



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN CLIMÁTICA EN EL  
VALLE DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

P R E S E N T A :

DIONISIO ALBERTO AGUILAR RAMÍREZ

TUTOR:

DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL

Fecha: Noviembre de 2012



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: **Dr. Rodolfo Silva Casarín**

Secretario: **Dr. Carlos Escalante Sandoval**

Vocal: **Dr. Lilia Reyes Chávez**

1<sup>er</sup>. Suplente: **Dr. Alba Beatriz Vázquez González**

2<sup>do</sup>. Suplente: **Dr. Enrique Cesar Valdez**

Ciudad Universitaria, Posgrado de Ingeniería UNAM,

**TUTOR DE TESIS:**

---

**DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL**

A mi Padre;  
por ser el mayor ejemplo de tenacidad en mi vida.

A mis sobrinos Romina, Azul, Victoria y Zazil- Ha;  
por la alegría de su existencia.

A mi hermano Cesar;  
por su apoyo incondicional siempre.

A Elisa;  
Por el inconmensurable amor y apoyo que me ha dado.  
Este trabajo es un esfuerzo de los dos.

A Ángel Coronel y María de Jesús Higuera;  
mi nueva familia, gracias por su apoyo.

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por todo el apoyo que he recibido en mi formación profesional y humana.

Al CONACYT por promover y apoyar la formación de posgrados en el país, y quien hizo realidad mis estudios de maestría, gracias a la beca otorgada con número de CVU 268586.

Al Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval por su apoyo incondicional para la realización de esta tesis. Su apoyo y sus consejos fueron determinantes para la realización de este trabajo. Mi más profundo agradecimiento.

A mis sinodales por el tiempo dedicado a la revisión de mi trabajo de tesis.

## RESUMEN

El valle de México concentra al 20% de la población nacional, históricamente ha sido el centro de las actividades económicas y culturales del país. Desde la época prehispánica hasta la actualidad el valle de México ha estado expuesto a frecuentes inundaciones debido a su condición geográfica. Para proteger la vida de las civilizaciones que se han asentado desde la época prehispánica se desarrollaron obras hidráulicas para extraer el agua de la cuenca que naturalmente es cerrada, condición modificada por el hombre a finales del siglo XVIII.

En la actualidad se habla de cambios en los patrones del clima, los cuales podrían modificar la frecuencia y magnitud de los eventos extremos de precipitación. Lo anterior podría traer problemas en la operación de la red hidráulica de la Ciudad de México. Para detectar los cambios en el clima a escala local se hace uso de los índices de cambio climático, los cuales se calculan a partir de datos instrumentales del clima.

En este trabajo se calcularon los índices de cambio climático para la variable precipitación y se determinaron las tendencias de dichos índices. Se utilizó una base de datos de 58 estaciones distribuidas en la Ciudad de México y su zona conurbada, con un periodo común de 46 años (1965-2010). Para completar los datos faltantes en los registros de lluvia se utilizó la técnica de interpolación inversa. Posteriormente se realizó un análisis de frecuencias en cada una de los registros y se calcularon las curvas Intensidad- duración - periodo de retorno.

Los resultados muestran que, en el periodo de análisis considerado, existen modificaciones en los patrones de precipitación. Lo anterior podría ser un indicador de la necesidad de revisar los periodos de retorno para el diseño de obras hidráulicas, pues se ha observado que en ciertas zonas ha aumentado la frecuencia de días con lluvias importantes (mayores a 20 mm). A esto se debe sumar el hecho de que en muchas zonas de la ciudad no existe infiltración de agua de lluvia por la presencia de asfalto, lo cual, disminuye los tiempos de concentración de las redes de drenaje pluvial saturándolas en lluvias fuertes pero de corta duración.

## **ABSTRACT**

The Valley of Mexico concentrates 20% of the national population, historically it has been the economic and cultural activity center of the country. Since pre-Hispanic times, the Valley of Mexico has been exposed to frequent floods due to its geographical location.

In order to protect the life of the civilizations that have been settled since pre-Hispanic times, hydraulic works were developed to extract the water from the basin which is naturally closed, condition that was modified by man in the late eighteenth century.

Nowadays, changes in the weather patterns are discussed which could modify the frequency and magnitude of the extreme events of precipitation.. The former could bring problems in the operation of the hydraulic network of Mexico City.

To detect the changes of the climate in a local scale, climatic change indices are used which are calculated from weather instrumental data. In the present work the climatic change indices were calculated for the precipitation variable and identified trends in these indices.

A database of 58 stations distributed in Mexico City and its suburbs was used, with a common period of 46 years (1965-2010). In order to complete the missing data of the rain records, the technique of the inverse interpolation was applied. Subsequently, an analysis of the frequencies of each one of the records was performed and the Intensity-duration-return period charts were obtained.

The results show that, for the period of analysis considered, there are modifications in the precipitation patterns. The former could be an indicator of the necessity of checking the return periods for the design of hydraulic works as it has been observed that in certain zones the frequency of important rainy days (larger than 20 mm) has increased. In addition, the fact that in many zones of the city there is no infiltration of the rain water due to the presence of asphalt which decreases the concentration times of the rain stormwater networks saturating them in heavy rains with short durations.

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>31</b>
<b>CAPITULO I .CAMBIO CLIMÁTICO: CONCEPTOS BÁSICOS</b> .....	<b>33</b>
I.1        Tiempo y Clima .....	33
I.2        Cambio Climático .....	35
I.3        Cambios en los Fenómenos Meteorológicos Extremos .....	36
I.4        Escenarios de cambio climático.....	38
<b>CAPITULO II.DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</b> .....	<b>53</b>
<b>CAPITULO III .REGISTROS DE PRECIPITACIÓN</b> .....	<b>63</b>
<b>CAPITULO IV</b> .....	<b>74</b>
<b>CÁLCULO DE ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO</b> .....	<b>74</b>
IV.1.        Pruebas de Independencia.....	75
IV.2.        Pruebas de Homogeneidad.....	77
IV.3        Cálculo de Índices de Cambio Climático adoptados por la CONAGUA. ....	83
IV.4        Resultados de Índices de Cambio Climático .....	84
<b>CAPITULO V .CÁLCULO DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO</b> .....	<b>117</b>
<b>CAPÍTULO VI .ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>130</b>
<b>CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>144</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>147</b>
<b>ANEXO A</b> .....	<b>150</b>
<b>ANEXO B</b> .....	<b>188</b>
<b>ANEXO C</b> .....	<b>219</b>



## INTRODUCCIÓN

El agua ha sido el recurso natural que indudablemente más ha influido en la historia de las sociedades que se han asentado en la cuenca del Valle de México. La situación geográfica y las características fisiográficas de la cuenca, Figura 1, son factores determinantes en las soluciones que se han adoptado para hacer frente a la excedencia y escases del vital líquido.

Históricamente las grandes civilizaciones siempre se han asentado cerca de fuentes de abastecimiento de agua (ríos y lagos), lo cual les ha permitido desarrollarse. En el caso de la cuenca del Valle de México se asentó la Civilización Mexica la cual fue sin lugar a dudas la cultura más importante durante la época Prehispánica. Esta cultura fundó en 1325 la Ciudad de Tenochtitlán, con la particularidad de que la ciudad se construyó en un islote dentro del lago de Texcoco. En esa época la cuenca tenía 5 lagos principales formándose uno sólo en época de lluvias; el lago de Texcoco era el de menor nivel topográfico hecho que desencadenaba frecuentes y peligrosas inundaciones en la capital mexicana. Posteriormente ya durante la colonia sucedieron frecuentes y desastrosas inundaciones sobre la Ciudad de México, problemática que se sigue presentando hasta nuestros días aunque con menor frecuencia y magnitud.



Para mantener a la capital del país fuera del peligro de una inundación que podría ser desastrosa, se ha desarrollado una gran cantidad de infraestructura; presas, canales, túneles, entubamiento de ríos, plantas de bombeo, entre otros. Algunos ejemplos de esta infraestructura son; el Gran Canal de Desagüe, el Sistema de Drenaje Profundo y las Plantas de Bombeo que sirven para desalojar los caudales del Gran Canal. Sin embargo las causas que originan la problemática de las inundaciones son muy complejas y tienen relación directa con el crecimiento desordenado de la ciudad.

Los hundimientos diferenciales del subsuelo son un problema añejo que ha ocasionado que las obras hidráulicas superficiales pierdan su capacidad de desalojo y aunque se sabe cuál es el problema, en la práctica se ha hecho poco para detenerlo. Aunado a esto se cree que el Cambio Climático modificará los patrones de los fenómenos meteorológicos extremos, aumentando su frecuencia e intensidad. En el caso concreto de las lluvias significaría más días con lluvias extremas y de mayor intensidad al año. Esto podría traer graves consecuencias en la seguridad de las obras hidráulicas contra inundaciones, pues trabajarán al límite de su capacidad mayor número de veces que las que se tiene pensado en su diseño; es decir en la práctica se reduciría el periodo de retorno de las lluvias extremas, además de que aumentaría la intensidad respecto a las condiciones originales de diseño. Lo anterior se traducirá en un aumento en la frecuencia y magnitud de las inundaciones y encharcamientos.

Entender cuáles han sido y cuáles son actualmente las causas naturales y antropogénicas que influyen de manera directa en las frecuentes inundaciones en la cuenca, es la base para enfrentar un problema que ha marcado la conformación de las sociedades y el desarrollo de diferentes tipos de infraestructura en las diversas sociedades que se han asentado en la cuenca del Valle de México.

A continuación se presenta un breve recuento sobre las inundaciones históricas en la cuenca del Valle de México las cuales, han tenido una fuerte incidencia en las formas de vida y en el desarrollo de infraestructura de los grupos humanos que se han asentado en dicha cuenca, desde las sociedades prehispánicas hasta nuestros días.

Las obras hidráulicas contra inundaciones se han construido en la cuenca del Valle de México desde el Preclásico Medio<sup>1</sup> (1200-400 a.c) hasta la actualidad. Lo anterior es un indicador de la necesidad histórica de construir dichas obras para proteger la vida humana y sus bienes.

La cuenca del Valle de México es de origen tectónico y se formó después de cincuenta millones de años de intenso vulcanismo y extensos hundimientos tectónicos; las potentes erupciones volcánicas del Chichinautzin obstruyeron el drenaje hacia la cuenca del río Balsas hace dos mil años. La cuenca de México naturalmente es Endorreica, sin embargo, el hombre modificó esta condición y desde el siglo XIX tiene salida artificial hacia la cuenca del río Tula, afluente del Pánuco. El área de la cuenca es de aproximadamente 8,000 km<sup>2</sup> y originalmente contaba con cinco grandes lagos, que juntos sumaban alrededor de 1,100 km<sup>2</sup>, de diferente tipo, altimetría y tamaño; Xaltocan, Texcoco y Zumpango, eran salados mientras que Xochimilco y Chalco eran de agua dulce. En la Figura 2 se muestran los ríos que drenaban en la cuenca.



Figura 1. Localización de la cuenca de México.

---

<sup>1</sup> "La Cuenca de México" en *Arqueología Mexicana*, Vol. XV número 86, julio-agosto 2007.



Figura 2. Cuenca de México original; 5 lagos y ríos tributarios. Fuente: Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México, CONAGUA 2007.

Debido a la situación geográfica y conformación natural de la cuenca, las sociedades que en ella han vivido siempre han luchado contra las inundaciones; durante la época prehispánica la concepción que se tenía del medio acuático significó un acoplamiento con la naturaleza, diseñando y construyendo obras hidráulicas para protegerse de los aumentos de niveles en los lagos, pero respetando la existencia de los mismos; en la época de La Colonia los conquistadores no tenían la misma visión y la respuesta ante las constantes inundaciones fue la desecación de los lagos y la construcción de una salida artificial que drenara la cuenca que naturalmente era cerrada.

En la época del Posclásico (750-1519 d.c.) la cuenca de México tenía 5 lagos principales; Texcoco, Zumpango, y Xaltocan los cuales debido al tipo de suelos en los que se hallaban eran salobres; Chalco y Xochimilco eran de agua dulce. El lago con el nivel más bajo era el de Texcoco mientras que Zumpango era el de mayor nivel topográfico. Fue

en una isla del lago de Texcoco donde se asentaron las ciudades de Tlatelolco y Tenochtitlán. Debido a su nivel los excedentes de todos los lagos descargaban en el lago de Texcoco, lo cual ocasionaba inundaciones frecuentes en la llamada isla de México.

La construcción de estas ciudades dentro del lago con el nivel más bajo las hizo susceptibles a frecuentes y peligrosas inundaciones. Como respuesta se desarrollaron múltiples obras para controlar el agua, para diferentes usos; control de inundaciones, comunicación a través de canales de navegación, riego, agua para consumo humano, entre otras.

