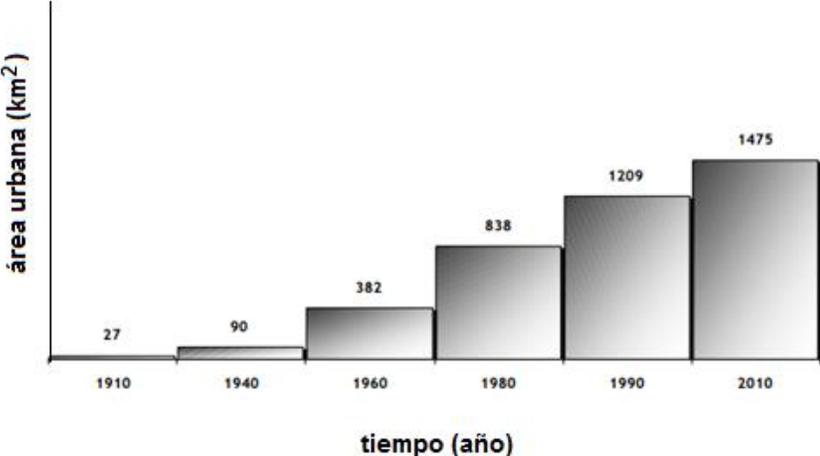


Figura 4. Crecimiento del área urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México de 1910 a 2010.

Figura Modificada: UAM, s/f.

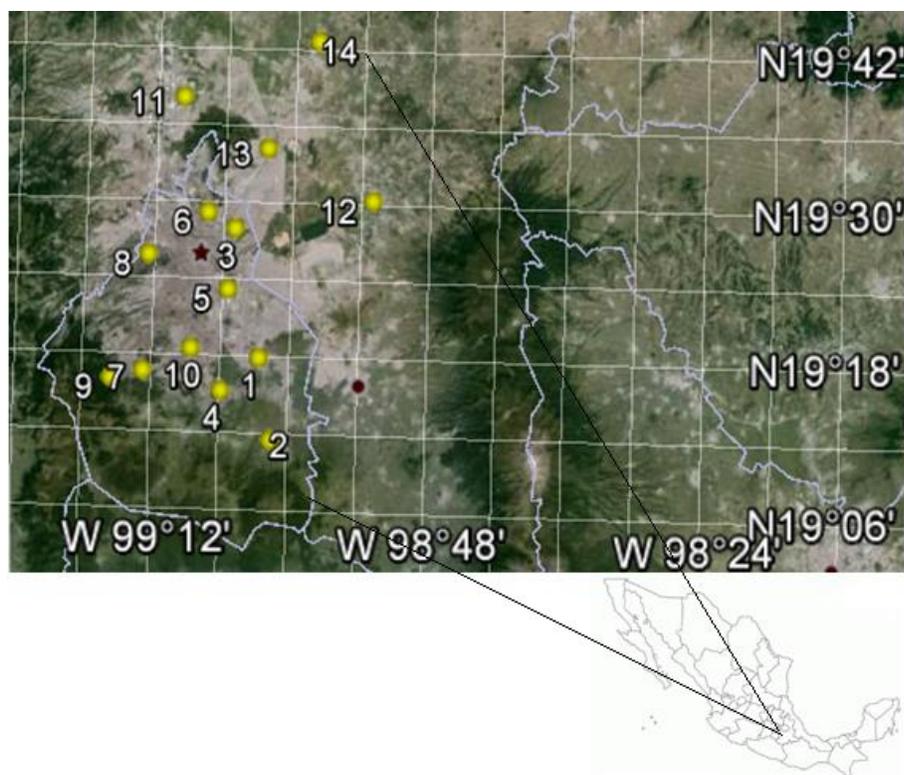


Figura 5. Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Google Earth) y la distribución de las 14 estaciones meteorológicas que formaron parte del estudio (Tabla 1).

Tabla 1. Estaciones meteorológicas cuyos datos se utilizaron en este estudio (Servicio Meteorológico Nacional, s/f).

No.	Estación meteorológica	Latitud °	Longitud °	Altitud (msnm)
1	Tláhuac, Tláhuac	19.2628	-99.0036	2,240
2	Santa AnaTlacotaco, Milpa Alta	19.1789	-99.0028	2,595
3	San Juan de Aragón, Gustavo A Madero	19.4653	-99.0792	2,240
4	San Francisco Tlalnepantla, Xochimilco	19.1967	-99.1286	2,620
5	Playa Caleta, Iztacalco	19.3953	-99.0978	2,235
6	Gran Canal km 06t250, Gustavo A Madero	19.4767	-99.0914	2,239
7	El Guarda, Tlalpan	19.1344	-99.1731	2,990

8	Colonia América, Miguel Hidalgo	19.4125	-99.2017	2,271
9	Desviación Alta El Pedregal, Tlalpan	19.2969	-99.1822	2,296
10	Colonia Santa Úrsula, Coapa, Coyoacán	19.3033	-99.1481	2,256
11	Presa Guadalupe, Tultitlán	19.6233	-99.2822	2,310
12	San Miguel Tlaixpan, Texcoco	19.5194	-98.8125	2,405
13	Gran Canal km 27+250 , Ecatepec de Morelos	19.5617	-99.0194	2,236
14	San Jerónimo Xonocahuacan, Tecamac	19.7508	-98.9494	2,265

5.2. RClindex

Se construyeron series de precipitación pluvial (Pp) de los últimos 52 años de las 14 estaciones climatológicas distribuidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) (Fig.5). Estas series se construyeron a través del software ETCCDI, RClindex versión Microsoft Windows, recomendado por el IPCC, el cual se especializa en el análisis estadístico de variables climáticas como la Pp. Los datos de Pp se extrajeron de las bases de datos proporcionadas vía internet por el Servicio Meteorológico Nacional.

Se requiere tener como mínimo el 80% de datos completos de las bases de datos de Pp para que el programa pueda realizar los cálculos correspondientes de los índices. De no ser así, no es posible completar ningún proceso. No todas las estaciones cumplían con este requisito por lo que solo se eligieron en esta ocasión 14 de 60 estaciones en la Ciudad de México y las 4 que se eligieron del Estado de México, que se mencionan en la tabla 1

Este software fue desarrollado por Byron Gleason del National Climate Data Centre (NDC) de la NOAA y fue elaborado con el objetivo principal de crear un programa que no dependiera de un sistema operativo en particular. La plataforma RClindex está diseñada como un programa novedoso y amigable para el cálculo rápido y sin mayor dificultad de los distintos índices de extremos climáticos. Puede ser ejecutado tanto en Windows como en Unix. La plataforma en la cual se trabaja es desde el programa R, la cual posee una amplia variedad de opciones de gráficos y análisis estadístico, además de que es de fácil acceso para gran parte de los usuarios.

Se procedió a verificar la distribución espacial y temporal de la precipitación en la Ciudad de México (Distrito Federal) e incluyendo algunos municipios del estado de México que conforman la ZMCM (Fig. 5, Tabla 1). Se utilizaron específicamente los índices: PRCPTOT (precipitación total), Rx1day (cantidad máxima de precipitación en 1 día), Rx5day (cantidad máxima de precipitación en 5 días), R10 (número de días con precipitación intensa), R20 (número de días con precipitación muy intensa) y SIID (intensidad de precipitación por hora).

5.2. Índices de precipitación pluvial

Cada índice se representó con un mapa de isoyetas, las cuales constituyen aquel lugar geométrico donde se juntan los puntos de igual precipitación (Martínez, 2006).

Dichos mapas se elaboraron a través de un software (Surfer versión 10), usando el método de Kriging. El cual es un método geoestadístico de interpolación que resulta sumamente útil y nos brinda a través de una muestra de puntos, valores estimados de aquellos sitios donde no exista suficiente información, sin sesgo y con una varianza mínima conocida (FAO, 2015).

En cada índice obtenido se implementó una escala de color azul donde los tonos más oscuros representaron mayor cantidad o presencia de agua de lluvia.

5.3. Pruebas Estadísticas de Homogeneidad de datos y de Mann-Kendall

A través de las pruebas Monte Carlo, von Neumann y Pettitt se buscó comprobar la homogeneidad de las series de datos de cada una de las 14 estaciones empleadas en este estudio. Dichas pruebas fueron realizadas en el paquete estadístico de XLSTAT, el cual al realizar la valoración de datos señalaba si la hipótesis nula H_0 (datos homogéneos) o la hipótesis alterna H_1 (datos no homogéneos, existe un salto) se comprobaban.

Se usó el análisis estadístico de Mann-Kendall para comprobar la significancia de las tendencias de la cantidad de las variables escogidas de precipitación total y de la intensidad de la precipitación total. La significancia estadística se estableció en $P < 0.05$.

Dicha herramienta estadística se caracteriza por ser no paramétrica por lo que no requiere de una distribución normal de los datos que se vayan a analizar, además de que es altamente sensible a cambios abruptos debido a inhomogeneidades en las series de datos. De acuerdo a esta prueba, la hipótesis nula H_0 asume que no existe una tendencia, mientras que la hipótesis alterna H_1 que si existe una (Karmeshu, 2012).

Fue a través del software XLSTAT que se llevó a cabo la prueba ya mencionada para las 14 estaciones estudiadas durante el período de tiempo ya mencionado.

5.4. Sistema de Inventario de los Efectos de Desastres Naturales

Posteriormente utilizando el Sistema de Inventario de los Efectos de Desastres Naturales, el cual es parte de LA RED de la Corporación de Osso, Colombia, que está sincronizada con información proporcionada por el gobierno local y por los diarios de mayor circulación locales, se elaboró una relación sobre los eventos de inundaciones y daños reportados dentro de la zona metropolitana con los estudios de precipitación obtenidos. Dicha información se representó en un mapa donde a través de una escala de color rojo se mostraron las zonas de la ciudad en donde han existido un mayor número de reportes de incidentes relacionados con inundaciones dentro del periodo de tiempo de 1970-2013.

5.5. Cálculo de tanque de captura de agua de lluvia

Un ejemplo que se encuentra en la literatura para poder calcular la máxima cantidad de agua de lluvia que puede ser capturada anualmente es la fórmula proporcionada por el Gobierno Australiano (2013), la cual ha sido promovida por dicho gobierno en su incesante intento de convencer a sus ciudadanos de adoptar este tipo de medidas en un país constantemente azotado por las sequías. El hecho de que la misma gente pueda calcular por cuenta propia la capacidad de captación de agua de lluvia de sus propios tanques de captura resulta de suma importancia en miras a un futuro más sustentable:

$$\text{Agua capturada (L)} = A [\text{Agua de lluvia (mm)} - B] [\text{Área del techo (m}^2\text{)}]$$

Donde A es el coeficiente de escurrimiento que se decida usar, 0.85 (Martin, 1980), el agua de lluvia es la acumulada anualmente y B es el valor estándar propuesto por el autor y asociado a la pérdida por absorción o que se quede retenida en la azotea de 2 mm/mes (24 mm/año).

Si la intensidad de lluvia resulta rebasar a la cantidad de agua que se pueda capturar, entonces se deberán tomar acciones, por ejemplo ampliar la zona de captura de agua.

En esta ocasión se decidió como ejemplo tomar dos extremos de la ciudad, San Juan de Aragón, GAM y Desviación Pedregal, Tlalpan, para ilustrar que cantidad potencial de agua se podría capturar.

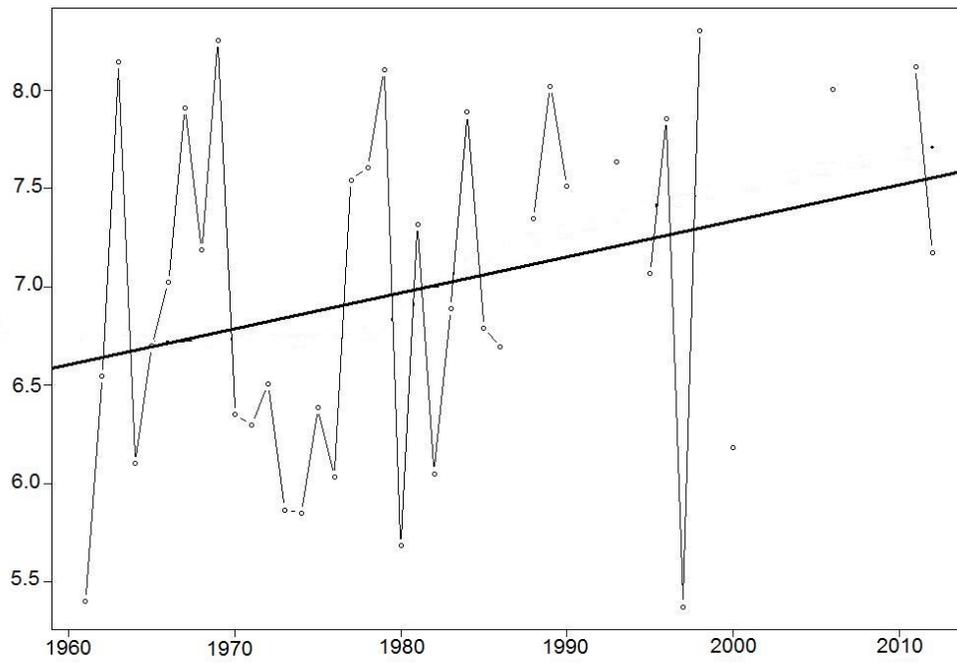
Para poder determinar la cantidad de agua que caerá en la superficie de la azotea a partir de conocer los datos de máximos y mínimos de intensidad en los dos sitios elegidos se multiplicaron los litros por día ($1 \text{ mm}=1 \text{ L/m}^2$) por la medida de superficie en donde caerá.

6. Resultados

6.1. Tendencias de la precipitación pluvial

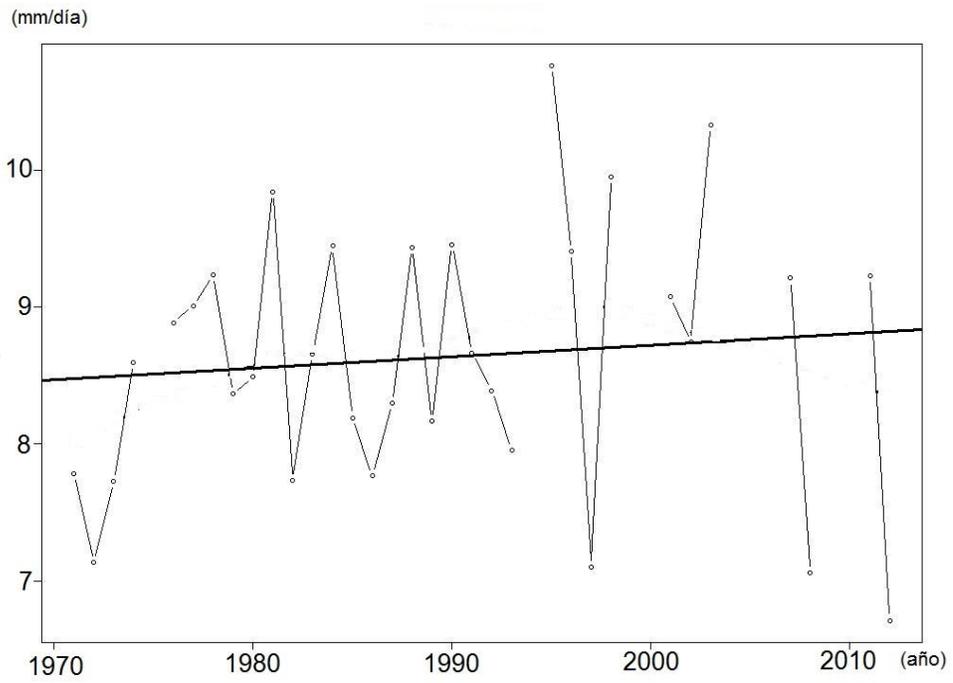
A manera de ejemplo se muestran dos de las gráficas obtenidas de intensidad en San Miguel Tlaixpan, Texcoco (norte) y Colonia Santa Úrsula, Coapa, Coyoacán (sur), Fig 6. Es importante mencionar que ambas gráficas fueron desplegadas por RClindex al momento de calcular los índices, por lo que los valores de R^2 , valor de p, pendiente de la gráfica y error asociado de la gráfica fueron calculados por el mismo programa.