De acuerdo con los alcances de éste trabajo sólo se tratarán de las inundaciones y las obras hidráulicas desarrolladas para controlarlas en la época prehispánica por lo cual sólo se hará énfasis en las mismas. Lo anterior no significa que sean el único tipo de obras que se desarrollaron en la cuenca, pues así como había abundancia de agua en el lago de Texcoco, ésta era salada por lo cual se tuvo que desarrollar infraestructura para traer agua potable fuera de las ciudades, la agricultura también requirió de obras de gran envergadura para sostener una población, que a la llegada de los españoles se estima era de alrededor de un millón de personas en toda la cuenca.

De acuerdo a la información disponible se sabe que se desarrollaron múltiples obras de protección contra inundaciones; diques, chinampas, albarradas, calzadas, embarcaderos canales y puentes. Las obras de mayor importancia por su tamaño fueron las calzadas, albarradas y chinampas, de las cuales se da continuación una breve descripción:

*Calzadas.* Se construyeron con arcillas compactadas terminadas en talud, tenían cortes con puentes para permitir la circulación del agua éste tipo de calzadas se construyó en dirección este-oeste, mientras que en dirección norte-sur se construyeron de piedra y tenían pocos cortes y se localizaban cerca del lago de Texcoco. De esta manera funcionaban principalmente como diques y como vías de comunicación.

*Diques o Albarradas.* Fueron muros de contención principalmente contruidos de roca cuya función era proteger contra las inundaciones y evitar la pérdida de suelos.

*Chinampas.* Eran parcelas que se construían en los pantanos y en la zona del lago con niveles bajos. Se cree que además del beneficio agrícola que significaron también

fueron el primer intento a gran escala para drenar los pantanos, creándose como ejemplo las ciénagas chinamperas del lago de Chalco-Xochimilco. Gracias a la construcción del Albarradón de Netzahualcóyotl se aisló en cierta forma un lago donde se ubicaba la isla de México. Este aislamiento de las aguas salobres del lago de Texcoco así como las aportaciones de manantiales del sur y las descargas de los ríos del poniente hizo posible que en la ciudad de Tenochtitlán se implantara el sistema de chinampas. La Figura 3 muestra la infraestructura hidráulica construida antes de la conquista.

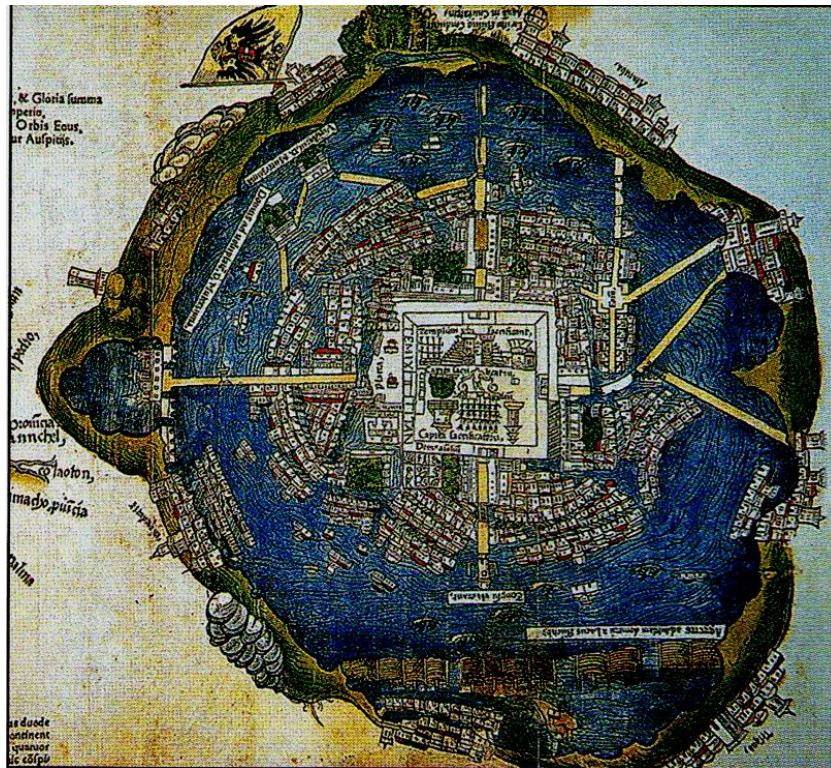


Figura 3. Elementos Hidráulicos en la cuenca de México antes de la conquista. Fuente: Lagos del Valle de México en Arqueología Mexicana, volumen XII, número 68.

Debido a la naturaleza lacustre de las ciudades asentadas en el lago de Texcoco, las inundaciones durante la época Prehispánica debieron ser frecuentes presentándose las más importantes, según las fuentes históricas (Chimalpopoca, 1975; Torquemada, 1975), en 1382, 1449, 1499 y 1517.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Lagos del Valle de México" en Arqueología Mexicana, Vol. XII número 68.

Como resultado de las inundaciones de 1449 y 1499 (Chimalpopoca, 1975; Torquemada, 1975)<sup>3</sup> se construyeron los Diques de Netzahualcáyotl y de Ahuízotl, respectivamente. La función de estos era proteger a la Ciudad de Tenochtitlán de los escurrimientos provenientes del lago de Texcoco el cual como se ha mencionado era el que tenía el más bajo nivel topográfico de los cinco lagos principales.

El Albarradón o Dique de Netzahualcáyotl fue construido por éste gobernante en 1449 como respuesta a una inundación del mismo año. Las fuentes documentales indican que tenía alrededor de 16 kilómetros de longitud, 7 metros de ancho y su trazo iba de Iztapalapa hasta Atzacualco pasando muy cerca del Peñón de los Baños (Ramírez 1976, p.35).<sup>4</sup>

El dique de Ahuízotl lleva el nombre de este gobernante y se construyó en su reinado debido a una fuerte inundación ocurrida en 1499. Aunque no existe suficiente información sobre éste dique, se sabe que partía de la Calzada de Tepeyac hasta la Viga. La Figura 4 corresponde a la Ordenanza de Cuauhtémoc en 1524, en esta figura se pueden observar los Albarradones de Netzahualcáyotl y Ahuízotl.

---

<sup>3</sup> Lagos del Valle de México" en Arqueología Mexicana, Vol. XII número 68.

<sup>4</sup> Lagos del Valle de México" en Arqueología Mexicana, Vol. XII número 68.

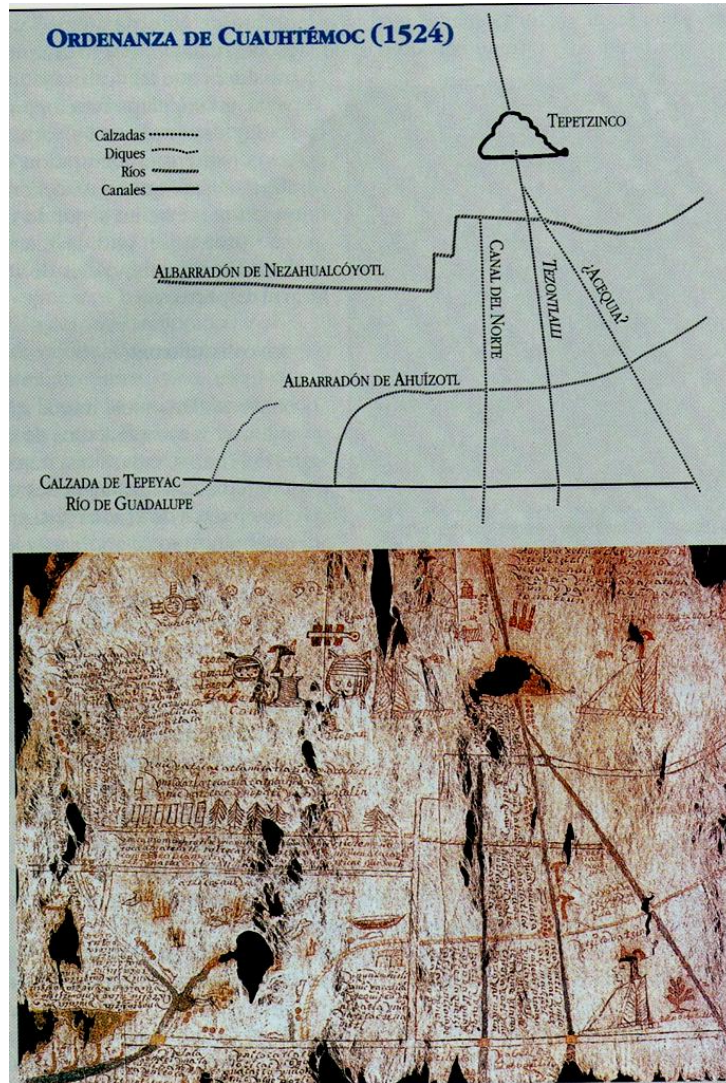


Figura 4. Ordenanza de Cuauhtémoc de 1524, documento que señalaba los límites territoriales entre los señores de Tlatelolco y Tenochtitlán, en este documento se pueden observar los albarradones de Nezahualcóyotl y Ahuízotl.

Fuente: Lagos del Valle de México en Arqueología Mexicana, volumen XII, número 68.

En la Figura 5 se presenta la infraestructura (sistema de diques, calzadas y chinampas) desarrollada durante la época del Posclásico Tardío (1350 - 1519 d.c.) en la cuenca del Valle de México. Debido a la naturaleza propia del islote donde se creó la Ciudad de Tenochtitlán, las inundaciones debieron ser muy frecuentes por lo que además de servir como protección contra inundaciones, la infraestructura también ayudó a proteger contra la pérdida de suelos favoreciendo el desarrollo de la agricultura.

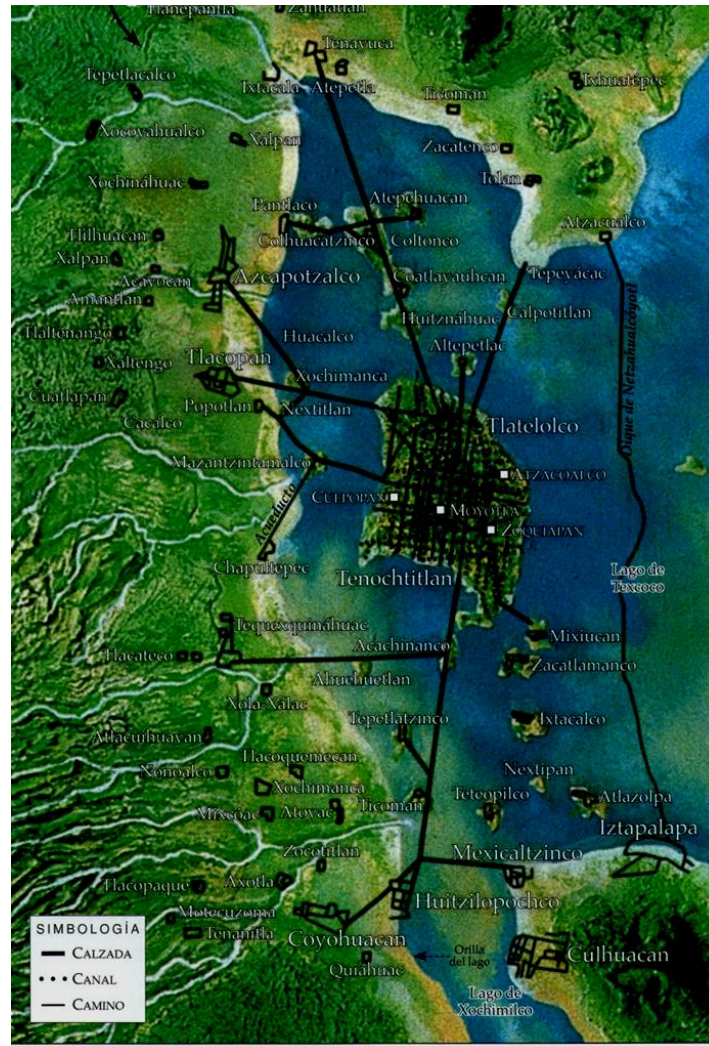


Figura 5. Infraestructura Hidráulica durante el Posclásico tardío. Fuente: La Cuenca de México en Arqueología Mexicana, volumen XV, número 86.

A la llegada de los españoles a la cuenca de México encontraron la ciudad de Tenochtitlán asentada sobre un islote en medio de un lago, ésta ciudad tenía una urbanización de 12 km<sup>2</sup> y entre 150 000 y 200 000 habitantes, además de otras urbes asentadas a lo largo de la cuenca las cuales en total sumaban una población de alrededor de un millón de habitantes.



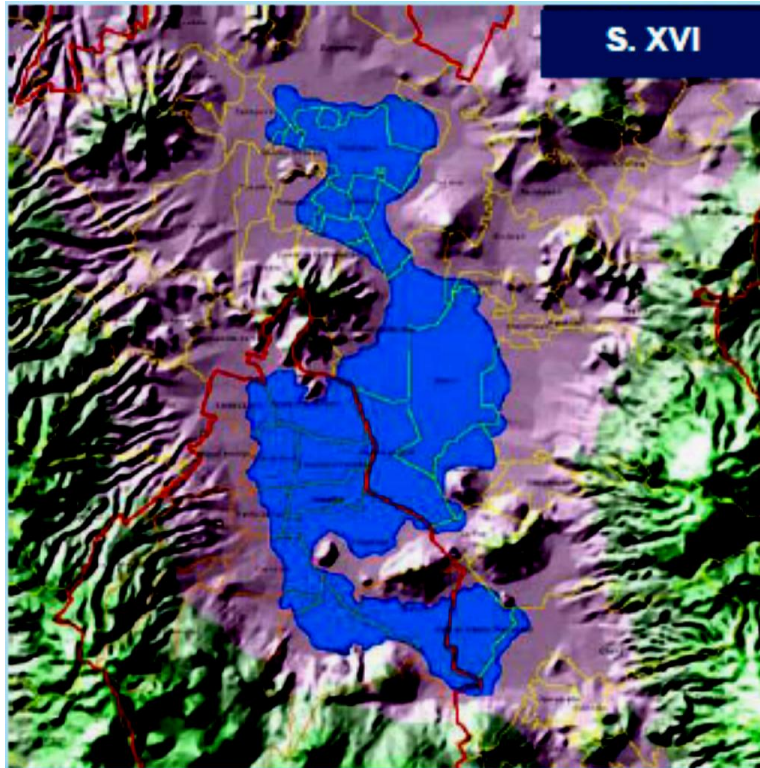


Figura 6. La cuenca de México en el siglo XVI. Fuente: Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México, CONAGUA 2007.

Durante la época colonial el problema de las inundaciones se agravó pues hubo un aumento en la frecuencia de las mismas. La compleja red de infraestructura hidráulica desarrollada en la Ciudad de Tenochtitlán no fue aprovechada por los conquistadores quienes por desconfianza o desconocimiento nunca la operaron. Lo anterior trajo consigo inundaciones frecuentes en la nueva ciudad española que se fundó sobre la ciudad de Tenochtitlán, siendo las más fuertes las ocurridas en 1555, 1580, 1604-1607 y 1615. En la Figura 7 se muestra la recién fundada ciudad de México rodeada por agua.

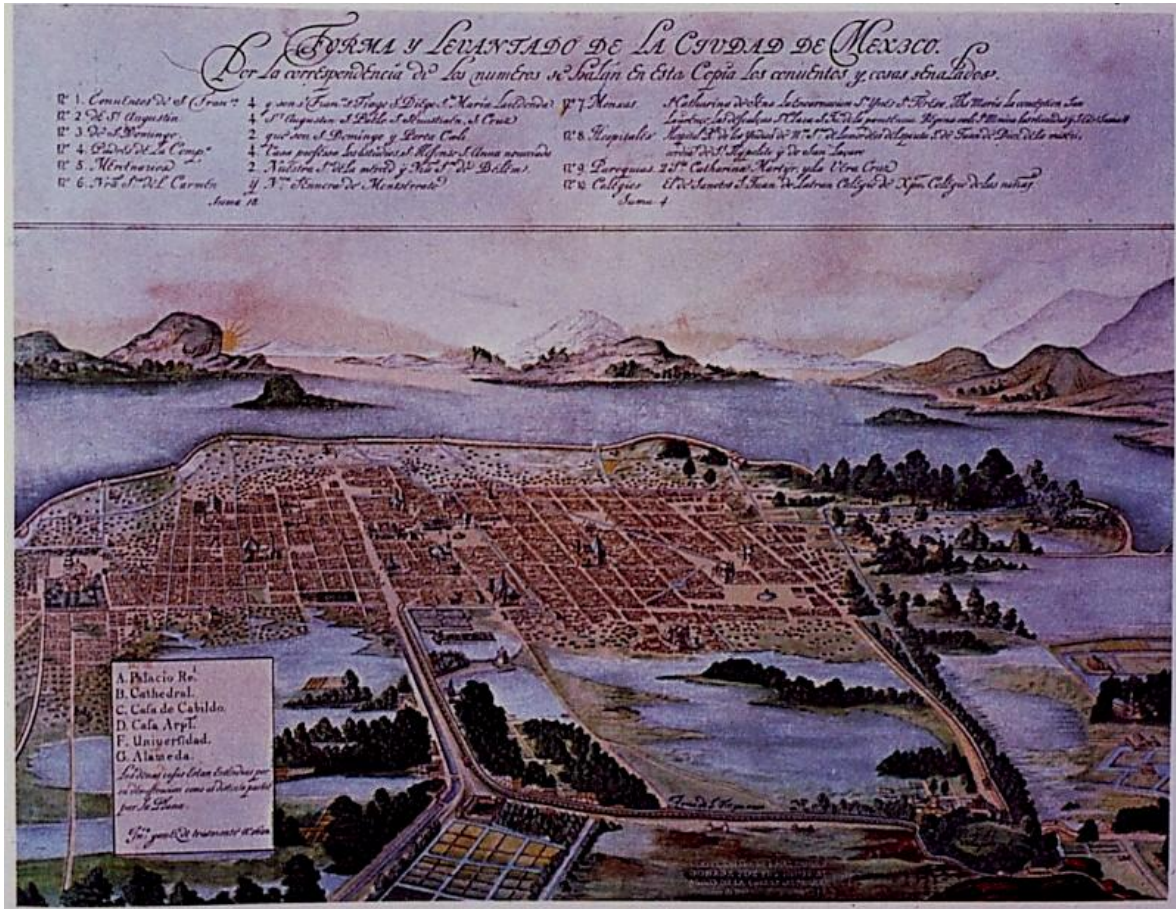


Figura 7. La ciudad de México en 1628. Fuente: Juan Gómez de Transmonte, maestro mayor en la construcción de la Catedral de México quien estuvo involucrado en el desague de la ciudad.

En un intervalo de 70 años ocurrieron cuatro inundaciones de grandes magnitudes lo cual obligó a los conquistadores a buscar una solución definitiva; drenar la cuenca que naturalmente era cerrada. Entre 1607 -1608 se encomendó la tarea de abrir la cuenca al cosmógrafo alemán Enrico Martínez. El proyecto conocido como el Tajo de Nochistongo, Figura 8, fue sin lugar a dudas el proyecto de ingeniería más grande de la época y consistía en hacer un tajo y perforar un túnel de 7 kilómetros, cerca de Huehueteca, que conectará con la cuenca del río Tula. De esta manera la Cuenca de México dejaría de ser cerrada y tendría una salida artificial que permitiría sacar de la cuenca los excedentes de agua evitando las frecuentes inundaciones en la recién fundada capital de la Nueva España.

Cabe aclarar que aunque se pensaba que ésta sería la solución para terminar con los problemas de inundaciones esto no fue así, pues la realidad hídrica de la cuenca era otra; el

desagüe sólo servía para drenar el río Cuautitlán, principal río del lago de Zumpango evitando que éste se desbordara hacia el lago de Texcoco, sin embargo no se controlaban las aportaciones de todas las subcuencas situadas al sur y oriente del desagüe.

La construcción del desagüe dio inicio en 1607 y finalizó en 1789 casi dos siglos después debido a problemas técnicos y políticos. Así en 1623 los opositores a la construcción del mismo convencieron al Virrey de Gelves de que el desagüe no servía para nada suspendiendo la construcción en ese mismo año. Seis años después en 1629 la ciudad y su periferia sufrieron una de las peores inundaciones de las que se tiene registro; el agua subió 2 metros y la ciudad duro cinco años anegada, hasta que en 1634 una temporada de sequía le puso fin, sin embargo, barrios como los de Santa Catarina y Santa Ana permanecieron abandonados un año más. El saldo de la inundación fue de alrededor de 30,000 muertes asociadas a las enfermedades y carestía, de 30,000 a 50,000 personas desplazadas de la capital y un ambiente lodoso e insalubre. En esa época la población en la ciudad tenía 150,000 habitantes, por lo que debido a la inundación se perdió alrededor del 50% de la población entre muertos y desplazados ("Lagos del Valle de México" en *Arqueología Mexicana*, Vol. XII número 68). Como resultado de lo anterior se planteó incluso la posibilidad de cambiar de sede la capital a un sitio más elevado y con suelo firme, entre Tacuba y Tacubaya, idea que finalmente no prosperó.

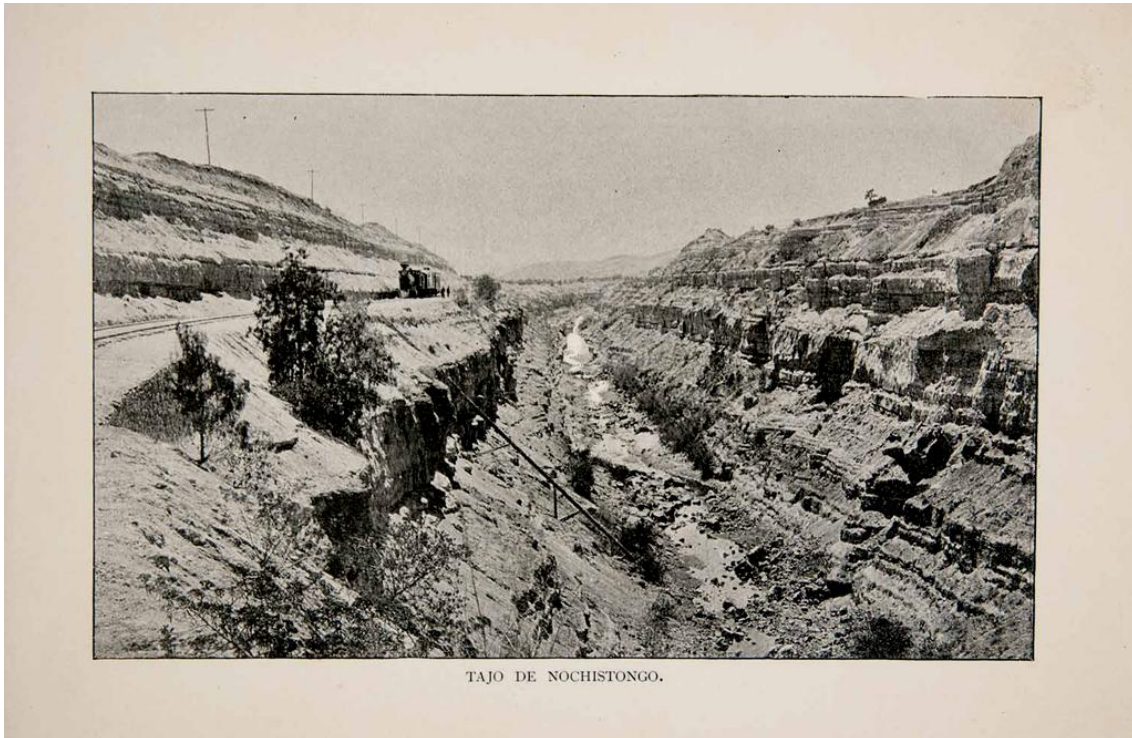


Figura 8. Tajo de Nochistongo en 1893.

Durante la época virreinal no se volvió a presentar una inundación como la de 1629 sin embargo, sí hubo otras inundaciones importantes entre las que destacan las de los años de 1674, 1707, 1714, 1747, 1763 y 1819. Es interesante observar que la frecuencia de las inundaciones en ésta época parece ser mayor que en la época prehispánica donde según los registros indican que en promedio cada 50 años se presentaba una inundación mayor (1382, 1449, 1499 y 1517).

La construcción de la primera salida artificial de la Cuenca de México sin lugar a dudas ayudó a minimizar los problemas de las inundaciones ayudando al desagüe de la cuenca, sin embargo, no fue suficiente pues se atacaba solo una parte del problema, por lo cual después de la independencia siguieron los esfuerzos por encontrar una solución total al problema de las inundaciones.

Durante el siglo XX continuaron los esfuerzos por terminar con las recurrentes inundaciones en la Ciudad de México. Después de la Independencia aún existían lagos y canales de navegación, lo cual generó fuertes debates entre los que pensaban que desecar

los lagos era lo mejor para la ciudad y los que pensaban que la abundancia de agua podía aprovecharse para el transporte, canalización e irrigación. Se tienen registros que desde la época colonial existieron diversos proyectos relacionados con el desagüe de la cuenca; sin embargo no había las condiciones políticas ni económicas para realizarlos. Fue hasta la época porfiriana en la que existió una relativa paz y un contexto favorable, que hizo posible la continuación de la construcción del desagüe. En la Figura 9 se muestra la situación de la cuenca del Valle de México en el primer cuarto del siglo XIX.