A) *San Miguel Tlaixpan, Texcoco*



$R^2= 8.5$, valor de $p= 0.076$, pendiente de la recta= 0.018 , error asociado a la recta= 0.01

B) Colonia Santa Úrsula, Coapa, Coyoacán



$R^2= 8.5$ valor de $p= 0.076$, pendiente de la recta= 0.018 , error asociado a la recta= 0.01

Figura 6.- Intensidad de la precipitación en San Miguel Tlaixpan, Texcoco (A) y en Colonia Santa Úrsula, Coapa, Coyoacán (B).

Ambas estaciones presentan una tendencia positiva durante el período de tiempo estudiado. Esto podría indicar que posiblemente la intensidad de la lluvia ha aumentado en el pasado, aunque como se puede apreciar no se cuentan con suficientes datos ni con una homogeneidad adecuada como para predecir algún cambio a futuro.

En las tablas (2 y 3) se muestran la ecuación de la recta que se obtuvo en cada una de las estaciones, así como el valor de P, su tendencia (positiva +, negativa -) y su calificación de acuerdo a la prueba Mann-Kendall con un valor de significancia $P < 0.05$ y a la Prueba de Homogeneidad de datos.

6.2- Tablas de Homogeneidad de Datos y Mann-Kendall

Tabla 2. Tendencia de la Pp total :

	Precipitación Total/ Nombre	Ecuación de la Tendencia de Precipitación Total	Valor de r^2	Valor de P	Tendencia	Mann-Kendall (P < 0.05)	Prueba de Homogeneidad de datos
1	Tláhuac, Tláhuac	$y = -3.1803x + 6863.6$	0.1414	0.000	-	✓	X
2	Santa Ana Tlacotaco, Milpa Alta	$y = -1.975x + 4630.3$	0.0599	0.002	-	✓	X
3	San Juan de Aragón, Gustavo A Madero	$y = 1.7065x - 2786.9$	0.1068	0.005	+	✓	X
4	San Francisco Tlalnepantla, Xochimilco	$y = -0.3158x + 1588.7$	0.0027	0.133	-	X	X
5	Playa Caleta, Iztacalco	$y = 4.1919x - 1630.7$	0.2082	0.001	+	✓	X
6	Gran Canal km 06t250, Gustavo	$y = 1.926x - 3219$	0.1157	0.014	+	✓	X

	A Madero						
7	El Guarda, Tlalpan	$y=10.63x-19730$	0.1218	0.022	+	✓	X
8	Colonia América, Miguel Hidalgo	$y=15.858x - 30470$	0.080	0.002	+	✓	X
9	Desviación Alta El Pedregal, Tlalpan	$y=1.6728x - 2297.6$	0.022		+	✓	X
10	Colonia Santa Úrsula, Coapa, Coyoacán	$y=1.1866x-1528.4$	0.0132	0.130	+	X	X
11	Presa Guadalupe, Tultitlán	$y=-0.0424x+778.99$	6E-05	0.475	-	X	X
12	San Miguel Tlaixpan, Texcoco	$y=1.237x-1890.9$	0.0434	0.024	+	✓	X
13	Gran Canal km 27+250, Ecatepec de Morelos	$y=-1.0039x+2582.9$	0.0268	0.084	-	X	X
14	San Jerónimo Xonocahuacan, Tecamac	$y=-2.2237x+4991.1$	0.0982	0.017	-	✓	X

Tabla 3. Tendencia de la Intensidad de la Pp :

	Precipitación Total/ Nombre	Ecuación de la Tendencia de Precipitación Total	Valor de r^2	Valor de P	Tendencia	Mann-Kendall (P < 0.05)	Prueba de Homogeneidad de datos
1	Tláhuac, Tláhuac	$y = 0.0592x - 108.81$	0.1857	<0.0001	+	✓	X
2	Santa Ana Tlacotaco, Milpa Alta	$y = -0.0122x + 31.743$	0.0598	0.042	-	✓	X
3	San Juan de Aragón, Gustavo A Madero	$y = 0.0258x - 43.876$	0.2859	<0.0001	+	✓	X
4	San Francisco Tlalnepantla, Xochimilco	$y = -0.0536x + 117.55$	0.3033	<0.0001	-	✓	X

5	Playa Caleta, Iztacalco	$y = 0.0328x - 56.664$	0.1841	<0.0001	+	✓	X
6	Gran Canal km 06t250, Gustavo A Madero	$y = 0.0315x - 54.92$	0.3087	<0.001	+	✓	X
7	El Guarda, Tlalpan	$y = 0.1699x - 325.08$	0.3938	<0.0001	+	✓	X
8	Colonia América, Miguel Hidalgo	$y = 0.0375x - 65.233$	0.1999	0.002	+	✓	X
9	Desviación Alta El Pedregal, Tlalpan	$y = 0.0041x + 1.7817$	0.0038	0.063	+	X	X
10	Colonia Santa Úrsula, Coapa	$y = 0.0088x - 8.8003$	0.0161	0.138	+	X	X
11	Presa Guadalupe, Tultitlán	$y = 0.0429x - 76.198$	0.224	0.000	+	✓	X
12	San Miguel Tlaixpan, Texcoco	$y = 0.0169x - 26.468$	0.1146	0.050	-	X	X
13	Gran Canal Km 27+250, Ecatepec de Morelos	$y = 0.052x - 95.039$	0.5259	<0.0001	+	✓	X
14	San Jerónimo Xonocahuacan, Tecamac	$y = -0.0295x + 66.505$	0.1467	0.007	-	✓	X

El valor de la ordenada es la precipitación total/intensidad de la precipitación. Cuando es positivo hay aumento, cuando es negativo hay decrecimiento. La variable de x está representada por el tiempo tanto para la intensidad como para la Pp total.

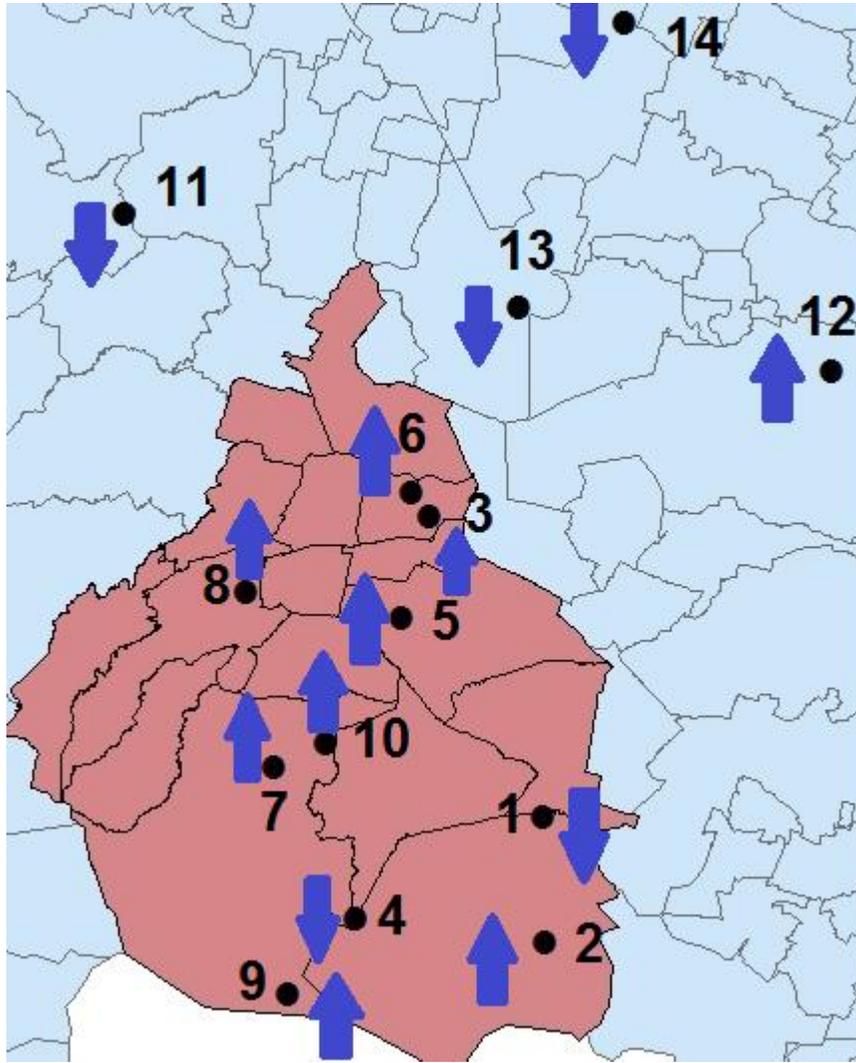


Figura 7.- Distribución de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. Las flechas azules hacia arriba representan, la tendencia positiva y las flechas azules hacia abajo, la tendencia negativa dentro del periodo de tiempo estudiado para la intensidad de la lluvia.

6.3. Distribución de la precipitación pluvial

Precipitación pluvial total

En la Fig. 8 se muestra la distribución de la precipitación pluvial total anual donde se observa un gradiente del noreste al suroeste de la Ciudad de México, con valores que van desde 550 a los 1200 mm anuales. Delegaciones como Tlalpan y Milpa Alta han recibido mayor cantidad de agua en las últimas décadas que delegaciones del norte como Gustavo A. Madero y Azcapotzalco. De acuerdo a la clasificación de Köppen el clima en la zona centro y sur de la ciudad es templado, mientras que en el norte y oriente es seco con escasez de lluvias. La explicación de esto nos lleva a pensar en el fenómeno de la precipitación orográfica, la cual se produce debido al ascenso de las masas de aire. Justamente la zona del suroeste de la ciudad es la que presenta una mayor elevación con respecto al resto debido a la presencia del volcán Xitle y el resto del campo volcánico de la Sierra de Chichinautzin. Por lo que esto explicaría el porqué del aumento de la cantidad de precipitación concentrada en esta área en específico. En Tlalpan (sur) se han llegado a registrar hasta 2873 mm en un año, mientras que en Iztacalco (centro) 1076.1 mm y en Gustavo A Madero (norte) 872.3 mm.

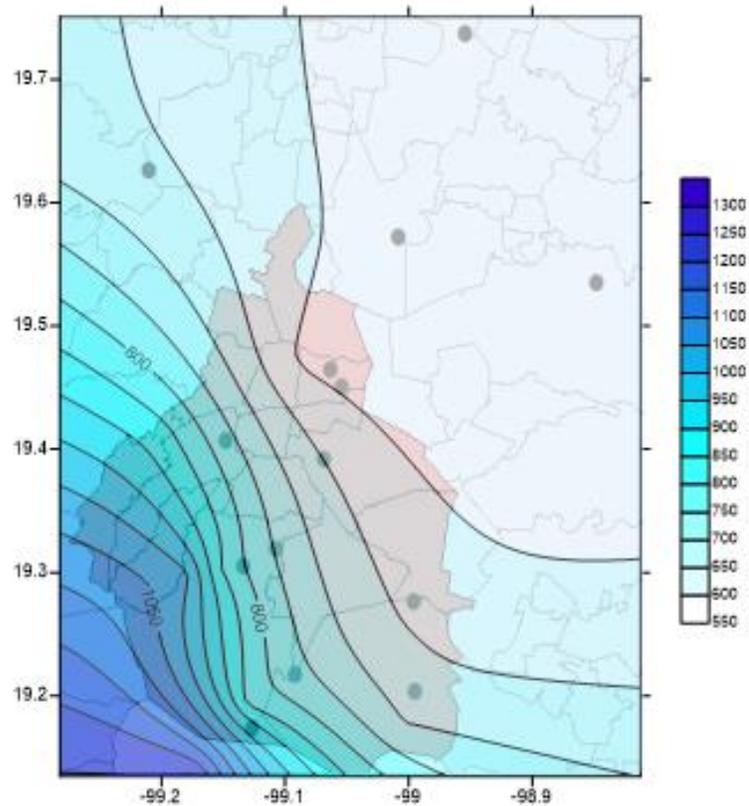


Figura 8. Distribución de la Pp total anual (mm) promedio (1970-2010) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Distribución de la tendencia de la precipitación pluvial total

Como se puede apreciar en la Fig. 9, la precipitación pluvial total presenta un incremento a través del tiempo que depende de la zona en que se trate, esto es desde un aumento de hasta 7 mm/año hacia el suroeste de ciudad, mientras que al sureste se aprecia claramente un decrecimiento significativo, alcanzando valores negativos de hasta -3.0 mm/año. El resto de la zona urbana muestra un patrón alto también entre 2 y 1.5 mm/año.

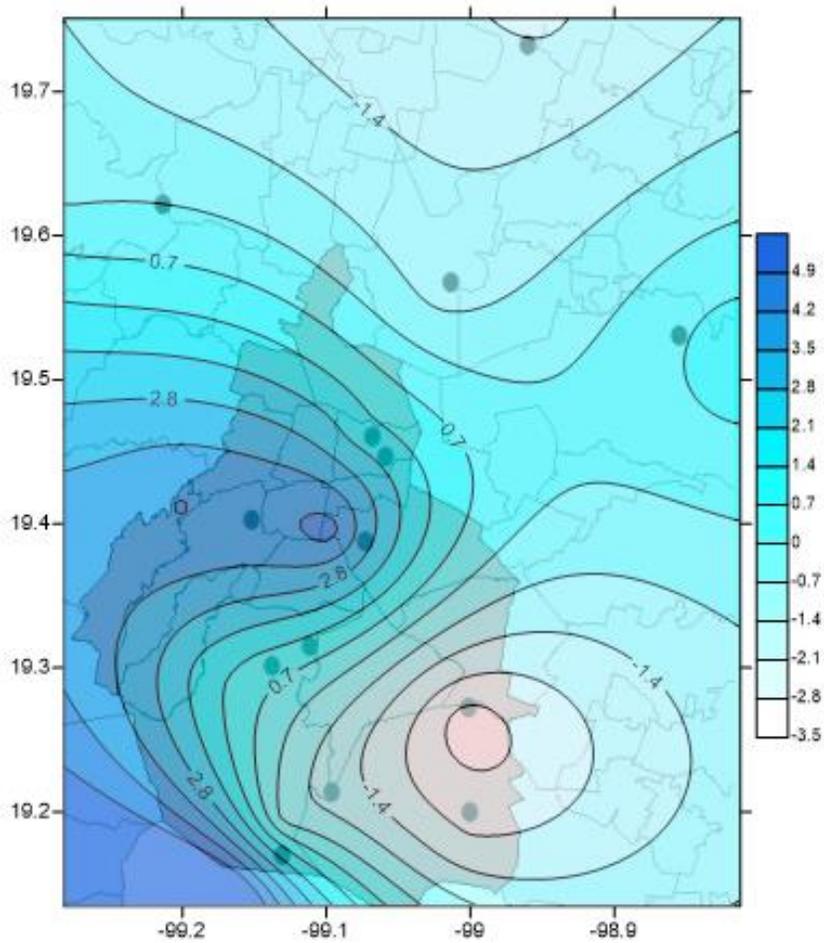


Figura 9. Distribución de la tendencia de la precipitación total anual (mm/año) en el periodo de estudio.
Los puntos representan estaciones meteorológicas de referencia.

Distribución de la intensidad de la precipitación pluvial

La intensidad se midió como la cantidad de agua (mm) que cae en un día. Como se puede apreciar en la Fig. 10, las mayores intensidades se concentran hacia el suroeste de la ZMCM, alcanzando valores de hasta 12.2 mm/día. Mientras que al noreste los niveles no rebasan los 7.5 mm/día. Claramente se presenta una gran diferencia entre las intensidades de la precipitación a lo largo de la zona urbana, muy probablemente debido a la presencia de la sierra. Las mayores intensidades de la precipitación se registran en las delegaciones de Tlalpan, Magdalena Contreras y Álvaro Obregón en comparación con el resto de la zona urbana.

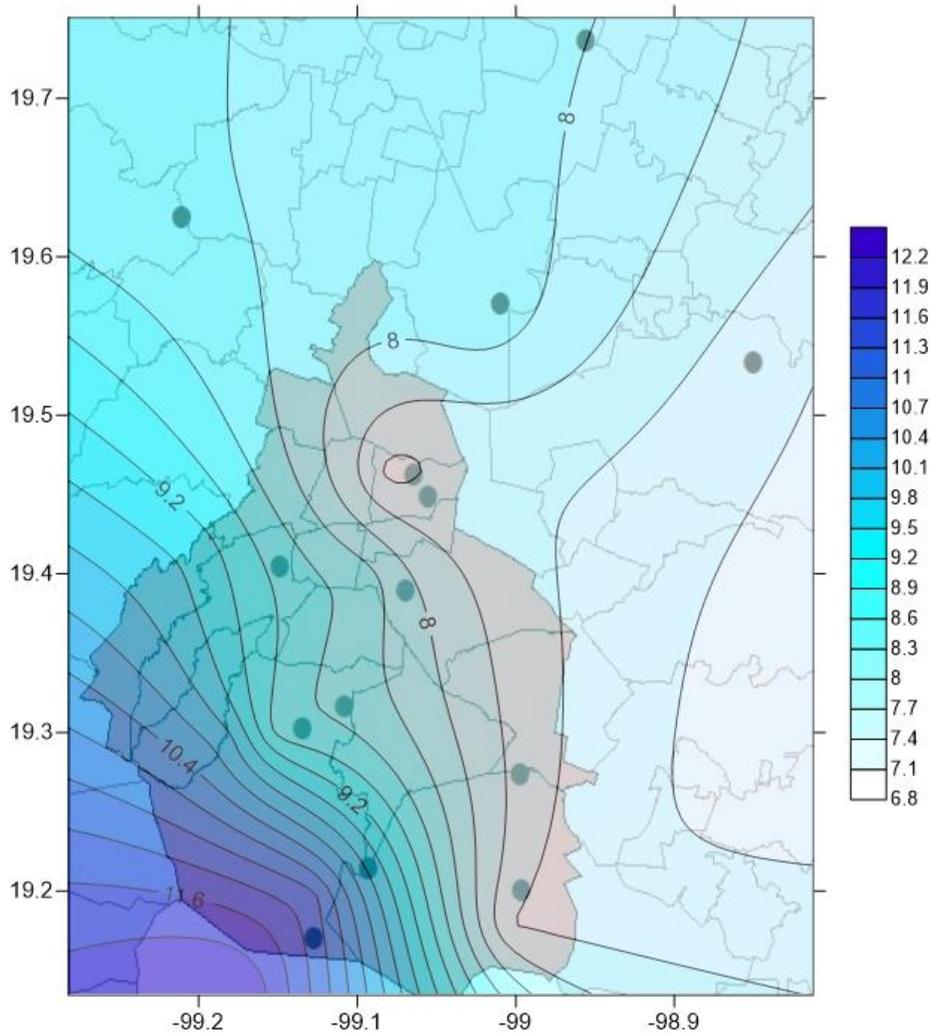


Figura 10. Distribución de la intensidad de la precipitación (mm/día) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Los puntos representan estaciones meteorológicas de referencia.

Distribución de la tendencia de la intensidad de la precipitación pluvial

La Fig. 11 muestra indudablemente una tendencia de incremento en la intensidad de la Pp, hacia el suroeste de la ciudad, indicación clara del patrón mostrado en las otras distribuciones; sin embargo, se puede apreciar un decrecimiento en la zona que abarca a las delegaciones de Tlalpan y Milpa Alta. Por lo que se puede decir que se concentra una mayor tendencia hacia el suroeste pero manteniéndose sin mayores cambios en el resto de la zona metropolitana, muy similar a lo mostrado en la Fig. 9 donde no se observa un incremento abrupto.

Se espera según algunos científicos que a diferencia de la tendencia de la precipitación total, la intensidad de los eventos de lluvia dentro de la zona urbana si aumenten debido al cambio climático y con ello el riesgo de un incremento en los episodios de inundaciones (PACCM, 2014).

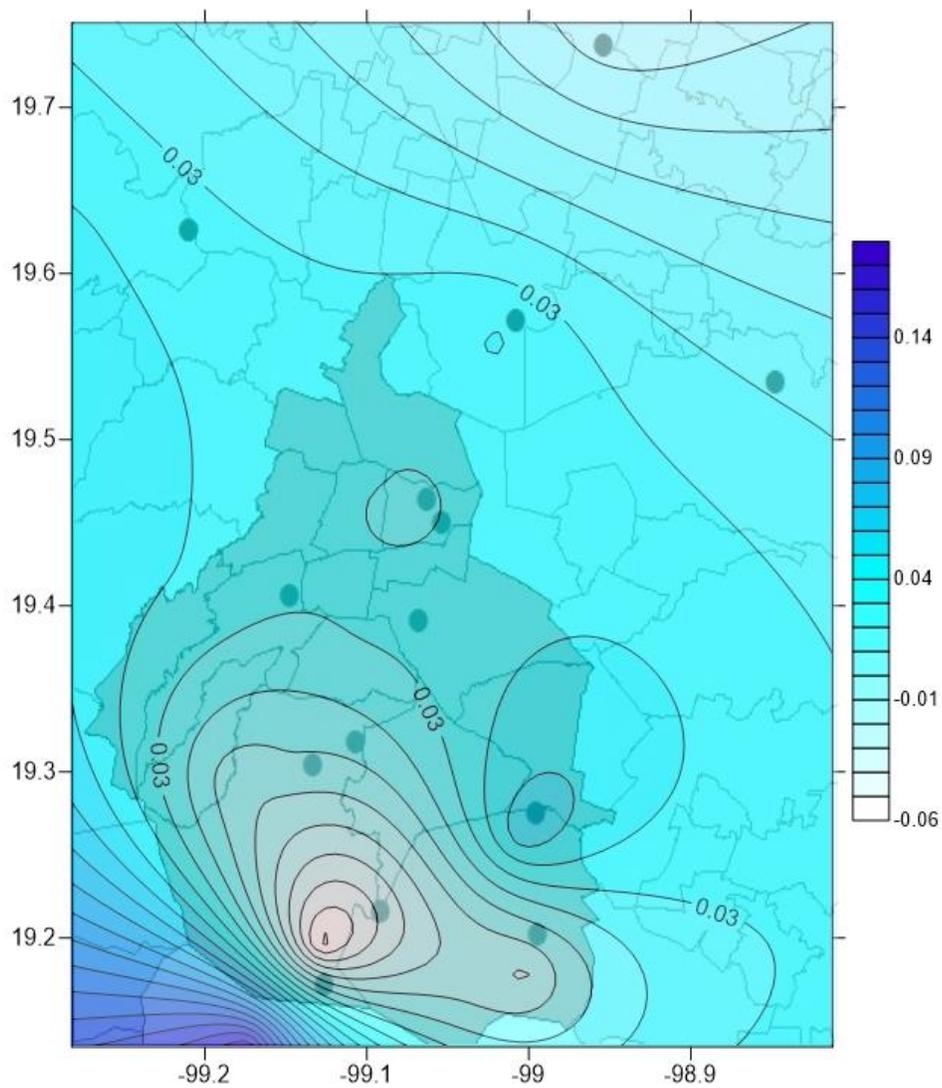
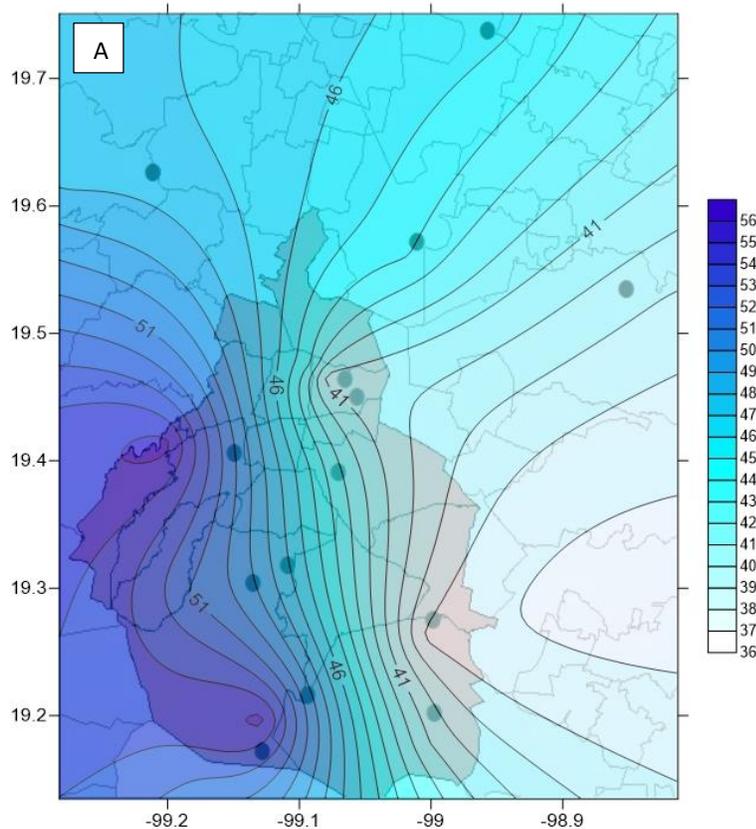


Figura 11. Distribución de la tendencia de la intensidad de la precipitación pluvial (mm/día). Los puntos representan estaciones meteorológicas de referencia.

Distribución máxima precipitación anual en un día y en cinco días consecutivos

De 1960 a 2012 la precipitación máxima en un día ha aumentado significativamente principalmente al suroeste de la urbe (Fig. 12A), mientras que al sureste los valores van decreciendo. Esta precipitación (Rx1day) supera el valor de 55 mm/día en las delegaciones Magdalena Contreras, Milpa Alta y Tlalpan, mientras que en Tláhuac prevalecen valores de alrededor 35 mm/día. Este parámetro es de gran importancia pues permite conocer cuál es la máxima precipitación que se puede dar en un solo día, con este dato se puede inferir por ejemplo y dependiendo del escurrimiento, si el drenaje es o no es adecuado. Mientras que la máxima precipitación anual en cinco días consecutivos (Rx5day) se concentra en el suroeste de la Ciudad de México, con valores que superan los 100 mm en delegaciones como Álvaro Obregón y Magdalena Contreras. Nuevamente hay un decrecimiento en lo que es el noreste/sureste del área urbana. Se aprecia claramente la diferencia en la distribución de precipitación en cinco días consecutivos a lo largo de las distintas delegaciones/municipios de la ZMCM.



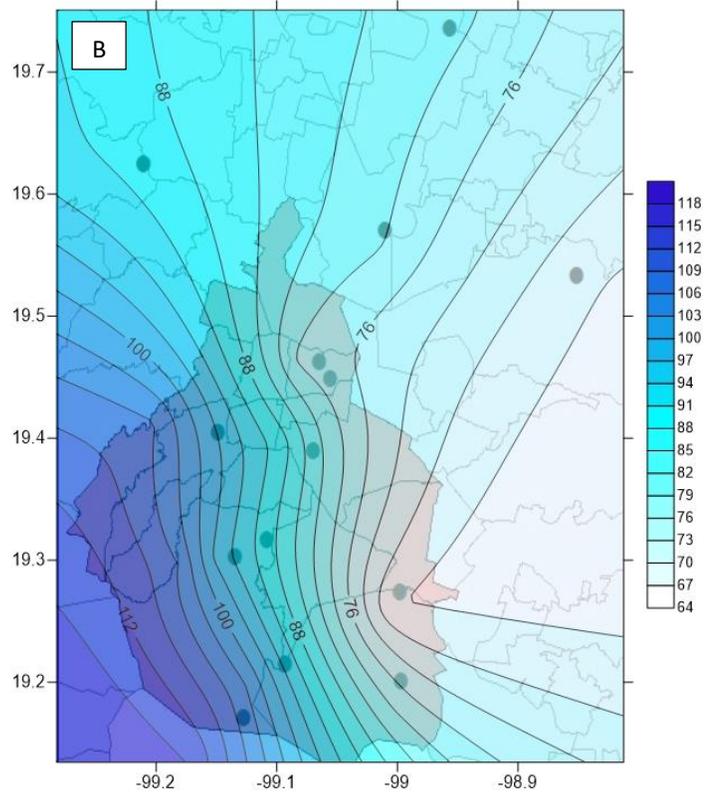
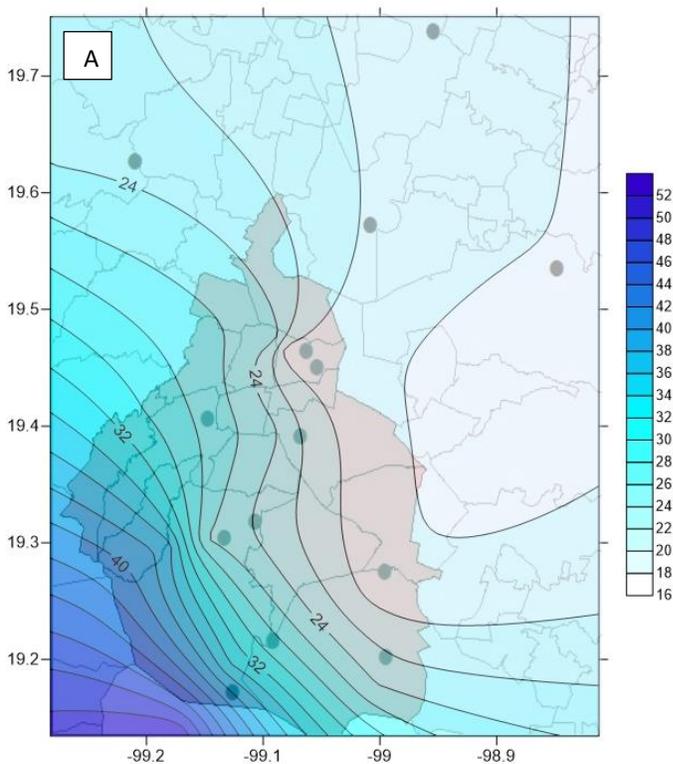


Figura 12. Distribución de la máxima precipitación anual en un día (mm) (Rx1day) (A) y máxima precipitación anual en cinco días consecutivos (mm)(Rx5day)(B).

Distribución del número de días al año en que la precipitación fue mayor o igual a 10 mm y mayor o igual a 20 mm

A continuación en la Fig. 13A se muestra la distribución del número de días al año en que la precipitación fue mayor o igual a 10 mm, donde se aprecia en que la Pp total rebasa los 10 mm, nuevamente se encuentra un mayor número de días al suroeste de la ciudad. Mientras que conforme se desplaza hacia el noreste el número de días va disminuyendo. Por otro lado, cuando el número de días en un año en que la Pp total mayor o igual a 20 mm se concentra en el suroeste de la Ciudad de México. Al noreste/sureste se observa un claro declive en el número de días, por lo menos existe una diferencia de 9 días con respecto a delegaciones como Tláhuac e Iztapalapa. En algunos sitios del suroeste de la metrópoli se alcanzan los 19 días al año.