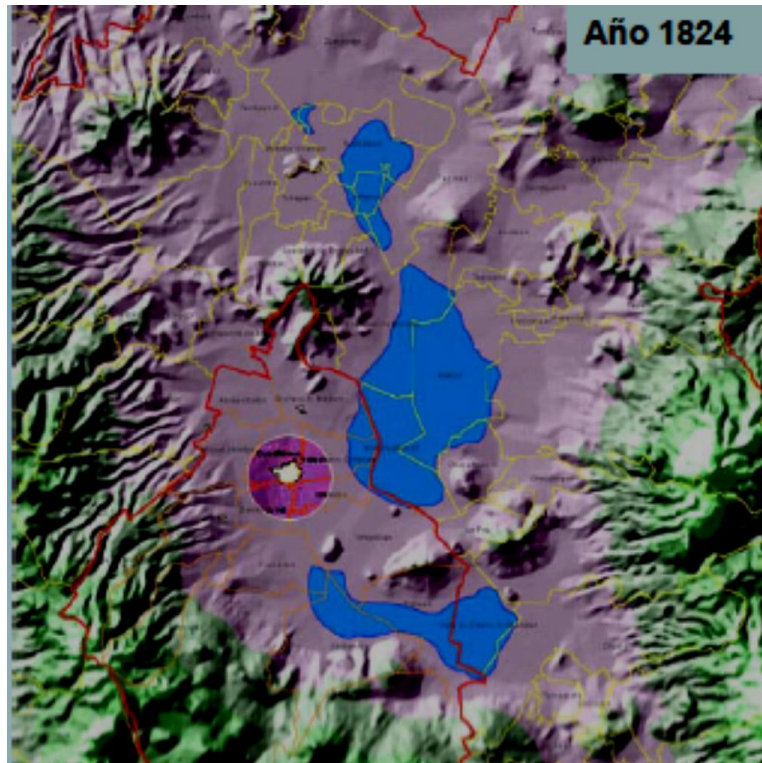


Figura 9. La cuenca de México en el siglo XIX. Fuente: Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México, CONAGUA 2007

En 1857 el Ingeniero Francisco de Garay presentó un proyecto que combinaba las ideas anteriores; desecar el lago y conservarlo. El proyecto consistía en construir un canal de 50 kilómetros de longitud que iniciaba al éste de la ciudad, en San Lázaro, atravesando los lagos de Texcoco, San Cristóbal y Zumpango, conduciendo sus caudales y los de los ríos a su paso hasta el río Tequixquiac por medio de un túnel de 9 kilómetros de longitud. Aunado a estas obras se construirían tres sistemas de canales secundarios para ser usados

cuando hubiera excedentes en los canales de Chalco y Xochimilco, junto con 200 canales menores abiertos en los lagos desecados, la canalización serviría para riego y comunicación. Éste proyecto fue el precursor del Gran Canal de Desagüe y buscaba el aprovechamiento integral de la cuenca sin secar totalmente la misma.

Finalmente la obra que se ejecutó durante el gobierno de Porfirio Díaz se basó en el proyecto anterior pero simplificado. El Gran Canal de Desagüe, Figura 10, inicio su construcción en 1886 (once años después de la inundación de 1875) y finalizó en 1900. La obra principal consistió en un canal de 47.5 kilómetros de longitud que va desde San Lázaro hasta Zumpango y que conecta con un túnel de 10 km de longitud y 4 metros de diámetro el cual atraviesa la sierra de Tequixquiac para luego, desembocar en un tajo a cielo abierto de 2.5 kilómetros. Contaba además con una serie de obras complementarias como presas, puentes y viaductos. El gasto con el cual se diseñó fue de  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ , y en aquella época se pensó que se había dado solución definitiva, pues la ciudad contaba con un millón de habitantes.

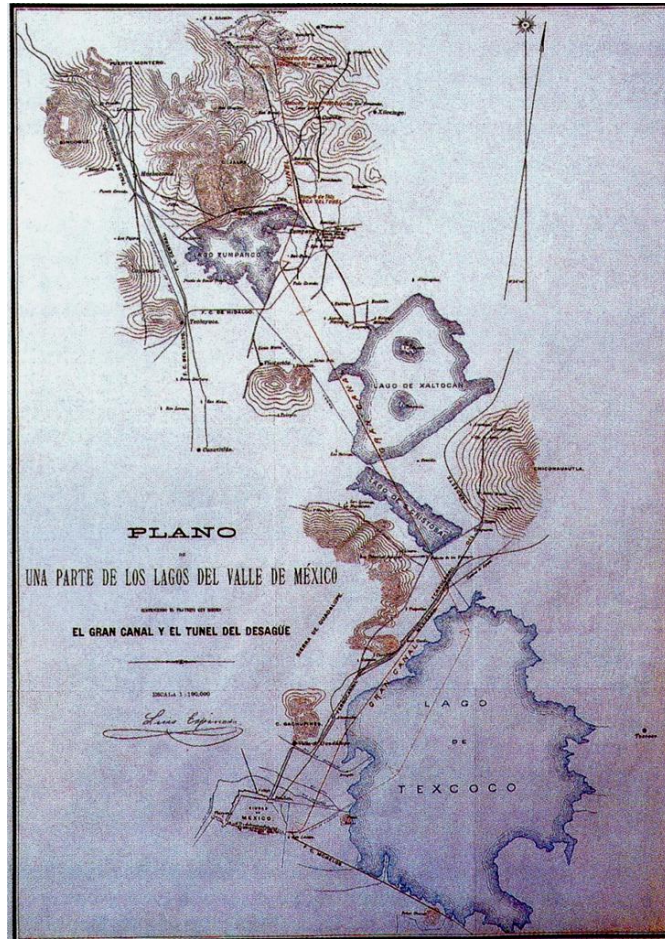


Figura 10. Trayectoria del Gran Canal de Desagüe construido bajo el gobierno de Porfirio Díaz

Desde su inauguración el Gran Canal de Desagüe funcionó bien, sin embargo unos años después de terminada la revolución en el año de 1925 se presentó la primera inundación de gran magnitud posterior a su inauguración, debido a la pérdida de pendiente del sistema, lo que puso de manifiesto que ésta no era la obra definitiva para eliminar las inundaciones en la ciudad de México. El problema de las inundaciones se volvió mas complejo de lo que parecía; desde la apertura del tajo de Nochistongo se rompió el equilibrio ecológico de la cuenca pues se expulsaba agua sin que se compensará la misma cantidad; posteriormente el Gran Canal de Desagüe expulsaba no sólo las aguas superficiales si no que también las subterráneas que eran obtenidas de pozos y que se utilizaban para consumo humano. La pérdida de agua en los suelos arcillosos del antiguo lago ocasionó que el subsuelo se comenzará a comprimir originando hundimientos diferenciales.

Aunado a lo anterior, a partir de 1930 comenzó un acelerado crecimiento demográfico de la ciudad de México; en 1930 había un millón de habitantes, en 1940 dos millones, en 1950 tres millones y en 1960 cinco millones, lo anterior significaba extraer y expulsar mayores cantidades de agua del subsuelo incrementando el fenómeno de los hundimientos diferenciales. La Figura 11 presenta la situación de los cuerpos de agua en la cuenca en el primer cuarto del siglo XX, se puede observar la desecación de los lagos a partir del siglo XVI.

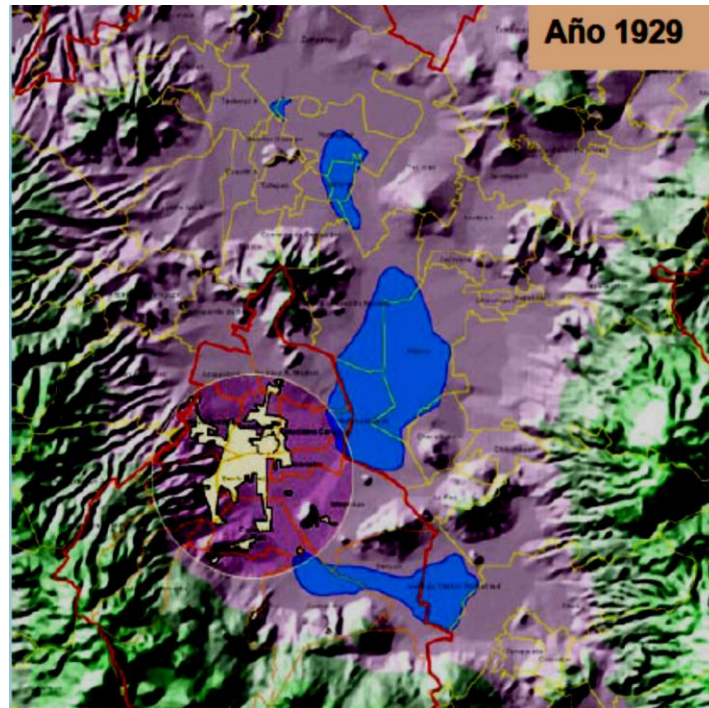


Figura 11. La cuenca de México en 1929. Fuente: Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México, CONAGUA 2007

A principios del siglo XX los hundimientos en la ciudad fueron relativamente pequeños (de 2 a 5 cm por año), entre 1938 y 1948 el hundimiento en el centro de la ciudad era de 18 centímetros al año, para 1950 ya se habían alcanzado hundimientos de 50 centímetros anuales, finalmente se ha calculado que en promedio durante el siglo XX la ciudad de México se ha hundido 1 metro cada 10 años.

Como consecuencia de la intensiva extracción y expulsión de agua de los acuíferos, el Gran Canal de Desagüe, que cuando fue inaugurado en 1900 se hallaba 5 metros arriba del Zócalo capitalino, para 1950 había disminuido considerablemente su pendiente. Como



es sabido en la hidráulica de canales una estructura de éste tipo es muy sensible en su funcionamiento a los cambios de pendiente, por lo cual, al disminuir la misma provocó que el Gran Canal remansará sus aguas hacia la ciudad de México ocasionando importantes inundaciones entre las que destacan las de 1925 y 1951, en donde la ciudad permaneció inundada alrededor de 3 meses, el tirante de agua alcanzó 2 metros y la capital volvió a ser navegable, Figura 12.



Figura 12. Inundaciones de la ciudad de México en 1925,1945 y 1951.

Con el objetivo de aumentar la capacidad de desalojo del Gran Canal en 1954 se inauguró un segundo túnel en Tequixquiac, además de algunas ampliaciones de secciones en el canal.

Durante el periodo de 1954 y 1967 se construyeron miles de kilómetros de colectores y plantas de bombeo logrando una capacidad acumulada de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , el interceptor y emisor poniente, el entubamiento de los ríos Churubusco, la Piedad y Consulado. Sin embargo, estas obras seguían siendo insuficientes pues continuaban

aumentando las tasas de hundimiento en la ciudad, lo cual provocaba que al paso de algunos años la infraestructura superficial perdiera capacidad o bien dejara de funcionar.

Una vez más se tenía que buscar una solución definitiva que alejará del peligro de las inundaciones a la capital del país, pero ahora se debería de tomar en cuenta la problemática de los hundimientos diferenciales del subsuelo. Fue así que en 1967 se inició la construcción del sistema de Drenaje Profundo, el cual consistía en un una serie de túneles de 60 kilómetros de longitud diseñados originalmente para transportar  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  de aguas pluviales. Con la construcción de esta obra, que se inauguró en 1975, se pensó que sería la solución definitiva pues esta obra no se vería afectada por los hundimientos diferenciales que desde principios de siglo XX aquejaba a la ciudad.

Como ejemplo de las afectaciones que han tenido los hundimientos diferenciales en las obras de protección hidráulica se incluye la Figura 13 donde se muestra como el Gran Canal de Desagüe fue perdiendo paulatinamente su pendiente original. En 1900 el Gran Canal estaba 5 metros abajo del nivel del Zócalo capitalino, actualmente la situación se ha invertido encontrándose 7 metros arriba del centro de la ciudad. Así mismo, en 1910 la Ciudad de México se encontraba 1.9 metros arriba del lago de Texcoco ahora está 10 metros abajo.