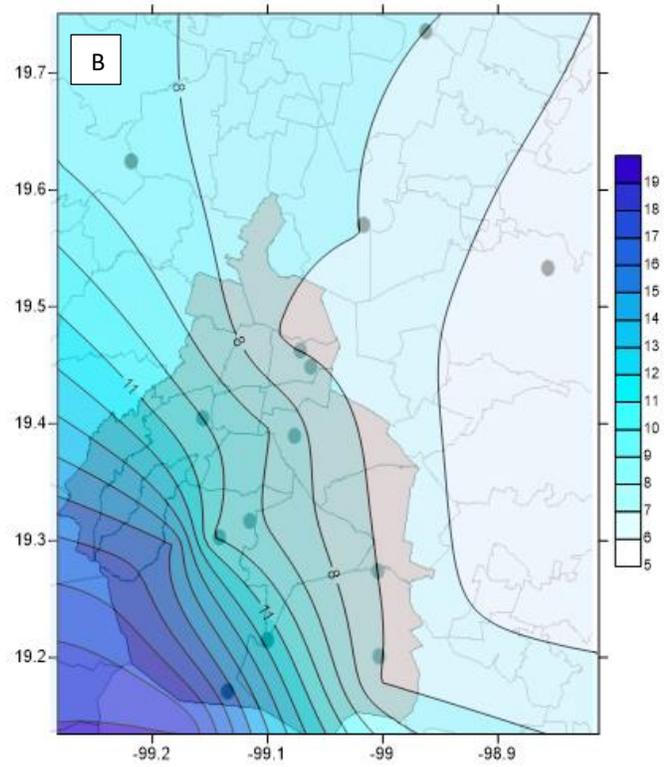


Figura 13. Distribución del número de días al año en que la precipitación fue mayor o igual a 10 mm ($PRCP \geq 10mm$) (A) y en que la precipitación fue mayor o igual a 20 mm ($PRCP \geq 20mm$) en el periodo estudiado (B).

Escenario a partir de una regresión lineal de la distribución de la cantidad total anual y de la intensidad de la precipitación pluvial para 2020

A través de la ecuación de la recta se evalúan los cambios que podrían haber para el año 2020. Se podría esperar un aumento en el total de Pp tal y como se muestra en la Fig. 14, escenario en el que se puede llegar a superar los valores de 1300 mm en la zona suroeste de la ciudad, mientras que en el noreste se mantendría en promedio en los 400 mm. Asimismo, el escenario de la intensidad de la precipitación, podría mantenerse en el suroeste de la ciudad con valores cercanos a los 18 mm/día, mientras que en el noreste se mantendría en 7 mm/día. Aunque a diferencia de la intensidad de los últimos 30 años, aquí los valores se van dispersando de mayor manera conforme avanzamos hacia el norte de la ciudad. Es decir no se presentan valores tan bajos de intensidad para el 2020 pero si valores de más de 14 mm/día, superiores a lo visto en el estudio de las pasadas décadas (Fig. 10).

Es importante tomar en cuenta que la Pp no se comporta linealmente, por lo que se requieren de modelos que tomen en cuenta toda una serie de condicionantes para así poder tener un panorama más claro o preciso sobre el futuro.

Romero (2010) menciona que a partir de datos recogidos del INE(2008) la Ciudad de México para el año 2020 podría presentar una disminución entre 5-10% en la precipitación pluvial anual. Mientras que para el Estado de México va a variar entre -5% y 5%.

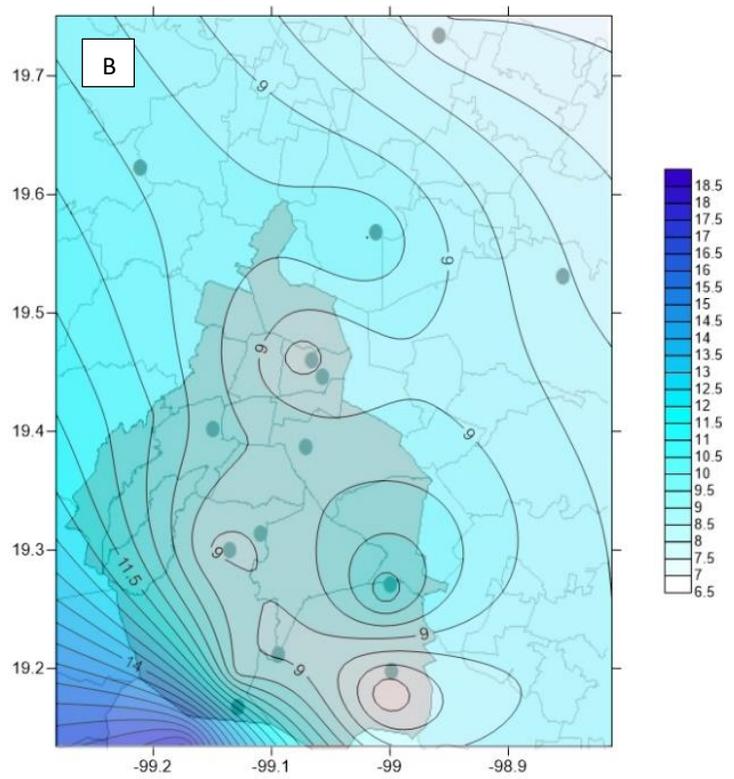
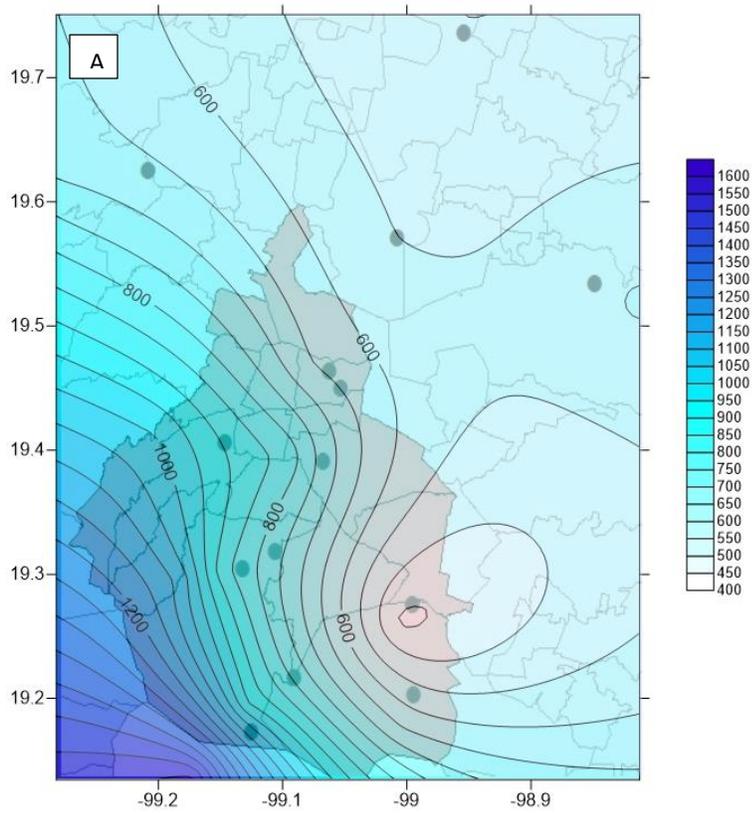


Figura 14. Escenario de la distribución de la cantidad total anual (mm) (A) y de la intensidad (mm/h) (B) de la precipitación en el año 2020.

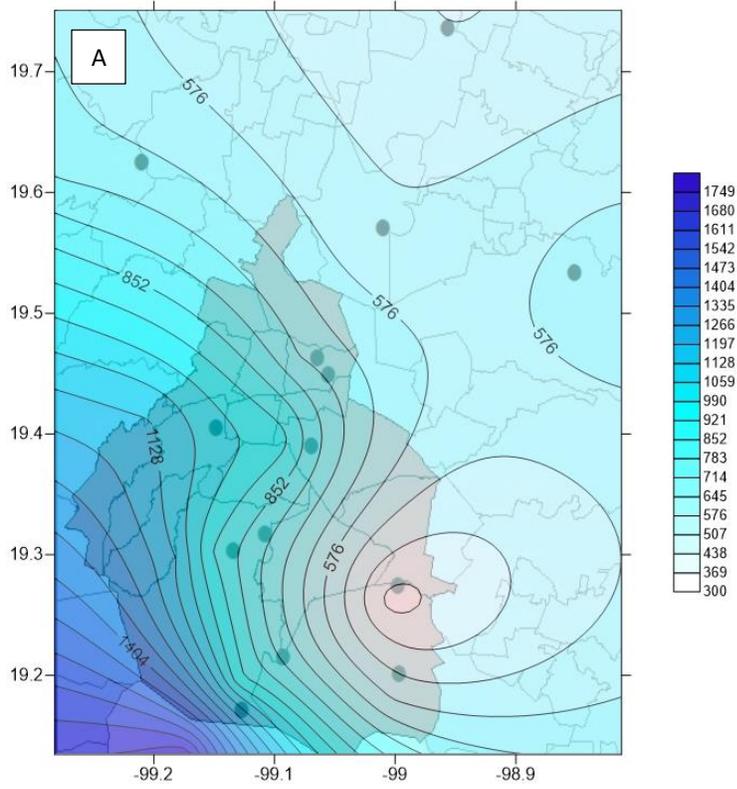
Escenario a partir de una regresión lineal de la distribución de la cantidad total y de la intensidad de la precipitación en el año 2050

A través de la ecuación de la recta se evalúan los cambios que podrían haber para el año 2050. La precipitación total anual podría incrementar con valores que superen los 1300 mm. Valores ya alejados de nuestras primeras estimaciones sobre estos últimos 30 años se observan en la Fig.15. Para poder solventar esa cantidad de agua representa sin duda un reto para esta ciudad el mejorar aún más los sistemas de drenaje así como las diferentes técnicas de mitigación de inundaciones que se tengan a la mano.

Dentro de este mismo ejercicio para el año 2050 se podría esperar también un posible aumento de la intensidad con valores mayores a los 16 mm/h. Aunque no se separa mucho de la proyección del 2020, si llama la atención que sigue con un comportamiento creciente y no se ve que en ningún momento vaya a la baja.

Es importante tomar en cuenta que la precipitación pluvial no se comporta linealmente, por lo que se requieren de modelos que tomen en cuenta toda una serie de condicionantes para así poder tener un panorama más claro o preciso sobre el futuro.

Romero (2010) menciona que a partir de datos recogidos del INE(2008) la Ciudad de México para el año 2050 podría presentar una disminución entre 5-10% en la precipitación pluvial anual. Mientras que para el Estado de México va a variar entre -15% y 5 %.



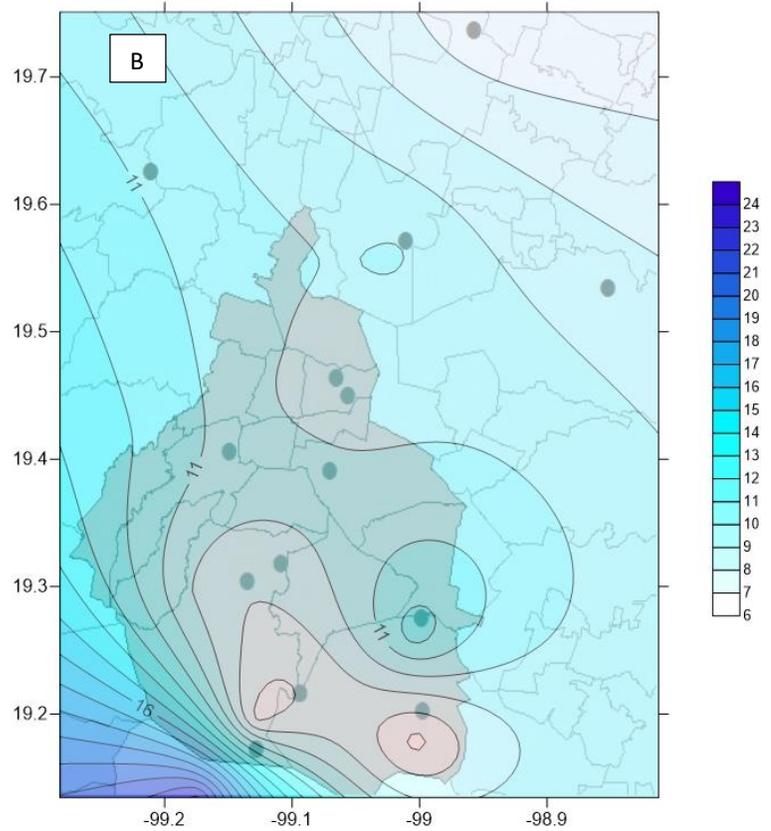


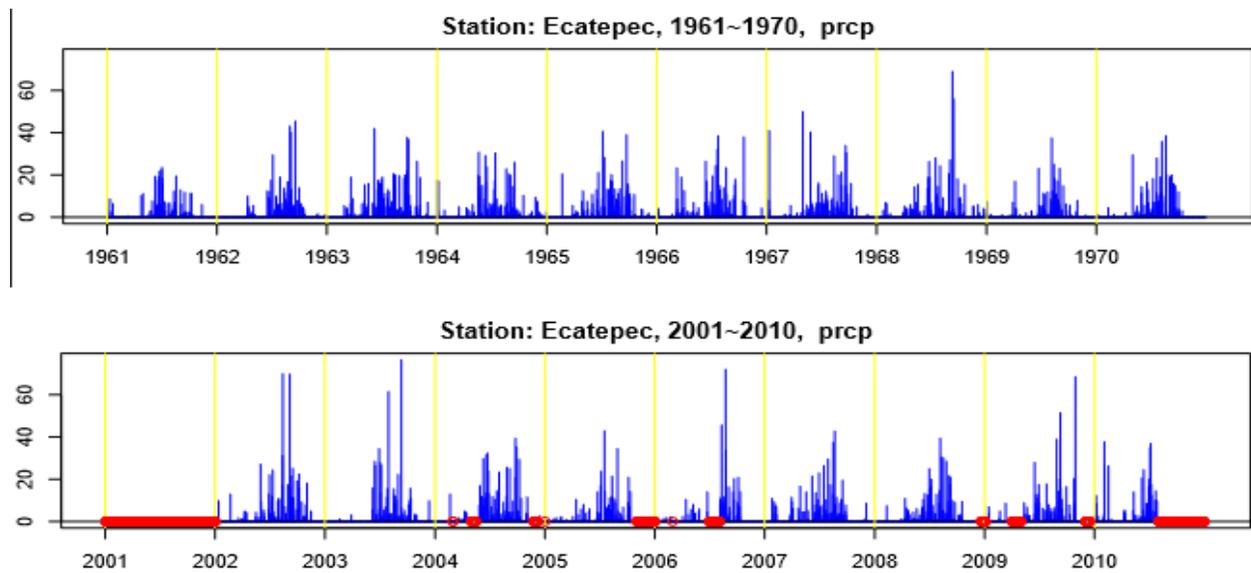
Figura 15. Escenario de la distribución de la cantidad total (A) y de la intensidad (B) de la precipitación en el año 2050

Según las proyecciones manejadas por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en donde a partir de escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (A1B, A2, B1 y B2) se proyecta que la Pp total anual en la Ciudad de México podría sufrir una disminución entre 5% y -5% para el 2020 y para el 2050 variará entre 5% y -15%.

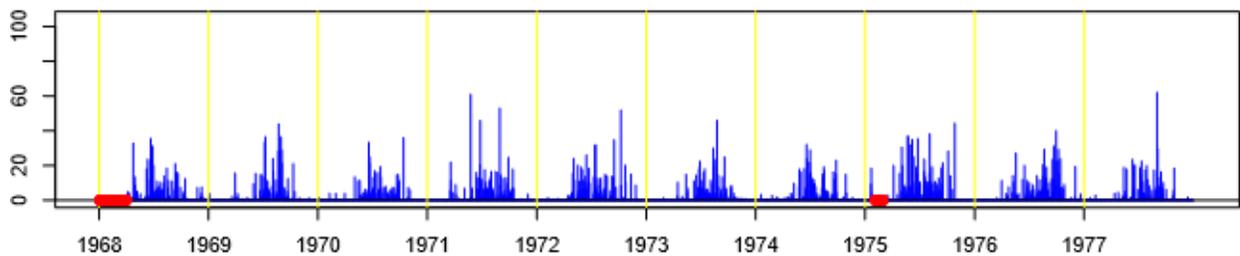
Por lo que los escenarios obtenidos a partir de una regresión lineal no se asemejan a los del INECC y las probabilidades de que se encuentren dentro de un error son muy altas. Es por eso que para hacer cualquier proyección a futuro se requiere de tomar en cuenta otras variables y otro tipo de estudios.

A continuación se presente un comparativo de gráficas entre la primer década de la que se tienen datos y la última, esto con la finalidad de observar el progreso de la Pp total tanto en Ecatepec como en Xochimilco. Los datos en rojo son los faltantes. Podemos observar como al final de las décadas es donde existe una mayor ausencia de datos. Pero para Ecatepec de Morelos los picos de lluvia se pueden distinguir claramente mucho más elevados que para Xochimilco.

A) Gran Canal km 27+250 , Ecatepec de Morelos



B) San Francisco Tlalnepantla, Xochimilco



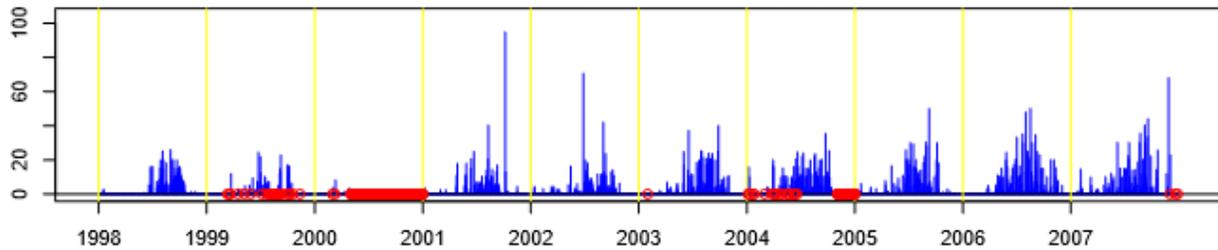


Figura 16. Gran Canal km 27+250 , Ecatepec de Morelos (A) y San Francisco Tlalnepantla, Xochimilco (B)
Pp totales de décadas distintas.

7.- Distribución del número de eventos de inundaciones reportados (SNIDN)

Distribución del número de eventos de inundaciones de 1970 a 2013

En la Figura 17 se muestra la distribución del número de eventos de inundaciones reportados por distintos medios periodísticos de 1970 a 2013 (La Razón, La Jornada) en un intervalo de tiempo de 43 años. Se observa como el mayor número de eventos se registra en los municipios del norte de la ZMCM, principalmente en el municipio de Ecatepec de Morelos. Así también, se observa otro número importante de eventos en latitudes medias de la zona urbana. Delegaciones como Benito Juárez y Álvaro Obregón están entre las delegaciones de la ciudad de México que más han presentado incidentes de este tipo en las últimas décadas con cerca de 70 eventos cada una.

Más al sur de la ciudad ya no se presentan tantos eventos de inundaciones. Algo interesante de notar es que, como se analizó anteriormente en esta zona es donde existe una mayor cantidad e intensidad de la lluvia. Con ello se puede elucidar que muy probablemente el sistema de drenaje debe ser más eficiente al sur de la ciudad, además de que podría haber una mejor infiltración en el suelo, puesto que las delegaciones forman parte de la periferia urbana. Es de notarse también que posiblemente se tenga también un drenaje natural que coadyuva al sistema artificial, en parte asociado al sistema de afloramientos volcánicos en el sur de la ciudad, que implican una infiltración rápida y directa del agua pluvial.

Mientras que en el norte de la ZMCM, el sistema de drenaje debe presentar algunas grandes deficiencias y el drenaje natural sea marginal ya que en su mayoría el suelo está cubierto por cemento y asfalto.

De acuerdo a una entrevista realizada por La Jornada el Sábado 5 de septiembre de 2015, el secretario de Protección Civil del Distrito Federal, Fausto Lugo García y el director del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (Sacmex), Ramón Aguirre Díaz, calcularon que entre un 30 y 50% de los eventos de inundaciones que se dan en la ciudad de México durante la temporada de lluvias son causados por la basura en las coladeras (Romero, 2015).

Por lo que es otro aspecto a considerar dentro del complejo sistema de drenaje de la ciudad, la cantidad de basura que puede estar obstruyendo las salidas de agua. La educación ambiental en este caso podría tomar un rol importante, ya que es más una cuestión de civismo el no tirar basura a la calle y de entender las consecuencias de dicha acción.

Un último aspecto que debe tomarse en cuenta es la diferencia de cantidad de población entre las distintas delegaciones y municipios, ya que eso pudiera ser un indicador de que hay lugares donde es más probable que exista un mayor número de reportes por parte de los ciudadanos. Como se observa en la tabla 4, las dos delegaciones con mayor población se encuentran en el noreste de la capital, donde se aprecia un mayor índice de inundaciones reportadas.

ENTIDAD	TOTAL POBLACIÓN
Iztapalapa	1,827,868
Gustavo A Madero	1,164,477
Álvaro Obregón	749,982
Tlalpan	677,104
Coyoacán	608,479
Cuauhtémoc	532,553
Venustiano Carranza	427,263
Xochimilco	415,993
Azcapotzalco	400, 161
Benito Juárez	417 416
Iztacalco	390,348
Miguel Hidalgo	364, 439
Tláhuac	361, 593
Magdalena Contreras	243, 886

Cuajimalpa de Morelos	199, 224
Milpa Alta	137, 927

Tabla 4. Distribución poblacional de la ZMVM. La CDMX cuenta con 8,918,653 millones de habitantes en lo que va del 2016 (INEGI, 2015).

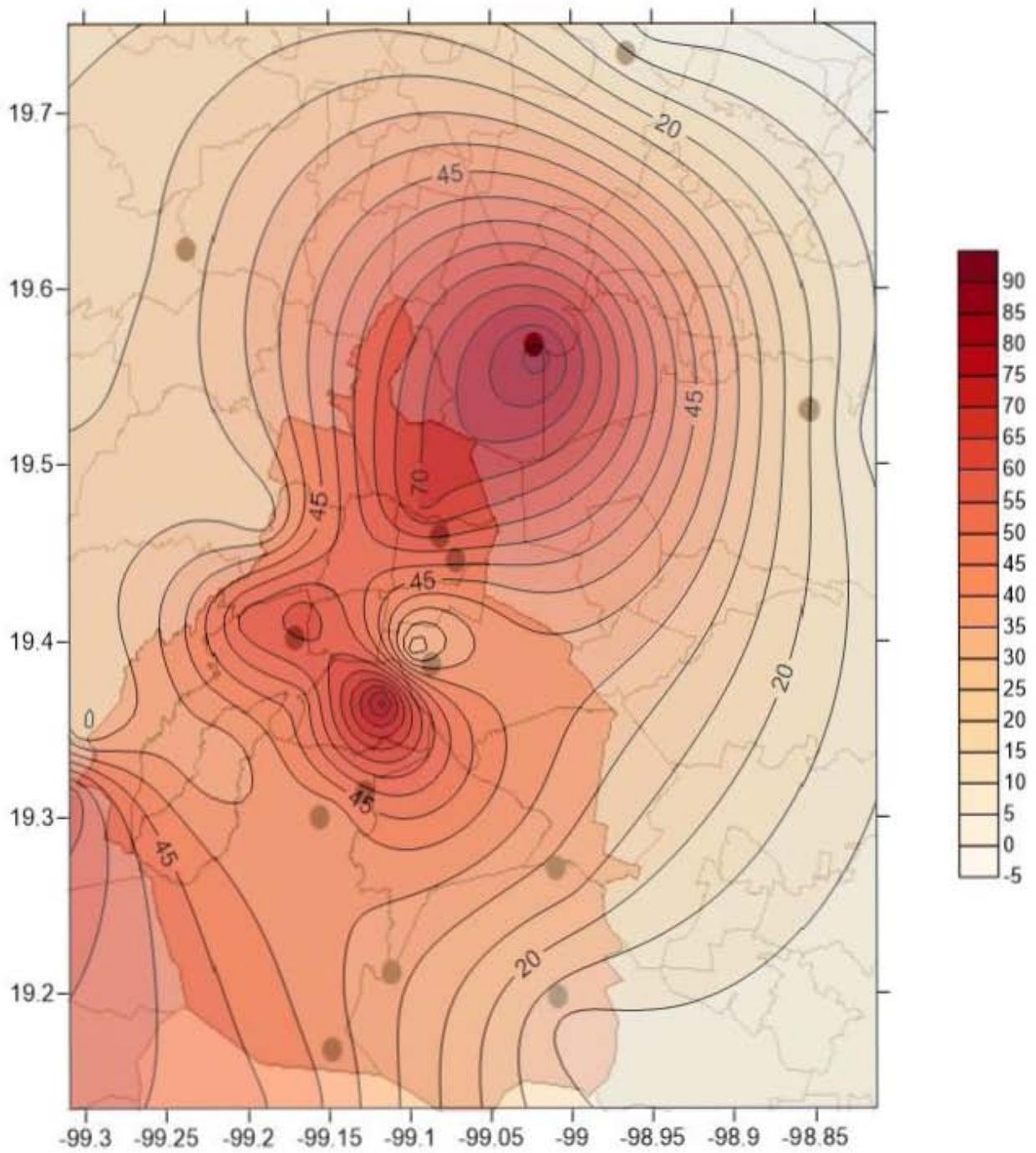


Figura 17. Distribución del número de eventos de inundaciones en el periodo comprendido de 1970 a 2013 en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Además de que se puede observar en la Fig.18 que se aprecia una mayor urbanización al norte de la ciudad de México. En la imagen satelital en rojo se resalta la Ciudad de México y los tres municipios del Estado de México donde se localizan las otras estaciones ocupadas en el estudio.

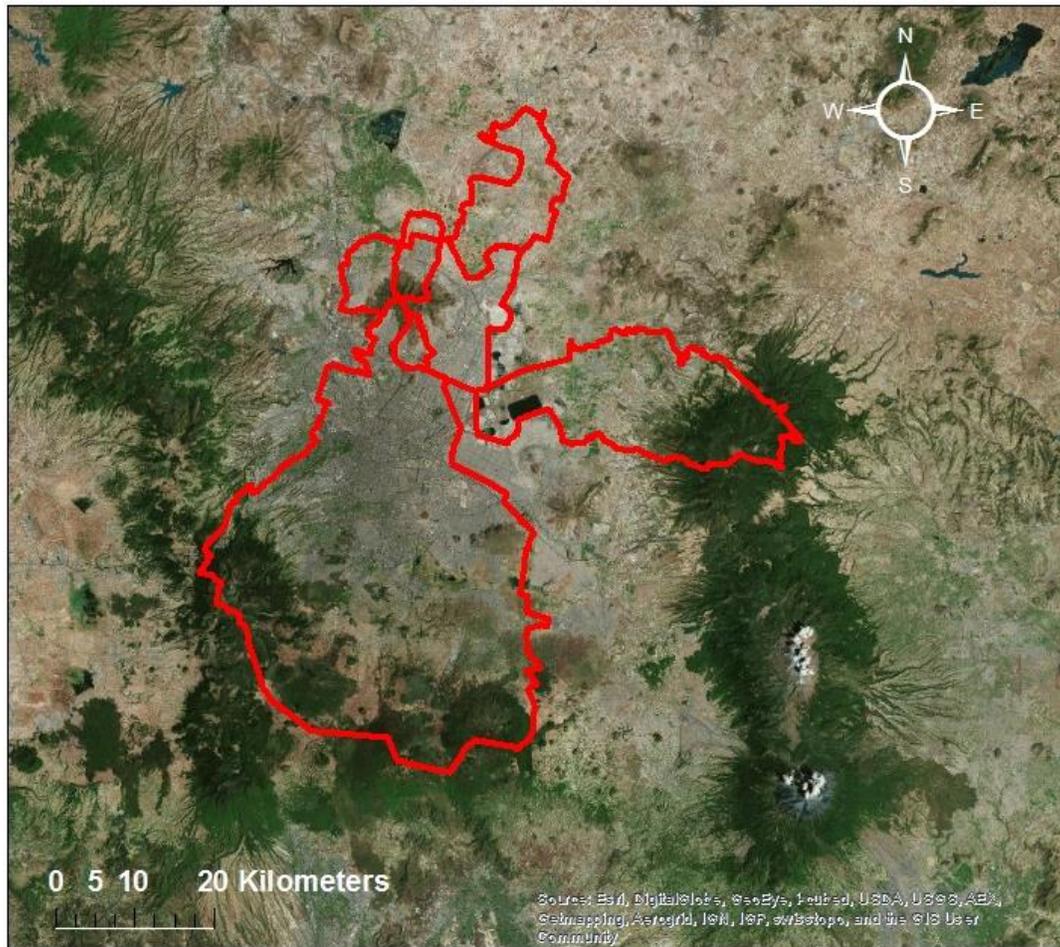


Figura 18. Imagen satelital obtenida a través de ArcMap de la Ciudad de México y de los tres municipios tomados en cuenta para el estudio.

6.5. Disminuyendo la intensidad/cantidad de lluvia: estrategias

Tanques de captura de agua de lluvia

Los tanques de captura de agua de lluvia representan una alternativa para la mitigación de las inundaciones, los cuales tienen la opción de poder ser conectados a la tubería colectiva y utilizar de alguna manera el agua captada para el uso doméstico.

La cantidad de agua que pudiera ser retenida por un tanque recolector en un escenario de máxima Pp total y en otro de mínima Pp total, es bastante elevada. Como se muestra en la Tabla 5 se tiene un mínimo de cerca de 5.67 m³/año y como máximo cerca de 23.82 m³/año. El líquido obtenido podría ser utilizado para los quehaceres domésticos o para alguna otra actividad y quizás se disminuiría el riesgo de inundación.. Los sistemas de drenaje de la ciudad tendrían más tiempo para lidiar con toda esa cantidad de agua, aunque eso dependerá mucho de la zona de la ciudad.

Tabla 5.- Posible captura de agua en una superficie (Ejemplo 200 m² en función de las cantidades de precipitación (Precipitación total actual al mes de agosto 2015 en el DF: 347.8mm)

	Precipitación (mm)		Recolección o captura de agua anual
	máxima	mínima	
San Juan de Aragón, GAM	825.7	357.5	Max: 13.63 m ³ Min: 5.67 m ³
Desviación el Pedregal, Tlalpan	1425.2	645	Max: 23.82 m ³ Min: 10.56 m ³

Ahora bien para las estimaciones por ecuación de la recta de los 2020 y 2050 (Tabla 6) sobre la cantidad de agua de lluvia que podrían caer para dichos años, tomando en cuenta únicamente la cantidad total y

no la intensidad, tenemos que las cantidades de agua retenida en la superficie de 200 m² como mínimo serían 226.32 m³ y como máximo cerca 131.864 m³

Nuevamente son números muy satisfactorios en aras para mitigar las inundaciones y utilizar más sustentable el agua de lluvia y no solo descargarla en el drenaje de aguas negras.