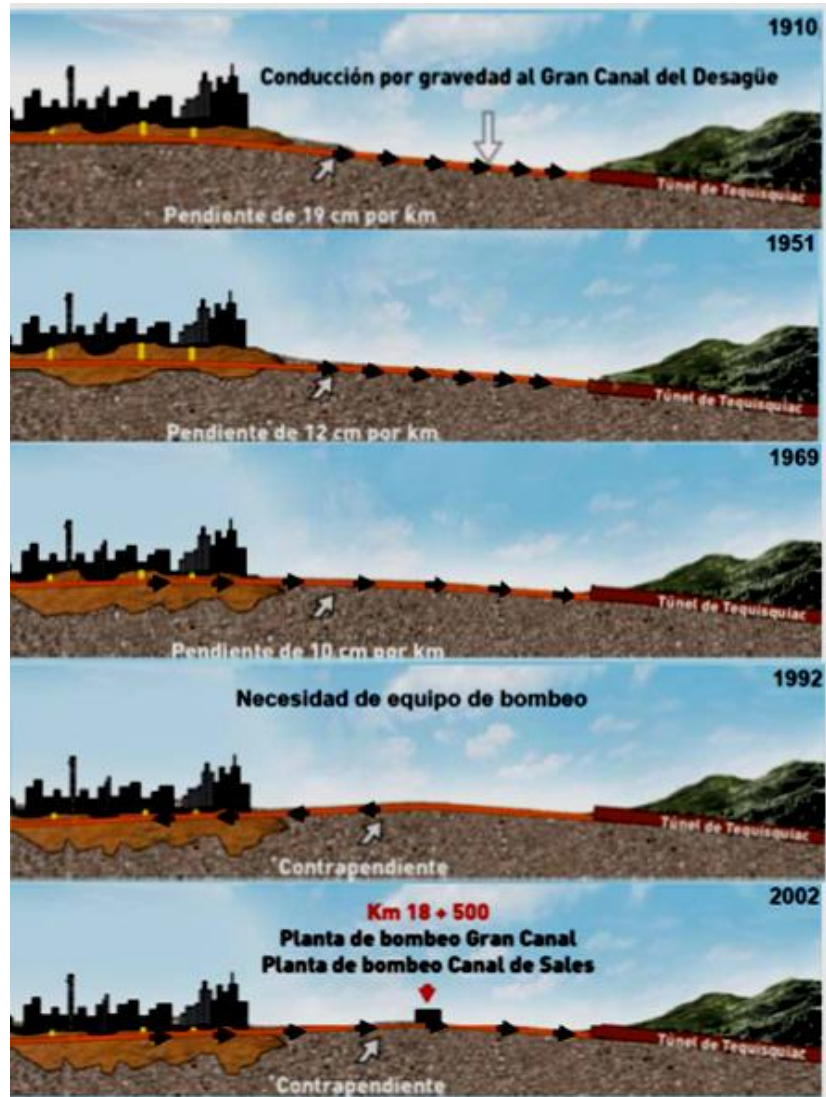


Figura 13. Gran Canal de Desagüe y los hundimientos diferenciales Fuente: Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México, CONAGUA 2007

Es interesante observar que durante la década de 1980 la población en la ciudad de México era de 14.5 millones de habitantes. En 1990 la ciudad tenía 15.6 millones de habitantes, en el año 2000 contaba con 18.4 millones y en 2010 tenía 20 millones de habitantes. Se puede notar el acelerado crecimiento de la población, lo que produjo también incrementos importantes en el área urbanizada de la ciudad, Figura 14.

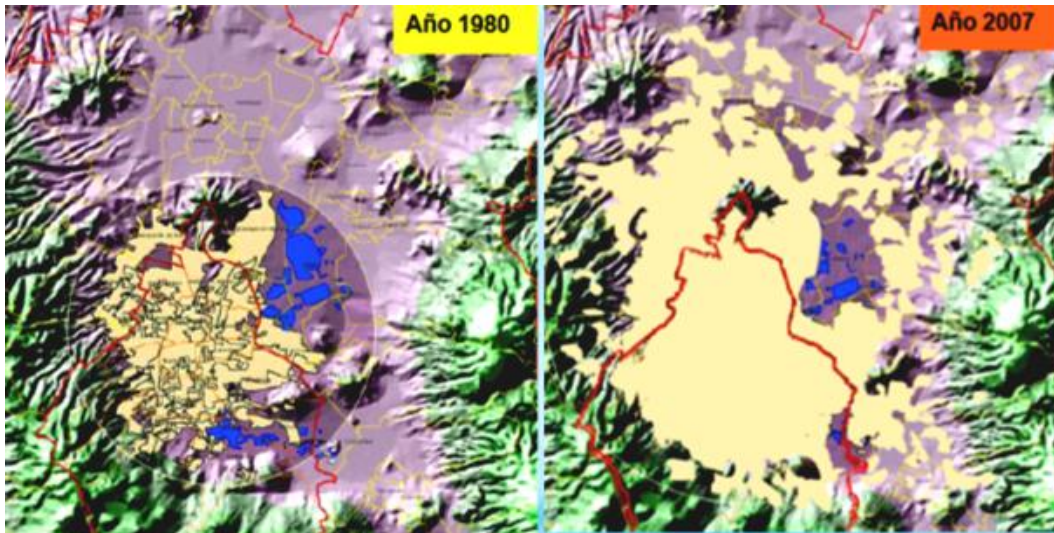


Figura 14. Urbanización en la cuenca de México en 1980 y 2007. Fuente: Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México, CONAGUA 2007

De la Figura 14 se observa que el área urbanizada en la cuenca aumentó aceleradamente desapareciendo casi por completo los cuerpos de agua que originalmente existían. Este acelerado crecimiento ha ocasionado una demanda de servicios de drenaje y agua potable proporcional al crecimiento de la urbe. Aunado a esto, ahora se tiene el problema de que en la mayor parte de la ciudad el suelo tiene algún recubrimiento (asfalto y/o concreto) lo cual impide que el agua de lluvia se filtre a los mantos acuíferos con la consecuencia de dos importantes problemas; se disminuyen los tiempos de concentración de las tormentas que llegan al sistema de drenaje pluvial, esto en comparación con los tiempos de concentración originales, el segundo problema se trata de los hundimientos diferenciales que aumentan al no haber recarga en los acuíferos. Lo anterior es causa directa de inundaciones en el sistema de drenaje, sobre todo en tormentas de alta intensidad.

Se puede entonces concluir que el peligro de las inundaciones de la ciudad aun está latente y no se ha solucionado de forma definitiva. Aunque desde hace más de 50 años no ocurre una inundación de gran magnitud, gracias al desarrollo de infraestructura, la ciudad sigue creciendo de forma desordenada. Aunado a esto los cambios en los patrones climáticos que posiblemente harán que aumente la frecuencia e intensidades de eventos meteorológicos extremos. Particularmente en el norte de la ciudad existe evidencia de que

debido a la urbanización se está generando el fenómeno denominado “islas de calor” que ocasiona lluvias locales de alta intensidad aumentando también la frecuencia de las mismas.

Todo lo anterior ha hecho que el sistema de drenaje pluvial trabaje al límite varias veces al año en diferentes partes de la red, generando encharcamientos en las partes bajas de la ciudad. Un caso concreto fue el de la Tormenta tropical Arlene (2011) que puso a trabajar al máximo de sus capacidades a toda la infraestructura de drenaje pluvial, poniendo de manifiesto la falta de capacidad de desalojo que actualmente existe. La tormenta Arlene tuvo una duración de 8 días, del 26 de junio al 3 de julio del 2011, llegando su máximo el 30 de junio de ese año en el que escurrieron 24.6 Mm<sup>3</sup> equivalentes al volumen de la tormenta de diseño para un periodo de retorno de 50 años distribuidos en 24 horas. Cabe hacer la aclaración que la tormenta de diseño del sistema de drenaje profundo es de 50 años periodo de retorno y un tiempo de concentración de 8 horas. Por lo que el sistema estuvo a punto de trabajar a su máxima capacidad de diseño.

La falta de mantenimiento en túneles y canales ha ocasionado la disminución de la capacidad de desalojo, lo cual en el caso concreto de la tormenta Arlene ocasionó que se tuvieron que improvisar lagunas de regulación cerca de la planta de Bombeo Casa Colorada, para evitar el colapso del sistema, Figura 15.

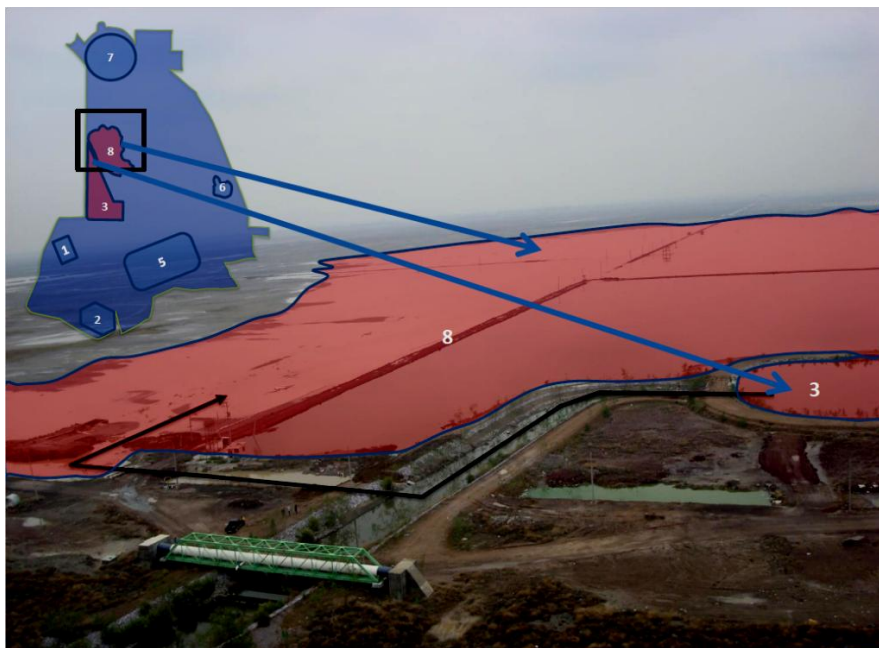




Figura 15. Efectos de la tormenta tropical Arlene 30 de junio de 2011. Improvisación de lagunas de regulación Fuente: Diálogos por el Cambio Climático, agosto de 2011, CONAGUA.

Actualmente se encuentra en construcción el Túnel Emisor Oriente, el cual se sumará al Emisor Central, Emisor Poniente y Gran Canal para ser la cuarta salida hacia Hidalgo. El Túnel Emisor Oriente (TEO) será un túnel de 7 metros de diámetro y 62 kilómetros de longitud el cual tendrá una capacidad de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ . Según datos de la CONAGUA durante la época de lluvias se requiere desalojar  $315 \text{ m}^3/\text{s}$  de aguas residuales y pluviales. Como se puede ver en la Figura 16 la capacidad en conjunto del sistema de drenaje actual es de  $165 \text{ m}^3/\text{s}$ , por lo cual con la construcción del TEO se estará cubriendo al límite esta necesidad.

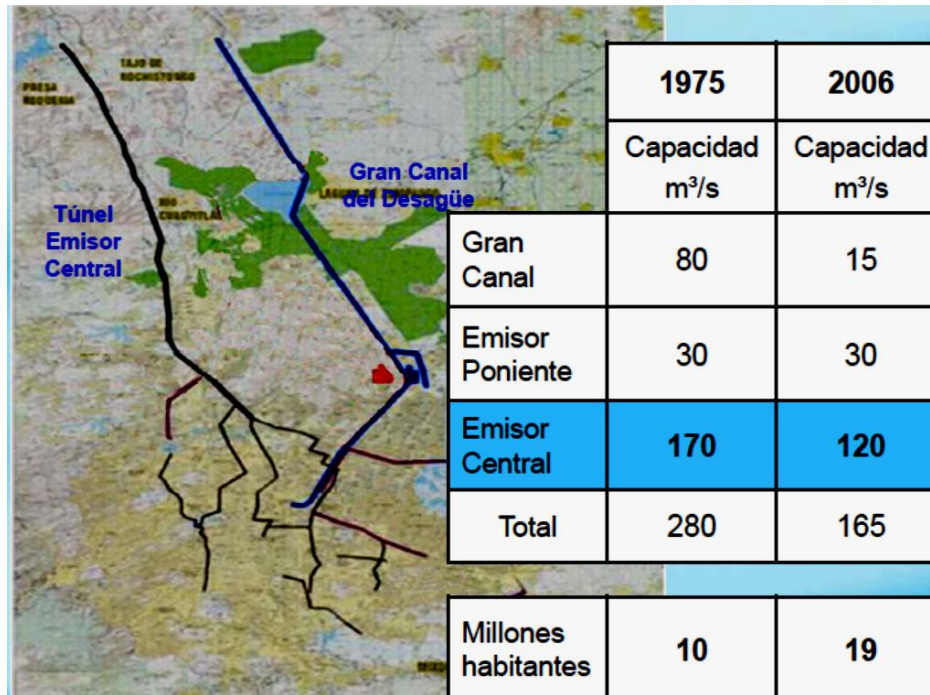


Figura 16. Capacidad Actual del sistema de Drenaje de la Zona Conurbada de la Ciudad de México. Fuente: Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México, CONAGUA 2007.

En la Figura 17 se presenta el trazo y características generales del TEO, cabe mencionar que junto a esta obra se diseñaron 14 captaciones las cuales tienen la función de coleccionar parte del gasto que llega al Gran Canal conduciéndolo por el TEO aliviando la carga al Gran Canal.

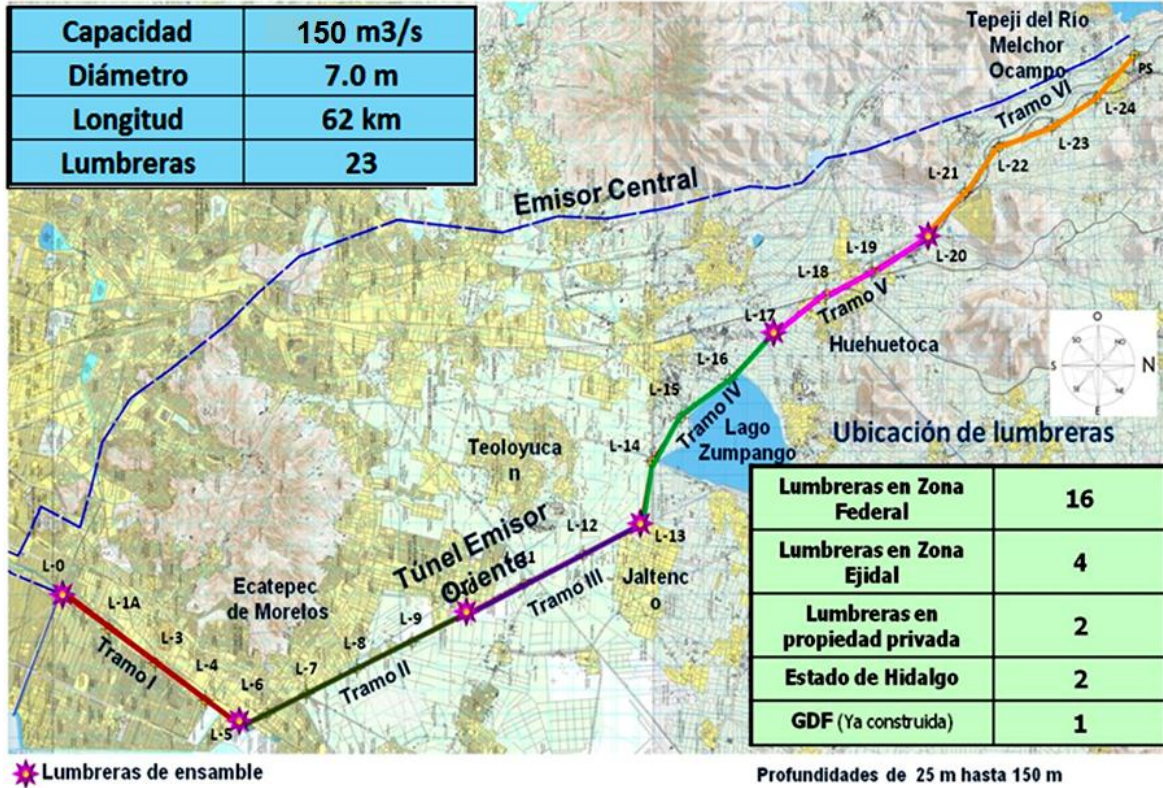


Figura 17. Túnel Emisor Oriente. Datos Generales

Finalmente en las Figuras 18 y 19 se presenta la red actual y futura de la Zona Conurbada de la Ciudad de México.



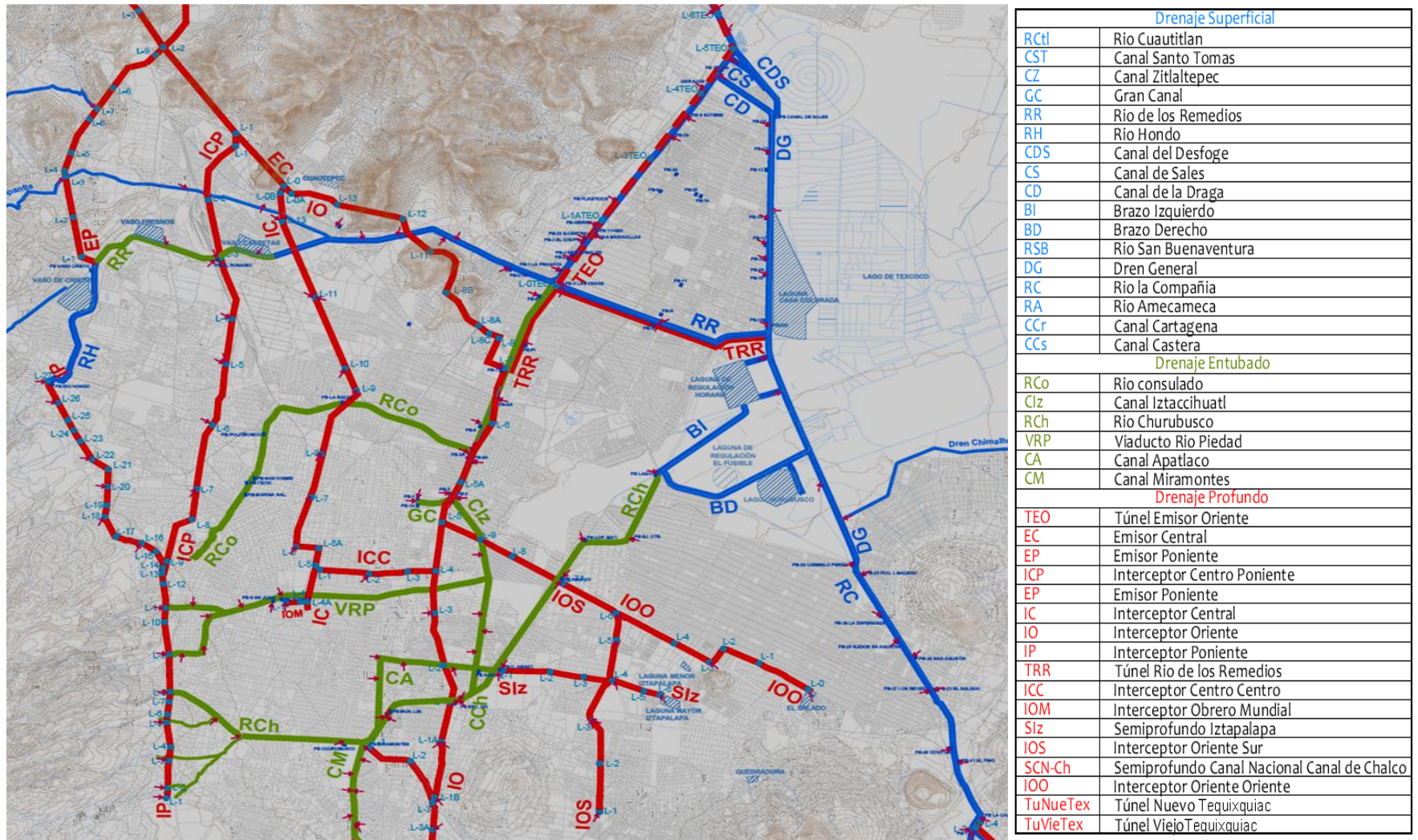


Figura 18. Sistema de Drenaje de la Zona Conurbada de la Ciudad de México

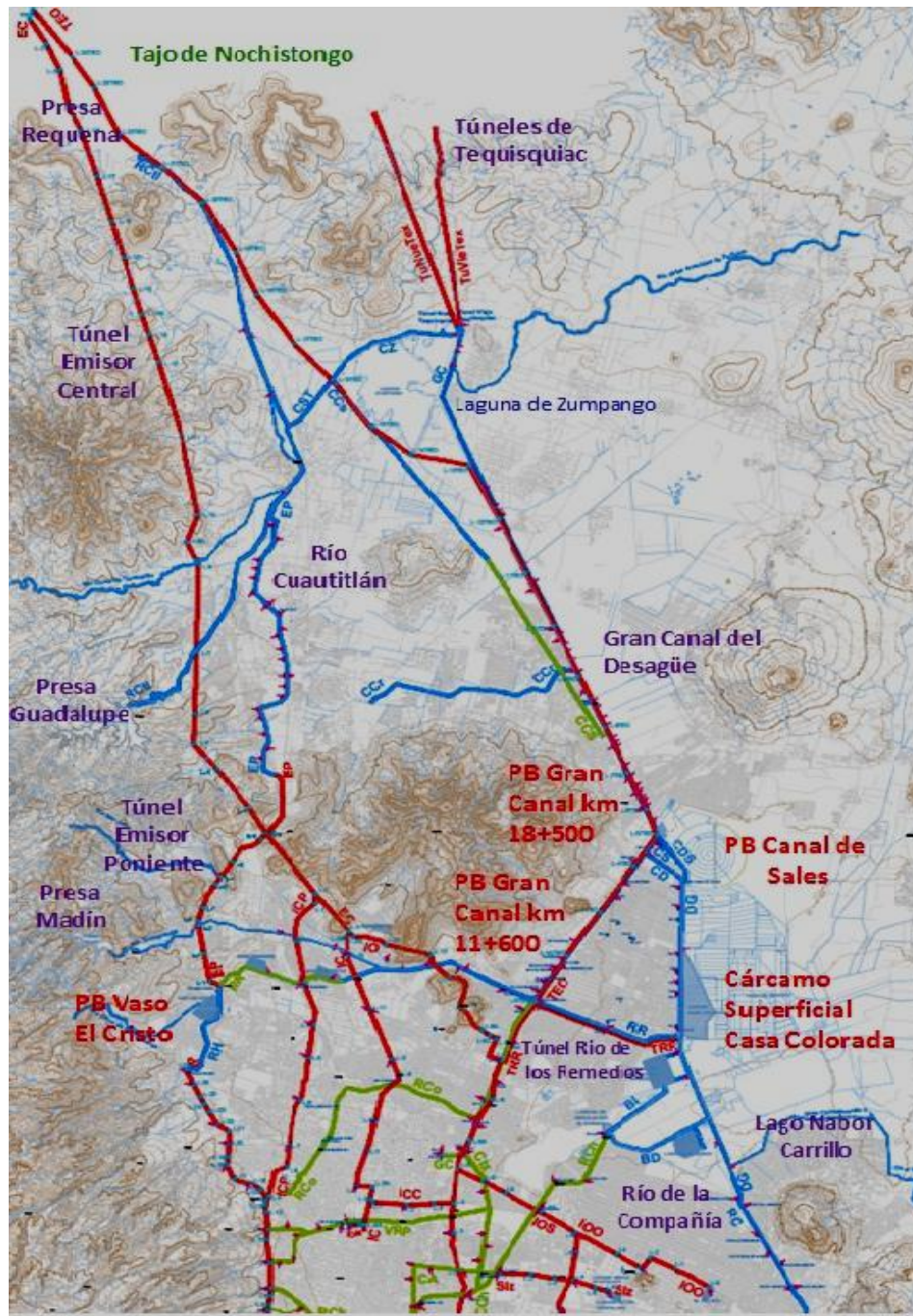


Figura 19. Sistema principal de Drenaje y Salidas de la Cuenca

La precipitación y las condiciones fisiográficas y naturales de la cuenca determinan el escurrimiento y su variación espacial y temporal. Por lo anterior, se presenta la definición de precipitación así como los tipos existentes:

La *precipitación* meteorológica se define como: cualquier forma de hidrometeoro que cae del cielo y llega a la superficie terrestre, incluyendo *lluvia, llovizna, nieve, granizo* sin considerar *virga* (hidrometeoro que cae de una nube pero se evapora antes de caer al suelo), *neblina* y *rocío* los cuales son formas de condensación no de precipitación.

De acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial la lluvia se define como: la precipitación de partículas de agua líquida con un diámetro mayor de 0.5 mm, o de gotas menores pero muy dispersas. La lluvia depende básicamente de tres factores que son la presión, la temperatura y la radiación solar. El proceso general que produce la precipitación (sólida o líquida) se genera cuando el aire está saturado de humedad condensando el vapor de agua en las nubes, las cuales al elevarse y enfriarse dan inicio a la precipitación. La precipitación se mide en milímetros y equivale al espesor de la lámina de agua que se formaría en una superficie plana e impermeable. Los instrumentos para medir la precipitación más utilizados en México son los pluviómetros y los pluviógrafos. Los pluviómetros miden la precipitación acumulada en 24 horas, mientras los pluviógrafos miden la precipitación en intervalos de tiempo menores.

Las precipitaciones se clasifican de acuerdo a los mecanismos que las producen, de la siguiente manera:

*Precipitaciones convectiva.* Se produce cuando las masas de aire cálido, ascienden, y posteriormente se enfrían, generando precipitación. Son típicas de regiones cálidas y húmedas. En la Ciudad de México es frecuente que se presente éste tipo de precipitación cuando se caliente el aire que entra en contacto con la superficie del suelo en las zonas mayormente urbanizadas.

*Precipitación orográfica:* Este fenómeno se produce cuando las masas de aire caliente ascienden sobre un relieve montañoso. Después de que las masas de aire chocan

contra el relieve el aire se enfría lo suficiente como para formar nubes y precipitar en forma líquida. Son típicas de regiones montañosas.