Tabla 6. Datos y resultados obtenidos de agua de captura de la azotea en una superficie de 200 m² en las proyecciones por regresión lineal para los años 2020 y 2050.

	PRECIPITACIÓN TOTAL 2020 (mm)	PRECIPITACIÓN TOTAL 2050 (mm)	Recolección o captura de agua
San Juan de Aragón, GAM	659.32	710.8	2020: 131.864 m ³ 2050: 142.16 m ³
Desviación el Pedregal, Tlalpan	1081.45	1131.6	2020: 216.29 m ³ 2050: 226.32 m ³

Al sur de la ciudad donde se encuentra la máxima intensidad registrada en los últimos 40 años se puede llegar a captar hasta 7.5 L/m² en un día. Mientras que la mínima intensidad en la zona donde llueve menos es de 5.4 L por metro cuadrado. Estos dos números que se encuentran en la Tabla 7 son importantes para una planeación más adecuada, ya que se den considerar otros aspectos como el mismo peso de la vivienda. El conocer el peor escenario de tormenta nos permite estar listos ante cualquier evento.

Tabla 7. Agua capturada en las estaciones de San Juan de Aragón, GAM y Desviación el Pedregal, Tlalpan tomando en cuenta la máxima y mínima intensidad actual.

	máxima intensidad (mm/día)	mínima intensidad (mm/día)	AZOTEA DE 200 m ²
San Juan de Aragón, GAM	10.2	5.4	MAX: 2,040 L MIN: 1,080 L

Desviación Pedregal, Tlalpan	el	12.7	7.5	MAX: 2,540 L
				MIN: 1,500 L

En el exterior de la vivienda se puede colocar el tanque, el tamaño del mismo podría ser de 3000 L en adelante, tomando en cuenta que la máxima intensidad registrada en Desviación el Pedregal, Tlalpan es de 12.7 mm/día, es decir 12.7 L/m² día. Así, para una azotea de 200 m² se tendría un volumen de 2,540 L/día.

Modelo de azotea verde

Otra alternativa para mitigar las inundaciones disminuyendo la intensidad/cantidad de la precipitación vertida a la superficie urbana pueden ser las azoteas verdes. Sin embargo, hasta la fecha no se tiene un consenso fijo sobre qué tipo de sustrato, vegetación e inclinación se deben considerar para un sistema de azotea verde que pueda estar cercano a la efectividad deseada. Esto se debe probablemente en parte a que las condiciones ambientales en donde se pretenda instalar varían mucho de lugar en lugar y de ciudad a ciudad.

Las capas que conforman a una azotea verde generalmente se inicia por el soporte estructural del edificio, seguido por una membrana anti-raíz, la cual tiene como objetivo prevenir que las raíces penetren la estructura del techo. Seguidamente, se emplaza una capa de impermeabilizante cuya composición generalmente es un elastómero de poliuretano, un aislante térmico (opcional), una capa drenante, y el sustrato, que en este caso se trataría de arcilla limoso que actuaría como una "esponja" en el sistema-, y finalmente la capa de vegetación elegida (Fig. 19).

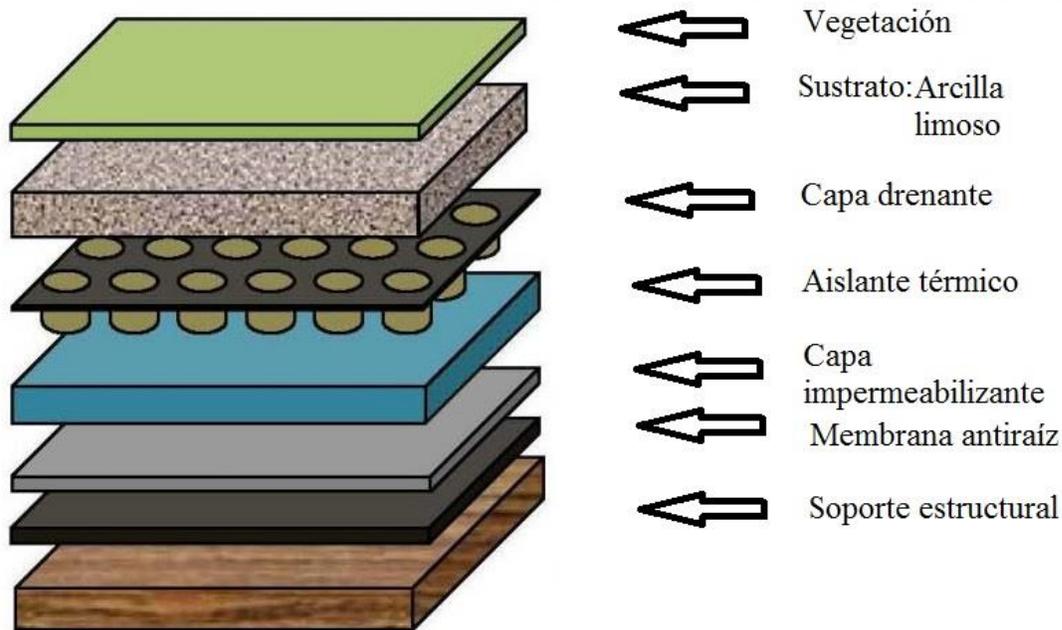


Figura 19. Capas que constituyen el diseño de la azotea verde, incluyendo el sustrato de arcilla limoso. Imagen modificada de Charleston Green Roofs (2015).

Por ejemplo si se utilizara un sustrato de arcilla en una azotea verde, éste aseguraría según la literatura una capacidad de campo 0.0036 mm/hr, si fuera de limo 0.36 mm/hr, de arena 360 mm/hr y de grava 360000 mm/hr (Hillel,1998).

Siempre que se presenta algún fenómeno de lluvia, el agua que cae puede penetrar y ser retenida por el suelo. El agua penetrada generalmente se divide entre la que regresa al ambiente (atmósfera) en forma de vapor de agua y la que se queda en el suelo para uso de plantas o en su defecto recarga de acuíferos (Bras, 1990 citado en Hillel,1998). El término de infiltración nace precisamente para describir aquel movimiento producido por la gravedad que hace que el agua se mueva hacia el interior de la estructura del suelo (Hillel, 1998).

En suelos insaturados, carece de agua, el proceso de infiltración se da a partir de la combinación entre proceso de succión y de gradiente de gravedad. Conforme el agua avanza hacia el interior del suelo, el gradiente de succión disminuye hasta quedar en cero y dejando a la gravedad como la única fuerza en acción (Hillel, 1998).

De acuerdo al material con el que esté constituido el suelo se puede predecir qué tan buena será su infiltración. Como se muestra en la Fig. 20 por sus características la arcilla es mucho más impermeable que la arena, la cual es bien sabido una de sus principales características es su alta permeabilidad.

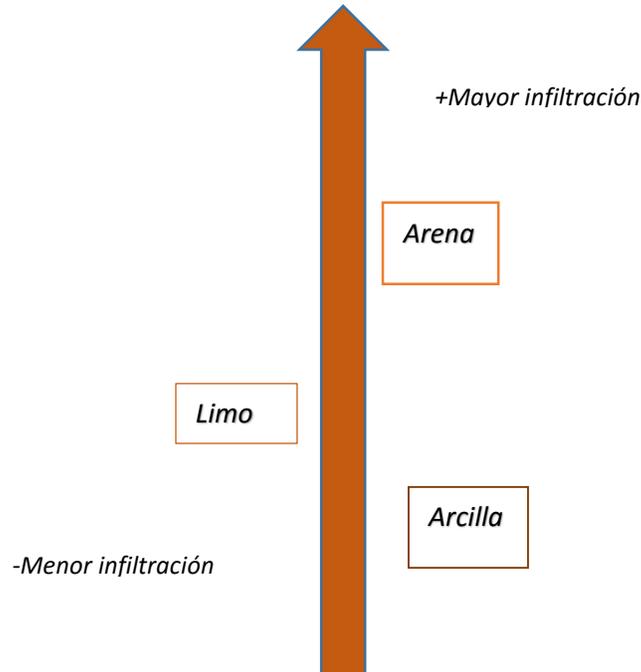


Figura 20. De acuerdo a sus características de permeabilidad se muestran a la arena, limo y arcilla.

Por lo que resulta importante el hecho de conocer las características de la lluvia para poder decidir la mejor opción para una azotea verde en particular. Si se encontrara en el Pedregal, cuya máxima intensidad es de 12.7 mm/día, es decir 12.7 L/m², por lo menos 2500 L se podrían mantener en una superficie hipotética de 200 m² como se muestran en la Fig. 21.



Figura 21.- Modelo de azotea verde con superficie de 200 m², el tanque en forma de cilindro se encuentra en el perímetro del edificio (modelo creado a partir de HomeByMe)

No obstante, se tiene que considerar el peso extra que esto representaría para la estructura del edificio, además de realizar un estudio más elaborado con el sustrato una vez instalado en la azotea. Muy probablemente habrá que experimentar con diferentes sustratos para obtener los valores de infiltración. Sin embargo, estos cálculos dan una idea clara en qué medida se podría o no mitigar posibles inundaciones.

¿Y si usamos un muro azul?

La idea de un muro verde o jardín vertical también ha adquirido un gran auge en tiempos recientes, tanto la azotea verde como un muro verde adquieren un valor importante en la reconciliación con la naturaleza que se ha venido dando en el último siglo, ambas pueden ayudar a impulsar la biodiversidad de las grandes urbes en el mundo (Francis, 2011).

Pero qué tal si en lugar de colocar vegetación en este jardín vertical le colocáramos botellas de dos litros de PET. Así es, colocar soportes hechos de madera a lo largo de una pared del exterior de algún edificio o

casa e ir llenando dicho marco con botellas de PET para la colecta de agua de lluvia. Que funcionara como un complemento del tanque de agua de lluvia o de la azotea verde, una continuación de captura de agua para uso doméstico.

El éxito que ha tenido el PET en México se debe en gran parte a que en este país el consumo per cápita supera los 119 L/ persona año, colocando a México en el tercer lugar mundial en el consumo de refrescos. Esto se debe, entre otras causas, a que los refrescos forman parte de la dieta de los mexicanos, puesto que la leche resulta más costosa (Durán, 2013).

Respecto a la tasa de recolección del PET, Ecología y Compromiso Empresarial A.C., reporta que a nivel nacional se recuperó alrededor del 38.9% en 2011 y el 38.7% para 2012. Lo que representa que poco más del 60% está en potencial de recuperación. La misma asociación reporta que México es el país líder para procesar las botellas PET de grado alimenticio en nuevas materias primas o productos transformados para un nuevo uso (Durán, 2013).

En una pared de 12.5 m² (5 m x 2.5 m) podemos llegar a colocar más de 350 botellas de 2 litros. Esto en un día equivaldría a por lo menos 700 L de agua que podrían ser capturados.

Si bien la media per cápita de consumo diario de agua en la ciudad de México es de 314 L/ habitante, el 77% de la población del Distrito Federal consume menos de 150 L/día.

Un experimento así no representa una captura importante de agua de lluvia si lo comparamos con un tanque de lluvia o el sustrato de una azotea verde pero podría ser considerado en lugares con escasez de lluvia como el noreste donde las posibilidades de captura son menores. Esto puede además facilitar el desarrollo de larvas, de mosquitos, es decir, el control sanitario sería muy complicado.

Pero a través de un experimento nada complicado podemos alcanzar dos objetivos, la captura del agua de lluvia y la reutilización del PET (Fig. 22).

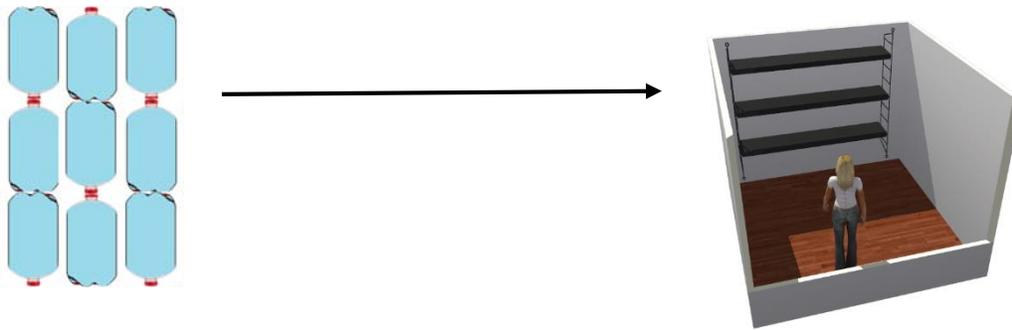


Figura 22. Modelo de tanque sobre muro azul de 12.5 m² con envase de botellas de PET de 2L (Modelo creado a partir del software HomeByMe).

8.- Discusión

Uno de los mayores problemas ambientales urbanos de nuestros tiempos tiene que ver con los cambios a los que estamos sometiendo al ciclo hidrológico en las áreas metropolitanas, el cual debe adaptarse a las condiciones de exceso de pavimentación y reducción de áreas verdes. Todo esto ocasiona entre otras cosas encharcamientos y/o inundaciones, además de crear fuentes potenciales de enfermedades (White, 2002).

Con el cambio climático global, según los expertos se esperan más fluctuaciones en el llamado ciclo del agua y por supuesto un mayor riesgo de inundaciones para los ciudadanos de la capital mexicana. Según algunos modelos se espera un posible decrecimiento de hasta el 20% de la Pp total para el año 2080 (Romero, 2010), sin embargo, la intensidad muy probablemente seguirá aumentando en las siguientes décadas.

Romero (2010) asegura también que estas alteraciones afectarán los patrones de sequía los cuales podrían volverse más comunes en la ciudad, al igual que las ondas de calor con episodios cortos de lluvia intensa. Mientras que en un documento publicado por el World Bank (s/fecha) sobre el cambio climático urbano de la ciudad de México, se menciona que se pueden esperar a futuro y en mayor medida temperaturas más altas y eventos extremos de precipitaciones, lo que podría incrementar el número de inundaciones .

El aumento de la duración e intensidad de los eventos de lluvia se vería reflejado en mayor medida al oeste de la ciudad, lo cual podría ser muy peligroso para las poblaciones vulnerables que viven en zonas de deslaves (World Bank, s/f).

Mientras que para Jáuregui (1995) el rápido crecimiento de la zona urbana en los últimos tiempos también debe ser un tema de análisis, debido al incremento de núcleos de condensación por la contaminación atmosférica en las nubes convectivas, genera lo que se conoce como un impulso vertical adicional a las nubes por la presencia de aire tibio proveniente de la isla de calor, además de que se acelera el proceso convectivo por la adición de una mayor turbulencia en la capa límite urbana originada por las mismas características de la ciudad como lo es su rugosidad. Esto podría explicar el fenómeno de la llamada "isla de lluvia", la cual podría ser uno de los principales generadores de las inundaciones de los últimos tiempos, ya que son cada vez más comunes las anomalías de precipitación dentro de la ciudad, además de que cada vez se distingue más un gradiente de noreste a suroeste en cuanto a la cantidad de lluvia que cae en la ciudad.

Hay que recordar que los aerosoles que se encuentran en la atmósfera son capaces de proporcionar el sustrato sobre el cual las moléculas de vapor agua se pueden asentar y condensar para después crecer en forma de gotas y eventualmente caer en forma de lluvia. Por lo que podrían ser un factor más en el cambio del patrón de lluvias dentro del área metropolitana. En un estudio realizado entre 1993 y 2008 se comparó la relación entre la presencia y cantidad de aerosoles con la intensidad de los eventos de lluvia. Se encontró que ha decrecido en un 7% el número de eventos intensos de lluvia durante la época de lluvias, el mayor decrecimiento se encontró en el sureste/oeste de la ciudad mientras que un aumento se pudo apreciar al noreste de la misma. Lo cual pudiera significar o un cambio de distribución de la lluvia o el cambio en cantidad de aerosoles al norte de la ciudad. Es probable que la constante emisión de partículas en zonas específicas de la ciudad esté propiciando un incremento diferencial en la concentración de aerosoles lo cual podría tener una conexión con el aumento de intensidad en los eventos de lluvia en algunas partes del área metropolitana (Binimelis, 2010).