*Precipitación frontal:* Cuando dos masas de aire de diferentes temperaturas y presiones, chocan de forma frontal, la masa de aire caliente asciende por encima de la de aire frío, enfriándose a su vez.

Con relación a la distribución espacial de la lluvia se presenta la Figura 20 elaborada por el INEGI la cual presenta las isoyetas de precipitación en la ciudad de México.



Figura 20. Isoyetas de Precipitación en la Ciudad de México. Fuente:INEGI

Se ha presentado una breve descripción de la problemática e historia de las inundaciones en la Ciudad de México desde la época Prehispánica hasta la actualidad, también se describió la infraestructura desarrollada para controlar los escurrimientos producto de lluvias extremas. Por su ubicación y características fisiográficas la Cuenca del Valle de México siempre ha estado expuesta a las inundaciones, las causas y efectos de las mismas han cambiado con el tiempo y con relación a las sociedades que se han asentado en la cuenca.

En la actualidad además de los problemas mencionados asociados a las inundaciones se suma el cambio en los patrones del clima. Se piensa que en los próximos años los patrones en la ocurrencia de fenómenos extremos (inundaciones y sequías) se pueden intensificar y aumentar en magnitud. De ser cierto se deberá tomar en cuenta este factor para el diseño futuro de las obras hidráulicas en la Cuenca del Valle de México.

Además el cambio en los patrones atmosféricos, ha mostrado evidencia de que en las zonas altamente urbanizadas de la Ciudad de México y su zona conurbada se generan Islas de Calor producidas por el calentamiento de las masas de aire derivadas de la urbanización. Las Islas de Calor son un fenómeno local que genera lluvias convectivas aumentando la frecuencia e intensidad de las mismas.

Desgraciadamente los modelos de circulación general de la Atmósfera que se usan para predecir los posibles cambios en el clima tienen escalas demasiado grandes, que no permiten predecir el clima a escala local. Debido a esto es necesario estudiar los cambios locales del clima del Valle de México y sus repercusiones en las obras hidráulicas, a partir de registros instrumentales del clima local.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

A partir de la información disponible, determinar si se han presentado cambios en las tendencias de la variable Precipitación en el Valle de México, para estudiar sus implicaciones en los parámetros de diseño (especialmente en la construcción de las curvas Intensidad-Duración-Periodo de Retorno), de las obras hidráulicas dentro de la zona de estudio.

### Objetivos Particulares.

- Obtener un periodo común de registros de precipitación para el área de estudio.
- Obtener algunos de los Índices de Cambio Climático elaborados por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático( ETCCDI) y adoptados por la Comisión Nacional Del Agua (CONAGUA) para la variable de precipitación.
- Realizar el análisis de frecuencias para los valores máximos diarios anuales de cada estación climatológica analizada.
- Obtener las Curvas IDT para el área de estudio.
- Estudiar las implicaciones en los parámetros de diseño de las obras hidráulicas, en caso de hallar cambios en las tendencias de precipitación en el valle de México.

Este trabajo está dividido en siete secciones de las cuales se da una breve descripción a continuación. En el *Capítulo I* se explican los conceptos básicos de Cambio Climático, Escenarios de Cambio Climático e Índices de Cambio Climático mencionando las particularidades de cada concepto. El *Capítulo II* presenta la delimitación de la zona de estudio. En el *Capítulo III* se trata el tema de la selección, análisis y control de calidad de registros pluviométricos, así como el periodo común de análisis. También se incluye el tema de Interpolación de Lluvias, para la estimación de datos faltantes en los registros seleccionados para el cálculo de los Índices de Cambio Climático. En el *capítulo IV* se presentan los resultados del cálculo de los índices de Cambio Climático adoptados por la CONAGUA para la variable precipitación. En el *Capítulo V* se presentan los resultados del análisis de frecuencias realizado a los registros máximos diarios anuales de cada una de las estaciones climatológicas consideradas. Se incluyen los resultados del cálculo de las IDT para el área en estudio, así como la descripción de la metodología utilizada. En el *Capítulo VI* se realiza el análisis de los resultados obtenidos. Finalmente dentro del *Capítulo VII* se incluyen las recomendaciones y conclusiones obtenidas del análisis de resultados tomando en consideración los objetivos que dieron lugar a este trabajo.

## **CAPITULO I**

### **CAMBIO CLIMÁTICO: CONCEPTOS BÁSICOS**

En este capítulo se presentan los conceptos básicos de Tiempo y Clima, los cuales son la base para entender qué es el Cambio Climático. También se presentan y explican a grandes rasgos los significados y diferencias entre los conceptos de Escenarios e Índices de Cambio Climático.

#### **I.1 Tiempo y Clima**

Los términos Tiempo (meteorológico) o Estado del Tiempo, se refieren al estado instantáneo de la atmósfera y los procesos relacionados con un intervalo de tiempo (cronológico) relativamente corto. Los procesos del Tiempo pueden ocurrir en lapsos desde minutos hasta algunos días.

Mientras que según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC, por sus siglas en inglés, el Clima se define como:



"El estado promedio del tiempo y, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años. El período de promediación habitual es de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial. Las magnitudes correspondientes son casi siempre variables de superficie (por ejemplo, temperatura, precipitación o viento). En un sentido más amplio, el clima es el estado del sistema climático en términos tanto clásicos como estadísticos."<sup>5</sup>

De acuerdo con lo anterior el clima hace referencia a condiciones observadas en plazos más largos, meses, años, décadas, es decir abarca una escala cronológica suficiente para hablar del comportamiento estadístico del estado del Tiempo. Con base en las definiciones anteriores cuando se refiere al Estado del Tiempo se habla de un día frío o caluroso, mientras que en términos del clima se considera un mes húmedo o seco. Entonces se tiene que el clima tiene implícita la información del estado del tiempo. Los cambios en el clima por lo tanto implican cambios en el Estado del Tiempo.

En lo que se refiere al pronóstico del tiempo actualmente sólo es posible hacer predicciones con buen nivel de confiabilidad hasta de unos cuantos días; sin embargo, la predicción del Tiempo ha avanzado en precisión conforme los recursos computacionales lo han hecho, así la Organización Meteorológica Mundial menciona que una predicción meteorológica actual para cinco días es tan confiable como una predicción meteorológica para dos días hace veinte años. Con relación a la predicción del clima el problema es más complejo aún pues los modelos que se utilizan tienen demasiadas incertidumbres por lo que sólo es posible realizar predicciones de las condiciones medias probables de ocurrir en plazos de meses o estaciones respecto a las condiciones normales. En intervalos de tiempo más grandes a los mencionados anteriormente no se pueden realizar pronósticos, si no escenarios hipotéticos del clima bajo ciertas condiciones en el futuro, estos analizan las implicaciones que tendrían los cambios en el clima en los sistemas naturales, sociales y económicos.

---

<sup>5</sup> IPCC,2007:Cambio Climático 2007:Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I,II y III al IV Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal :Pachauri, R.K. y Reisinger, A.(directores de la publicación)].IPCC, Ginebra Suiza,P.78

## I.2 Cambio Climático

El IPCC define al Cambio Climático como:

"Un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un periodo prolongado, generalmente cifrado en decenios o en periodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana."<sup>6</sup>

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) define al cambio climático como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada en periodos de tiempo comparables.

El IPCC considera el Cambio Climático como inequívoco, lo cual podría modificar diferentes aspectos de la vida en el planeta. Las variaciones en el sistema climático pueden ser producto de cambios en la dinámica interna del sistema o bien debido a forzamientos externos. La dinámica interna se refiere a la interacción entre los procesos de las diversas componentes del sistema climático (atmósfera, hidrósfera, etc.). Los forzamientos externos pueden ser de origen natural (variaciones en la actividad solar, o volcánica, etc.) o bien de origen humano (cambios en el uso de suelo, efecto invernadero, etc.).

La *detección del cambio climático* implica demostrar, generalmente en términos estadísticos, que el clima ha variado con algún nivel de significancia en un intervalo de tiempo determinado (Brunet et al., 2001; IDAG, 2005; IPCC, 2007). Se puede decir que se detectan cambios en el clima cuando en un registro de alguna variable o variables climáticas se detectan cambios estadísticamente diferentes a las características estadísticas del registro del pasado inmediato. Cuando se habla de detección de cambio climático se demuestra evidencia de las variaciones en el clima pero no se explican los orígenes de dicho cambio.

---

<sup>6</sup> IPCC, 2007: Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al IV Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra Suiza, P.30

En cambio cuando se trata de explicar y demostrar las causas del cambio climático se utiliza el concepto de *atribución de cambio climático*. El concepto anterior consiste en determinar el origen más probable de un cambio en el clima con un nivel de confianza dado de acuerdo al IPCC, la atribución del cambio climático a escala planetaria y de algunos continentes es clara; sin embargo cuando se reduce la escala (por ejemplo regional o local) la atribución se vuelve más compleja e inexacta. De acuerdo a lo anterior en la actualidad es prácticamente imposible conocer si la razón de que ocurra un fenómeno específico es causa o no del cambio climático. Por lo anterior sólo a escala global es atribuible el cambio climático.

### **I.3 Cambios en los Fenómenos Meteorológicos Extremos**

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) anunció a principios de esta década que una de las mayores consecuencias del cambio climático será el aumento en la frecuencia de los eventos extremos. En lo que se refiere al aumento en la frecuencia de lluvias extremas, esto significaría mayores riesgos de inundaciones en las ciudades por lo que se tendrán que tomar medidas de mitigación y adaptación en los sistemas de protección hidráulicos. El IPCC define a los Fenómenos Meteorológicos Extremos de la siguiente manera:

"Fenómeno meteorológico raro en un lugar y época del año determinados. Aunque hay diversas definiciones de "raro" la rareza de un fenómeno meteorológico extremo sería normalmente igual o superior a la de los percentiles 10 ó 90 de la función de densidad de probabilidad observada. Por definición, las características de un estado del tiempo extremo pueden variar en función del lugar en sentido absoluto. Un fenómeno meteorológico extremo no puede ser atribuible directamente a un cambio climático antropógeno, ya que hay siempre una probabilidad finita de que haya sobrevivido de manera natural. Cuando una pauta de actividad atmosférica extrema persiste durante cierto tiempo (por ejemplo durante una estación) puede clasificarse como episodio climático extremo, especialmente si arroja un promedio o un total que es en sí mismo un valor extremo (por ejemplo, sequías o precipitaciones intensas a lo largo de una temporada)."<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> IPCC,2007:Cambio Climático 2007:Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I,II y III al IV Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A.(directores de la publicación)].IPCC, Ginebra Suiza,P.81

No cabe duda que el aumento en la frecuencia de tales fenómenos traerá consecuencias de diversa índole en las actividades humanas. Sin embargo el impacto que tendrá el cambio en la frecuencia de la ocurrencia de estos fenómenos aún es desconocido a nivel regional y local en la mayor parte de México. Hablando específicamente del aumento en la frecuencia de las precipitaciones extremas se deberán realizar acciones conducentes a considerar en el diseño de los sistemas hidráulicos el aumento en la frecuencia de las mismas. Lo anterior podría significar que la probabilidad de que una estructura de protección hidráulica sea excedida por un determinado evento extremo sea mayor a la que se considero en el diseño original o bien que lo anterior sea tomado en cuenta para el diseño de nuevas estructuras hidráulicas.

Una de las conclusiones del IPCC respecto a éste tema es que algunos fenómenos meteorológicos extremos han cambiado de frecuencia y/o intensidad en los últimos cincuenta años, referente a los cambios en las precipitaciones intensas menciona que:

"Es probable que la frecuencia de las precipitaciones intensas (o la proporción de las precipitaciones intensas respecto de la precipitación total) haya aumentado en la mayoría de las áreas del planeta."

Sin embargo existen muchas incertidumbres en la hipótesis anterior sobre todo por la falta de registros climáticos suficientes y confiables en muchos países. El IPCC considera que existen demasiadas Incertidumbre Clave (entendiéndose como Incertidumbres Clave aquellas que, de reducirse podrían dar lugar a nuevas conclusiones solidas) para estar en condiciones de afirmar que los eventos extremos se han intensificado debido al cambio climático, entre las principales incertidumbres clave se mencionan las siguientes:

- La cobertura de datos climáticos sigue siendo limitada en algunas regiones, y existe un desequilibrio geográfico notable en los datos y estudios científicos sobre los cambios observados en los sistemas naturales y gestionados, siendo muy escasos los dedicados a países en desarrollo.
- Los cambios experimentados por los fenómenos extremos, como las sequías, los ciclones tropicales, las temperaturas extremas o la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, son

más difíciles de analizar y de monitorizar que los promedios climáticos, ya que requieren series temporales de datos más prolongadas y resoluciones espaciales y temporales más altas.