En otro estudio se menciona que la misma intensidad de los eventos extremos de lluvia podría aumentar aunque de manera diferencial a lo largo del área metropolitana, por lo que un evento intenso de lluvia en el norte puede ser totalmente distinto a uno que se presente al sur. La orografía compleja, el cambio del uso del suelo y el climático urbano en las últimas décadas, aunado a los cambios climáticos globales, aceleran la vulnerabilidad de la población ante las inundaciones en la ciudad de México (Magaña, 2013).

En la ciudad de Dhaka, Bangladesh durante 67 años se ha encontrado una reducción de hasta 0.0154 mm por año en la intensidad de la lluvia. Mientras que un estudio realizado por Olga(2013) asegura que en los últimos 60 años Europa ha sufrido variaciones en sus temporadas de lluvia incrementando los días de lluvia en un 15% o 20% en el norte y centro del continente, aunque claro este representa variaciones en una escala mucho más grande (Zolina et al.,2012).

Durante el período de tiempo de 1871-1970 se encontró un incremento del 19-38% de cantidad de lluvia en veranos en Paris, Francia, St. Louis, Missouri y Chicago, Illinois. Un estudio realizado a través de la prueba Mann-Kendall (Dettwiller et al.,1976)

En la ciudad de Zhangye, China se llevó a cabo un análisis similar con Mann-Kendall, donde se pudo determinar que durante 49 años se presencié una tendencia a la alza en la precipitación anual, encontrándose un mayor aumento en el otoño (Kang et al., 2009).

Ankara ,Turquía durante el período de 1956-2001 sufrió un incremento en la precipitación total sobre todo durante los veranos, al igual que un incremento en los días con eventos de lluvia intensa de hasta el 50% en comparación con las zonas rurales de los alrededores. Todo esto obtenido también con la prueba de Mann-Kendall (Çicek et al.,2005) .

Mientras que en Hamburgo, Alemania hubo un aumento de 0.8 mm/año (1891-2007) además de que la precipitación al día incrementó a 10mm/día , cerca de un 20% entre 1948-1977 y 1978-2007 (Schlünzen, 2009).

En contraste con lo reflejado por el World Bank, el equipo de Mario Molina (2014) junto con el gobierno de la Ciudad de México, afirman que a un corto plazo se podría esperar reducciones en la Pp total de hasta 30-40% en el mes de diciembre, mientras que en junio-julio la reducción sería del 5 al10% y un ligero aumento en el mes de agosto. Para un mediano plazo se esperan disminuciones de hasta el 75%, con un gradiente que aumentaría de noreste a suroeste. En promedio se proyectan que a corto plazo la precipitación total anual no tendrá cambios importantes, si bien a largo plazo puede reducirse hasta en un 10% (PACCM, 2014).

Los distintos estudios hechos en la ciudad de México concuerdan en el hecho de que la intensidad si aumentará en el futuro, pero no se tiene la suficiente certeza de saber si aumentará, se mantendrá igual o disminuirá la cantidad total de Pp en el área metropolitana. Esto posiblemente a las diferentes metodologías que se llevaron a cabo en cada uno de los estudios que hasta ahora se han hecho, así como los datos que se emplearon.

En esta tesis se comprobó aquello de lo que ya se tenía conocimiento, de que tanto la precipitación pluvial total como su intensidad se concentran más en la zona suroeste de la ZMCM, lo cual se debe en parte a la distinta elevación que presenta esta zona con respecto del resto de la urbe. Todos los índices analizados por RCLimindex, incluidos en este estudio, se concentran más en el área mencionada.

Los datos del Servicio Meteorológico Nacional para las 14 estaciones tomadas en cuenta dentro del estudio, presentaron heterogeneidades, además de que no todas pasaron la prueba Mann-Kendall de tendencia y en algunos casos existieron vacíos de datos en ciertos años.

A pesar de que la tendencia de Pp total de este trabajo muestra un crecimiento en la mayoría de las estaciones analizadas, cabe mencionar que en cinco de ellas la tendencia es negativa. Por lo que a diferencia de la intensidad, es más probable que la Pp total se mantenga en los mismos valores y quizás con el tiempo disminuya.

Al noreste a pesar de tener un mayor número de reportes de afectaciones por inundaciones, no se aprecia altos valores de la precipitación como en otras zonas de la ciudad. Lo contrario sucede en la zona del suroeste, por lo que seguramente más factores se esconden detrás de esta incógnita.

Y es de llamar la atención esta diferencia que existe de inundaciones entre ambos extremos de la zona metropolitana, algo que se debe de analizar a nivel gubernamental principalmente. Podría claramente obedecer a aspectos socioeconómicos y de prioridades para los tomadores de decisiones. No sin olvidar que al sur de la ciudad el drenaje natural también ayuda a disminuir posibles encharcamientos.

El aspecto de la educación ambiental también debe entrar dentro del marco de este problema, ya que el arrojar basura a la calle puede traer distintas consecuencias como la obstrucción de la salida de agua por las coladeras. Procurar que las calles estén limpias es una labor que les corresponde tanto al gobierno como a los mismos ciudadanos.

Hay que tener claro que la reducción de los efectos negativos debido a los desastres naturales como las inundaciones, es una responsabilidad tanto de los tomadores de decisiones como de los mismos ciudadanos.

Dentro de este trabajo también se proponen distintas medidas de mitigación, como azoteas verdes y el uso de pavimento poroso.

Según los cálculos realizados, en el peor escenario de intensidad de lluvia en la ZMCM, un tanque de almacenamiento podría ser la mejor opción en cuanto a la cantidad de agua que podría almacenar al día. Los resultados dan 12.7 L/m^2 , mientras que una azotea verde podría llegar a tener un capacidad de campo

de 12.5 L/m². La diferencia entre ambas propuestas es casi nula y hay muchos factores involucrados, por lo que no hay certeza de que opción tendría mejores resultados, dependerá de las condiciones de la vivienda, su localización, entre otros factores.

En cuanto a los costos, el precio de una azotea verde oscila entre los \$1,200 y los \$4,000 pesos/m²; sin embargo, algunos de los grandes beneficios además de los ambientales son: el probable aumento del precio del inmueble y un candidato a obtener un descuento del 15% en el pago del impuesto predial (Díaz, 2014). Que con el tiempo esta inversión se recuperaría, dependiendo de la vivienda. Por otro lado, el costo de un sistema de captación de agua pluvial de 5000 L es de \$15,000 pesos aproximadamente (Quadri, 2008).

Mientras que el costo del muro azul es ínfimo, ya que solo sería el costo de las botellas de PET y el marco de madera sobre el que se sostendrían las mismas. Es un experimento bastante económico, cuyo propósito es el reuso del PET para la captura de la Pp.

Eso sin tomar en cuenta el constante mantenimiento que requerirá la instalación y de los cuidados necesarios que se deberán tomar.

El sistema de captación de agua pluvial generalmente requiere de limpiezas cada determinado período de tiempo, ahora que si se planea conectarlo con las tuberías que llevan al baño el precio podría subir exponencialmente. Implementar una planeación urbana de acuerdo a las especificidades que presenta la ciudad de México, es una premisa que no se ha cumplido hasta hoy en día.

Posiblemente resulte más viable y exitosa toda aquella medida que el gobierno local se proponga implementar, ya sea utilizar pavimento poroso en las calles o proponer algún tipo de incentivo a los ciudadanos que adopten medidas como las azoteas verdes.

Según datos del CONEVAL en el 2010 la ZMVM contaba con el 34.4% de su población en pobreza. En el 2010, 0.3% de la población no contaba con drenaje, 0.1% sin energía eléctrica, 1.1% sin sanitario, 2.4% sin agua entubada de la red pública y 1 % con piso de tierra (CONEVAL, 2010).

Por lo que las expectativas de que un creciente número de ciudadanos lleven a cabo por cuenta propias las medidas de mitigación propuestas es muy bajo, es necesario un apoyo gubernamental.

Este trabajo de investigación no pretende solucionar por completo el problema de las inundaciones, simplemente se pretende a través de un estudio de la distribución espacial y temporal de la Pp proponer otras soluciones al problema que muy probablemente tendrían una efectividad adecuada.

Este asunto requiere del análisis de todas las variables que pueden componer un sistema tan complejo como el de un sistema urbano, desde la subsidencia que está viviendo la ciudad así como las particularidades que se presentan en el sistema de drenaje y por supuesto el cambio climático que amenaza con reflejarse cada vez más en nuestro sistema urbano, es por eso que se deben considerar cada uno de los aspectos que tengan alguna injerencia en esta problemática, desde el científico hasta el económico.

7.- Conclusiones

Las inundaciones podrían volverse una constante en la vida cotidiana de los capitalinos en futuras décadas, es por eso que resulta importante primero estudiar lo que ha pasado en las últimas décadas y sobre eso proponer medidas que podrían ser útiles en el futuro.

El cambio climático se encuentra ya entre nosotros por lo que las nuevas propuestas de infraestructura verde/arquitectura verde se asoman como opciones que nos ayudarán a alcanzar un futuro aún más sustentable.

Dentro de las 14 estaciones analizadas, las que se encontraban en el suroeste reportaron mayor cantidad de agua de lluvia, así como mayores intensidades. Las tendencias de igual forma eran mayores al suroeste tanto para concentración como para intensidad durante las últimas décadas.

Otros de los índices analizados fueron la distribución de la máxima precipitación anual en un día y en cinco días consecutivos, de igual forma con mayores valores al suroeste.

De igual forma se obtuvo la distribución del número de días al año en que la precipitación fue mayor o igual a 10mm y en que fue mayor o igual a 20 mm. Nuevamente para ambos, la zona con mayores valores fue el suroeste.

Por lo que se comprueba algo que ya se conocía de antemano, llueve más en el suroeste que en el resto de la ciudad, esto debido al ascenso del aire por levantamiento orográfico.

Analizando esto con la base de datos de Sistema de Inventario de los Efectos de Desastres Naturales dentro del periodo de tiempo de 1970-2013 se llegó a la conclusión de que paradójicamente existen más reportes de inundaciones al norte de la ciudad que al sur.

Teniendo esto en cuenta, se puede inferir que la urbanización desproporcionada que se ha vivido en las últimas décadas, ha propiciado que se acentúen más los problemas de encharcamientos en ciertas zonas de la ZMVM.

Eso aunado a un problema de basura, la cual en muchas ocasiones obstruye a las coladeras, impidiendo una adecuada evacuación del agua de las calles. Distintas medidas de mitigación de inundaciones pueden ser adoptadas, desde azoteas verdes hasta tanques de captura de agua de lluvia, que garanticen un uso adecuado del agua, además de una disminución en incidencia de encharcamientos o inundaciones.

Resulta importante tomar en consideración no solo este estudio sino todos los que se han realizado sobre el comportamiento de la Pp en la ZMVM, ya que toda esa información nos puede ayudar a entender las tendencias de las lluvias y la posibilidad de un incremento o decremento de inundaciones el área metropolitana.

Para futuros estudios se propone una selección más detallada de datos de Pp, así como una rigurosa inspección de los mismos. Esto con la finalidad de mejorar los índices obtenidos, así como la elaboración de un Sistema de Información Geográfica que nos ayude a través de una tabla de atributos identificar las zonas de la ciudad más susceptibles a inundaciones.

Se sabe que la mayoría de las veces la prevención resulta ser más eficiente y menos costosa que la misma reparación de los daños causados por algún desastre natural, por lo que es imperativo el comenzar a practicar más la prevención.

Fortalecer la conexión entre la ciencia y la sociedad resulta cada vez más importante mientras seguimos presenciando más disyuntivas ambientales las cuales quizás tendrían mejores soluciones, si hubiera un mejor puente de comunicación entre ambos actores.

9. Referencias

- Aguilar Garduño, E, Aparicio, J y Gutiérrez López, A. 2007. Sistema de Drenaje Principal de la Ciudad de México. Gaceta del IMTA Número 4, agosto 2007. SEMARNAT. Extraído desde <https://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g04-08-2007/sistema-drenaje-mexico.html> el día 13 de mayo de 2015.
- Aguilar E, Peterson TC, Ramírez Obando P, Frutos R, Retana JA, Solera M, Soley J, González García I, Araujo RM, Rosa Santos A, Valle VE, Brunet M, Aguilar L, Álvarez L, Bautista M, Castañón C, Herrera L, Ruano E, Sinay JJ, Sánchez E, Hernández Oviedo GI, Obed F, Salgado JE, Vázquez JL, Baca M, Gutiérrez M, Centella C, Espinosa J, Martínez D, Olmedo B, Ojeda Espinoza CE, Núñez Haylock M, Benavides H, Mayorga R. 2005. *Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and Northern South America, 1961-2003*. Journal of Geophysical Research, 110, D23107, doi: 10.1029/2005Jd006119.
- Bardgett, RD, Wall, DH.2012. *Soil Ecology and Ecosystem Services* (pp 275-276). OUP Oxford, University of Oxford Press, Oxford, UK.
- Benítez, F.1952. *16 de septiembre durante una inundación* (Figura 1). Extraído desde <http://www.revistaimagenes.esteticas.unam.mx/node/52> el día 23 de septiembre de 2015
- Asensio,A, Capel,J, Cuadrado,J, García,JM,Oña,JA y Vilchez,J. *Ejercicios de Biología*. Extraído desde <http://www.biologiasur.org/Ciencias/index.php/2-los-sistemas-fluidos-terrestres-externos/2-preguntas-de-aplicacion> el día 04 de diciembre de 2016.
- Castillo, E. 2014. *Tiene DF 867 asentamientos irregulares: PAOT*. Agencia de gestión Urbana Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial (PAOT), Milenio Diario, Prensa. Extraído desde: <http://www.agu.df.gob.mx/sintesis/index.php/tiene-df-867-asentamientos-irregulares-paot/> el día 21 de septiembre de 2015
- Çicek, I. y Turkoglu,N. 2005. *Urban effects on precipitation in Ankara*. Department of Geography , Faculty of Letters, Ankara University. *Atmósfera* vol.18 no.3 México jul. 2005
- Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente, A.C. (2014) *Programa de Acción Climática Ciudad de México 2014-2020. Gobierno de Distrito Federal*. Extraído desde <http://centromariomolina.org/interna/PACCM.pdf> el día 13 de abril de 2015.
- Charleston Green Roofs. 2015. *What are Green Roofs?* (Figura 17). Extraído desde www.charlestongreenroofs.com/what_are_green_roofs el día 30 de noviembre de 2015
- Collier,M , Webb,RH. (2002) *Floods, Droughts, and Climate Change* (pp 8-12) Arizona,USA. The University of Arizona Press.
- CONEVAL. 2010. Pobreza urbana y de las zonas metropolitanas en México (pp 42). Extraído desde [http://www.coneval.org.mx/Informes/Pobreza/Pobreza%20urbana/Pobreza urbana y de las zonas metropolitanas en Mexico.pdf](http://www.coneval.org.mx/Informes/Pobreza/Pobreza%20urbana/Pobreza%20urbana%20y%20de%20las%20zonas%20metropolitanas%20en%20Mexico.pdf) el día 13 de marzo de 2016.

- Departamento de Desarrollo Sostenible FAO.2015. *Glosario de términos sobre humedad de suelo*. Depósito de documentos de la FAO. Extraído desde <http://www.fao.org/docrep/008/y4690s/y4690s02.htm> el día 22 de septiembre de 2015.
- Dettwiller,J., y Changnon Jr.,SA. 1976. *Possible Urban Effects on Maximum Daily Rainfall at Paris, St. Louis and Chicago*. J. Appl. Meteor., **15**, 517–519.
- Díaz, C, Chavarría, V. 2014. *El Precio de Tener Un Azotea Verde en el DF*. Milenio Diario, Prensa. Extraído desde http://www.milenio.com/df/precio-tener-azotea-verde_0_225577691.html el día 27 de noviembre de 2015.
- Domínguez Mora, R. 2000. *Las Inundaciones en la Ciudad de México. Problemática y Alternativas de Solución*. Revista Digital Universitaria, 1 de Octubre de 2000 Vol.1 No.2 Extraído desde <http://www.revista.unam.mx/vol.1/num2/proyec1/> el día 17 de marzo de 2015.
- Durán Flores, UH. 2013. *Diseño de una recicladora de PET: Estrategias y cadena de suministro para su formulación* (pp13-14). Editorial Palibrio , Bloomington,EEUU.
- Dürr, A. 1995. *Dachbegrünung*. Bauverlag, Wiesbaden.
- El Universal.2015. *Van más de 2 mil encharcamientos en 2015*. El Universal, Metrópoli, D.F. Extraído desde <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/metropoli/df/2015/09/4/van-mas-de-2-mil-encharcamientos-en-2015> el día 21 de septiembre de 2015
- ETCCDI/CRD.2013. *Climate Change Indices*. Extraído de <http://www.clivar.org/panels-and-working-groups/etccdi/etccdi.php> el día 09 de febrero del 2015.
- Everett Boyer, R. 1975. *La gran inundación, vida y sociedad en la ciudad de México (1629-1638)*. (152p.) Traducción de Antonieta Sánchez Mejorada, México, Secretaría de educación pública. Extraído desde <http://www.ejournal.unam.mx/ehn/ehn06/EHNO0612.pdf> el día 17 de marzo de 2015
- FAO. 2015. *Interpolación de Modelos de Elevación Digital (MED) mediante el Método de Kriging*. Extraído desde <http://www.fao.org/docrep/003/x8763s/x8763s0a.htm> el día 15 de noviembre de 2015 (Burgess y Webster, 1980)
- Francis, RA, Lorimer, J. 2011. *Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls*. Journal of Environmental Management Vol. 92, Issue 6, June 2011,pp 1429-1437.
- Frierson,Dargan MW and Lu Chen,G. 2007. *Width of the Hadley cell in simple and comprehensive general circulation models*. Geophysical Research Letters, Vol. 34, L18804, doi:10.1029/2007GL031115.
- Gauzin-Muller, D. 2002. *Sustainable Architecture and Urbanism (pp106-107)*. Birkhauser Publishers for Architecture. Basel, Suiza.
- Gibson, C.1975. *Los Aztecas Bajo El Dominio Español: (1519-1810)*. Historia y arqueología : Siglo Veintiuno. México,D.F.
- Guzmán, J. (1952) *Inundación en el Centro Histórico,Ciudad de México* (Figura 1) Extraído desde <http://www.revistaimagenes.esteticas.unam.mx/node/52> el día 23 de septiembre de 2015
- Ha,T. 2007. *Greeniology: How to live well, be green and make a difference (pp183-186)*. (3a edición) Melbourne University Press. Victoria , Australia.
- Harper, CL. 2012. *Environmental and Society: Human Perspectives on Environmental Issues (pp.129-137)*. Pearson Prentice Hall 5ta. Edición.EU.

- Henson,R. 2011.*The rough guide to Climate Change* (pp.65-81). (3a edición). London, United Kingdom .Rough Guides.
- Hidrología Sostenible. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible-SUDS. (Figura 2) Extraído desde <http://www.hidrologiasostenible.com/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-suds/> el día 13 de abril de 2016
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physic* (pp.199, 449-468) Academic Press
- INECC(s/f). *Capítulo 2 La Zona Metropolitana del Valle de México* (pp.2-3). Extraído desde <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/394/cap2.pdf> el día 22 de noviembre de 2015.
- INECC(s/f). *Adaptación de las plantas a la aridez.* Extraído desde <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/668/adaptaciones.pdf> el día 13 de septiembre de 2015
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2012. *Adaptación al Cambio Climático en México: Visión, Elementos y Criterios para la Toma de Decisiones* (pp 67-68)(1ª edición) Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- INEGI (2015). *División delegacional.* Extraído desde http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=09 el día 13 de abril de 2016
- IPCC .2007. *Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis: Global Precipitation Changes.* Extraído desde http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch9s9-5-4-2.html el día 10 de marzo de 2015.
- Jáuregui Ostos,E. 1995. *Algunas Alteraciones de Largo Periodo del Clima de la Ciudad de México debidas a la Urbanización.* Investigaciones Geográficas Boletín, núm. 31, Ciudad de México, México.
- Jáuregui Ostos,E. 2000. *El Clima de la Ciudad de México. Temas Selectos de Geografía de México.* (pag. 31). Temas Selectos de Geografía de México. Instituto de Geografía, UNAM, Ciudad de México, México.
- Kang,S, Zhang, B, Liu, J y Yang, M. 2009. *Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Precipitation in Zhangye City Using Mann-Kendall Method.* College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China
- Karmeshu, N. 2012. *Trend Detection in Annual Temperature / Precipitation using the Mann Kendall test- A Case Study to Assess Climate Change on Select States in the Northeastern United States.* (pp 4-8) Penn Libraries, Department of Earth & Environmental Science, University of Pennsylvania,.
- Katzschner, L. 1991. *Ergebnisse des Versuchs zur Abflubmessung eines Grasdachs, Informe inédito, Universidad de Kassel, Alemania.* En: Minke, G. (s/f) *Techos verdes: Planificación, ejecución, consejos prácticos.* Editorial Fin de Siglo (pp. 17-20). Universidad de Kassel, Kassel, Alemania.
- LA RED de la Corporación de Osso, Colombia. 2014. *México- Inventario Histórico de Desastres.* Extraído desde <http://www.desinventar.org/> el día 04 de diciembre de 2014
- Magaña, V, Clemente López, LC., Vázquez,G. 2013. *El Pronóstico de Lluvias Intensas para la Ciudad de México.* TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 16(1) pags. 18-25. UNAM, Ciudad de México, México.

- Mazari Hiriart, M, De la Torre, L, Mazari Menzer, M y Ezcurra, E. 2001. *Ciudad de México: dependiente de sus recursos hídricos*. Ciudades 51, julio-septiembre de 2001, RNIU, Puebla, México. Extraído desde http://www.aguaenmexico.org/images/estados10enero/df/Ciudad%20de%20mexico_dependiente%20de%20sus%20recursos%20hidricos.pdf el día 13 de abril de 2015.
- Martínez Alfaro, PE, Martínez Santos,P, Castaño Castaño,S.2006.*Fundamentos de Hidrogeología*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. pag 39.
- Minke, G. (s/f) *Techos verdes: Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Editorial Fin de Siglo (pp. 17-20). Universidad de Kassel, Kassel, Alemania.
- Noticieros Televisa .2015. *Inundaciones en 130 vialidades; Indios Verdes, la zona más afectada*. Extraído desde <http://noticieros.televisa.com/mexico/1507/encharcamientos-130-vialidades-indios-verdes-zona-mas-afectada/> el día 21 de septiembre de 2015.
- Notimex El Universal. 2013. *Túnel Emisor Oriente, la obra más grande del mundo*. El Universal. Extraído desde <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad-metropoli/2013/tunel-orientegrandeobra-940174.html> el día 08 de abril de 2015.
- Zolina,O ,Simmer,C, Belyaev,K, Gulev,SK, y Koltermann,P. 2013. *Changes in the Duration of European Wet and Dry Spells during the Last 60 Years* . *J. Climate*, **26**, 2022–2047. cual es el orden de las referencias? sobra la Z?
- Ortega Font, NM. 2011. *El agua en números* (pp 39-40). UAM: Editorial Casa del Tiempo, México, D.F. Extraído desde http://www.uam.mx/difusion/casadeltiempo/41_iv_mar_2011/casa_del_tiempo_eIV_num41_39_40.pdf el día 23 de septiembre de 2015.
- Plant&Soil Sciences eLibrary. 2015. *Soils-Part 2:Physical Properties of Soil and Soil Water*. Extraído desde <https://passel.unl.edu/pages/informationmodule.php?idinformationmodule=1130447039&topicorder=10&maxto=10> el día 15 de noviembre de 2015.
- Programa de Acción Climática de la Ciudad de México. 2014. (PACCM) *Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2014-2020*. Extraído desde <http://centromariomolina.org/interna/PACCM.pdf> el día 20 de noviembre de 2015.
- Quadri de la Torre, G. 2008. *Estudio de Costo Beneficio del Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables del GDF*. USAID/Mexico Competitiveness Program. Extraído desde <http://islaurbana.mx/contenido/biblioteca/investigaciones/aguadf/USAIDMexicoCompetitivenessProgram2008.pdf> el día 20 de noviembre de 2015.
- Raga, G, Baumgardner,D. 2010. *Changes in Precipitation Intensity in Mexico City:Urban Heat Island Effect or the Impact of Aerosol Pollution?* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Ciudad de México, México, Extraído desde http://www.researchgate.net/publication/237197120_CHANGES_IN_PRECIPITATION_INTENSITY_IN_MEXICO_CITY_URBAN_HEAT_ISLAND_EFFECT_OR_THE_IMPACT_OF_AEROSOL_POLLUTION el día 25 de noviembre de 2015.
- RainWise Program. 2015. Extraído desde <http://www.seattle.gov/util/EnvironmentConservation/Projects/GreenStormwaterInfrastructure/RainWise/index.htm> el día 04 de abril de 2016.

- Reyes Santiago, J. 2015. *Azoteas Verdes Para Disminuir La Contaminación Atmosférica*. Boletín UNAM-DGCS-395 Ciudad Universitaria, UNAM. México, D.F.
- Rojas Valencia, MN, Gallardo-Bolaños, JR, Martínez Coto, A. 2012. *Implementación y caracterización de un sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia*. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 15(1): 16-23, México, D.F.
- Romero Lankao, P. 2010. *Water in Mexico City: what will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities?* SAGE Environment and Urbanization 22(1) 157-178.
- Romero Sánchez, G. 2015. *Basura, causa de la mitad de las inundaciones y encharcamientos*. Periódico La Jornada, p.29.
- Ruiz Días, JA, Ramos Castellanos, P, Sánchez León, G, Sanz Herráiz, C, Sánchez Bermúdez, A, Lizana Avia, M, Bravo Villa, C, Salazar, JA, Rueda Sánchez, S, Márquez Moreno, MC, Gómez Antón, R, Redondo Álvarez, O, Fernández Orcajo, J, Gallastegui Zulaica, C, Del Pozo Pérez, A y Ballesteros Perdices, M (2009) *Cambio Climático, Un Desafío A Nuestro Alcance ¿?* (p.78) Salamanca, España. Aquilafuente, XIII Jornadas Ambientales ediciones Universidad Salamanca, España.
- Ruiz, F, Hernández, E, Suárez, G, Robles, J, Aldaz, P. 2015. *Tormenta abate al DF; deja 280 inundaciones y colapsa vías*. El Universal, Metrópoli, D.F. Extraído desde <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/metropoli/df/2015/09/4/tormenta-abate-al-df-deja-280-inundaciones-y-colapsa-vias> el día 21 de septiembre de 2015
- SAGARPA (s/f). *Escurrimientos superficiales*. Desarrollo Rural: Publicaciones Extraído desde <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Publicaciones/Lists/CursoTaller%20Desarrollo%20de%20capacidades%20orientadas%20a/Attachments/24/02.pdf> el día 25 de septiembre de 2015.
- Sánchez Luna, G. 2011. *El Crecimiento Urbano del Distrito Federal (Ciudad de México) y su Legislación Urbanística*. Revista Jurídica: Boletín Mexicano de Derecho Comparado No. 85 Extraído desde <http://www.juridicas.unam.mx/publica/rev/boletin/cont/85/art/art13.htm> el día 11 de junio de 2015.
- Salazar, C y Schteingart, M. 2005. *Expansión urbana, sociedad y ambiente. El caso de la Ciudad de México* (pp.79-80). El Colegio de México, México, DF.
- Salomón Abedrop, L. 2012. *El Gran Reto Del Agua en la Ciudad de México*. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Extraído desde http://www.sacmex.df.gob.mx/img/sacm/libro_sacmex/libro_sacmex.pdf el día 17 de marzo de 2015
- Shantz, HL, 1956. History and problems of arid lands development. En: INECC(s/f). *Adaptación de las plantas a la aridez*. Extraído desde <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/668/adaptaciones.pdf> el día 13 de septiembre de 2015
- Schlünzen, KH, Hoffman, P, Rosenhagen, G y Riecke, W. 2009. Long-term changes and regional difference in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. International Journal of Climatology. 30: 1121-1136 (2010). DOI: 10.1002/joc.1968
- SEMARNAT. 2008. *El Túnel Emisor Oriente duplicará la capacidad del drenaje profundo del Valle de México*. Comisión Nacional del Agua. Extraído desde http://www.atl.org.mx/aguadf/images/docs/Folleto_El_Tunel_Emisor_Oriente.pdf el día 08 de abril de 2015.
- Sharma, AK, Begbie, D, Gardner, T. (2015). *Systems for Urban Water Supply: Design, Yield, Energy, Health Risks, Economics and Social Perceptions*. IWA Publishing London, UK.

- Steiner, LM, Domm, RW. 2012. *Rain Gardens: Sustainable landscaping for a beautiful yard and a healthy world* (pp. 15-17). MBI Publishing Company
- The Department of Health. 2011. *Determining the required size of tank to be installed*. Extraído desde <http://www.health.gov.au/internet/publications/publishing.nsf/Content/ohp-enhealth-raintank-cnt-l-ohp-enhealth-raintank-cnt-l-b> el día 13 de septiembre de 2015.
- The World Bank. 2010. *Cities and Climate Change: An Urgent Agenda* (pp. 8-13). Urban Development Series Knowledge Papers. Vol.10 Washington D.C., EEUU.
- Thompson, LM, Troeh, FR. (2002) *Los suelos y su fertilidad* (pp.61-62) (2da edición). Editorial Reverté, España.
- Traxco .2009. Humedad en Suelos de Diferente Textura. Extraído desde <http://www.traxco.es/blog/tecnologia-del-riego/humedad-en-suelos-de-diferente-textura> el día 16 de noviembre de 2015.
- Universidad Autónoma de México (s/f). *Sistema de drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México(ZMCM)*. (Figura 3) Extraído desde <http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/libro2-hidrologia/HU1-2-03.pdf> el día 16 de noviembre de 2015
- Universidad Nacional Autónoma de México. 2015. *Mapas de Peligros Geológicos. Gobierno de la Ciudad de México: Protección Civil*. Extraído desde http://www.proteccioncivil.df.gob.mx/mapas_sgm/mapas_sgm2.html el día 13 de junio de 2015
- Villalonga Gordaliza, A. 2007. *El imperialismo hidráulico de los aztecas en la Cuenca de México*. Aguas y Culturas 288 Septiembre 2007. Extraído desde http://www.academia.edu/889189/Imperialismo_Hidr%C3%A1ulico_de_los_Aztecas_en_la_Cuenca_de_M%C3%A9xico el día 08 de abril de 2015
- World Bank (s/f) *Mexico Case Study Overview: Climate Change, Disaster Risk and the Urban Poor: Cities Building Resilience for a Changing World*. Extraído desde http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1306291319853/CS_Mexico_City.pdf el día 25 de noviembre de 2015