En nuestro país es común que aunque existan registros climáticos con intervalos de tiempo largos no contengan la suficiente información climática pues los registros no siempre son continuos. Esto representa un problema pues se debe recurrir a técnicas para completar datos faltantes y verificar además que las series cumplan con un control de calidad antes de utilizarse en algún análisis estadístico. La Guía Para el Cálculo y Uso de Índices de Cambio Climático en México menciona que:

"A diferencia de los extremos climáticos que ocurren en periodos de tiempo relativamente grandes como es el caso de las sequías, la mayoría de los eventos meteorológicos extremos ocurren en una escala de unos cuantos días y están asociados a sistemas atmosféricos en su mayoría regionales. La detección de cambios en los extremos meteorológicos desde el punto de vista climatológico requiere de observaciones en la escala temporal diaria."<sup>8</sup>

Los fenómenos meteorológicos extremos son ocasionados por una extensa combinación de factores que responden en mayor parte a condiciones atmosféricas regionales, en cambio para poder realizar una detección en la variación de los patrones de ocurrencia en los fenómenos extremos es necesario utilizar observaciones diarias para lo cual se considera de suma importancia contar con bases de datos con registros diarios suficientes y confiables de todas variables climatológicas.

#### **I.4. Escenarios de cambio climático**

Los modelos de circulación general de la atmosfera intentan predecir el comportamiento futuro en el clima de la tierra, de aquí surgen los escenarios de cambio climático los cuales son, a grandes rasgos, escenarios a gran escala donde se simulan proyecciones en el futuro

---

<sup>8</sup> Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México. Jorge Vázquez Aguirre. Instituto Nacional de Ecología 2010. Proyecto de Fortalecimiento de capacidades en detección de cambio climático en México.

sobre el cambio del clima y sus consecuencias en las actividades humanas considerando niveles de adaptación o mitigación en la sociedades. El IPCC define los escenarios de cambio climático de la siguiente manera:

"Descripción plausible y frecuentemente simplificada de un futuro verosímil, basada en un conjunto consistente y coherente de supuestos sobre las fuerzas originantes y sobre las relaciones más importantes. Los escenarios pueden estar basados en proyecciones, pero suelen basarse también en datos obtenidos de otras fuentes, acompañados en ocasiones de una descripción contextual."

La cobertura o escala de los escenarios de cambio climático son muy extensas y representan superficies a nivel mundial o continental. Como ejemplo de lo anterior se presenta la Figura 21, en donde se puede observar las proyecciones del promedio mundial de la superficie y el aumento del nivel del mar al final del siglo XXI.

Caso	Cambio de temperatura (°C en 2090-2099 respecto de 1980-1999) <sup>a, d)</sup>		Aumento del nivel del mar (m en 2090-2099 respecto de 1980-1999)
	Estimación óptima	Intervalo probable	Intervalo obtenido a partir de modelos, excluidos los cambios dinámicos rápidos futuros del flujo de hielo
Concentraciones constantes en los niveles del año 2000 <sup>a</sup>	0,6	0,3 – 0,9	No disponible
Escenario B1	1,8	1,1 – 2,9	0,18 – 0,38
Escenario A1T	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,45
Escenario B2	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,43
Escenario A1B	2,8	1,7 – 4,4	0,21 – 0,48
Escenario A2	3,4	2,0 – 5,4	0,23 – 0,51
Escenario A1FI	4,0	2,4 – 6,4	0,26 – 0,59

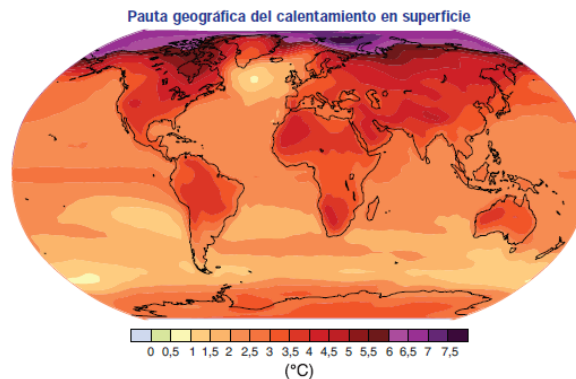


Fig. 21. Proyecciones del promedio mundial de la superficie y el aumento del nivel del mar a final del siglo XXI. Fuente IPCC, Calentamiento Global, Informe de Síntesis 2007.

El IPCC menciona que de continuar con las emisiones de gases de efecto invernadero a un ritmo igual o superior al actual el calentamiento global probablemente aumentaría. Los cambios a escala regional podrían ser los siguientes:

- Un calentamiento máximo sobre tierra firme y en la mayoría de las latitudes septentrionales altas y mínimo sobre el océano austral y partes del Atlántico Norte.
- La contracción de la superficie de las cubiertas de nieve, en la mayor profundidad del deshielo en la mayoría de las regiones de permafrost, y en la mayoría y en la menor extensión de los hielos marinos.
- Muy probablemente aumentará la frecuencia de los valores extremos cálidos, de las olas de calor y de las precipitaciones intensas.
- Probablemente aumentará la intensidad de los ciclones tropicales; menor confianza de que disminuya el número de ciclones tropicales en términos mundiales.
- Desplazamiento hacia los polos de las trayectorias de las tempestades extra tropicales, con los consiguientes cambios de las pautas de viento, precipitación y temperatura.
- Muy probablemente aumentarán las precipitaciones en latitudes altas, disminuirán en la mayoría de las latitudes terrestres subtropicales.

Algunos ejemplos de los impactos regionales para América Latina y América del Norte se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Impactos regionales del cambio climático en América Latina y América del Norte

<p><b>América Latina</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hasta mediados del siglo, los aumentos de la temperatura y las correspondientes disminuciones de la humedad del suelo originarían una sustitución gradual de los bosques tropicales por las sabanas en el este de la amazonia. La vegetación semiárida iría siendo sustituida por vegetación de tierras áridas.</li> <li>• Podrían experimentarse pérdidas de biodiversidad importantes con la extinción de especies en muchas áreas de la América Latina Tropical.</li> <li>• La productividad de algunos cultivos importantes disminuiría, y con ella la productividad pecuaria, con consecuencias adversas para la seguridad alimentaria. En las zonas templadas mejoraría el rendimiento de los cultivos de haba de soja. En conjunto, aumentaría el número de personas amenazadas por el hambre (grado de confianza medio).</li> <li>• Los cambios en las pautas de precipitación y la desaparición de los glaciares afectarían notablemente a la disponibilidad de agua para consumo humano, agrícola e hidroeléctrico.</li> </ul>
<p><b>América de Norte</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En las montañas occidentales, el calentamiento reduciría los bancos de nieve, acrecentaría las crecidas de invierno y reduciría la escorrentía estival, intensificando así la competición por unos recursos hídricos excesivamente solicitados.</li> <li>• En los primeros decenios del siglo, un cambio climático moderado mejoraría en conjunto el rendimiento de los cultivos pluviales entre un 5 % y un 20%, aunque estaría sujeto a una acentuada variabilidad según las regiones. La situación sería difícil para los cultivos ubicados cerca de las fronteras cálidas de su ámbito natural, o dependientes de unos recursos hídricos muy demandados.</li> <li>• En el transcurso del siglo, las ciudades que actualmente padecen olas de calor estarían expuestas a un aumento de éstas y de su intensidad y duración, que podría tener efectos adversos sobre la salud..</li> <li>• Las comunidades y hábitats costeros tendrían mayores dificultades, debido a la interacción de los efectos del cambio climático con el desarrollo y la polución.</li> </ul>

Fuente IPCC, Calentamiento Global, Informe de Síntesis 2007.

En lo que se refiere a los impactos la alteración de la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos, sumada al aumento en el nivel del mar causaría los mostrados en la tabla. La tabla 2 está basada en proyecciones de hasta mediados o finales del siglo XXI. Estas proyecciones no contemplan variaciones de la capacidad adaptativa de las sociedades.



Tabla 2. Impactos del cambio climático por la alteración de la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos de precipitaciones.

Fenómenos y dirección de la tendencia	Probabilidad de las tendencias futuras de las proyecciones para el siglo XXI basadas en escenarios IEEE	Ejemplos de Impactos de gran magnitud proyectados por sectores			
		Agricultura, silvicultura y ecosistemas	Recursos Hídricos	Salud Humana	Industria, asentamientos y sociedad
Episodios de precipitación intensa. Aumento de la frecuencia en la mayoría de las regiones	Muy Probable	Daños a los cultivos, erosión de los suelos, incapacidad para cultivar las tierras por anegamientos de los suelos.	Efectos adversos sobre la calidad del agua superficial y subterránea; contaminación de los suministros hídricos; posiblemente menor escasez de agua.	Mayor riesgo de defunciones, lesiones e infecciones y de enfermedades respiratorias y de la piel.	Alteración de los asentamientos, del comercio, del transporte y de las sociedades por efecto de las crecidas; <i>presiones sobre las infraestructuras urbanas y rurales</i> ; pérdida de bienes.
Aumento en la intensidad de los ciclones tropicales.	Probable	Daños a los cultivos; descuajamiento de árboles, daños a los arrecifes de coral.	Cortes de corriente eléctrica causantes de alteraciones del suministro hídrico público.	Mayor riesgo de defunciones, lesiones y enfermedades transmitidas por el agua y por los alimentos trastornos de estrés postraumático.	Alteraciones por efecto de las crecidas y vientos fuertes; denegación de cobertura de riesgos por las aseguradoras privadas en áreas vulnerables, posibles migraciones de la población, pérdida de bienes.

Fuente IPCC, Calentamiento Global, Informe de Síntesis 2007.

Para hacer frente a estos impactos, las sociedades deben implementar medidas de adaptación y/o mitigación, sin embargo, estas acciones aún no han sido suficientemente evaluadas por los gobiernos, respecto a esto el IPCC menciona que "La capacidad adaptativa está íntimamente relacionada con el desarrollo social y económico, aunque se halla desigualmente distribuida tanto en las sociedades como en el seno de éstas". En la

tabla 3 se presentan ejemplos de medidas de adaptación y/o mitigación planificada por sectores.

Tabla 3. Medidas de adaptación por sectores, frente al cambio climático por sectores

Sector	Opción/estrategia de adaptación	Marco de política básico	Limitaciones principales y oportunidad de implementación
<b>Agua</b>	Potenciación de la recogida de agua de lluvia. Técnicas de almacenamiento y conservación de agua, reutilización del agua; desalación; eficiencia de usos del agua y de la irrigación	Políticas nacionales sobre el agua y gestión integrada de los recursos hídricos; gestión de fenómenos peligrosos relacionados con el agua	Recursos financieros y humanos, y obstáculos físicos; gestión integrada de los recursos hídricos; sinergia con otros sectores.
<b>infraestructura/ asentamientos (incluidas zonas costeras)</b>	Reubicación; muros de contención marina y barreras contra mareas de tempestad; reforzamientos de dunas; adquisición de tierras y creación de marismas/humedales como retardadores del aumento del nivel del mar y de las inundaciones; protección de las barreras naturales existentes.	Normas y reglamentaciones que integren en el diseño las consideraciones sobre el cambio climático; políticas de uso de la tierra; ordenanzas de edificación; seguros.	Obstáculos financieros y tecnológicos; disponibilidad de espacio para reubicación; políticas y gestiones integradas; sinergias con metas de desarrollo sostenible.

Fuente IPCC, Calentamiento Global, Informe de Síntesis 2007.

Según el IPCC el cambio climático es un fenómeno inequívoco que producirá diversos impactos en el clima y en la alteración de la intensidad y frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos. Esto exigirá a las sociedades crear e implantar medidas de adaptación y/o mitigación para hacer frente a los impactos en la interrelación medio ambiente-sociedad. Además es necesario estudiar los efectos del calentamiento global a una escala tal que permita conocer las alteraciones a nivel local, para implantar las medidas de adaptación adecuadas a cada región en particular.

## **I.5 Índices de cambio climático**

Los índices de cambio climático permiten realizar el análisis del clima (eventos extremos de lluvia y temperatura) a escala regional tomando como base los registros de datos de observaciones instrumentales. A diferencia de los escenarios de cambio climático que proporcionan información de las posibles proyecciones para el futuro, el cálculo de los índices de cambio climático proporciona información del cambio climático observado a partir de registros instrumentales del clima. La característica principal de estos índices es que están formulados para que el cálculo se realice de la misma forma en cualquier parte del planeta, con la finalidad de poder hacer comparaciones e integrar los índices de las diferentes regiones del mundo.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) a través de su Comisión de Climatología (CCI), el proyecto sobre Predecibilidad y Variabilidad Climática (CLIVAR), así como la Comisión Técnica de Oceanografía y Meteorología Marítima (JCOMM) coordinan el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático, (ETCCDI por sus siglas en inglés).

El ETCCDI elaboró una lista de 40 índices de cambio climático de los cuales sólo 27 índices se consideran como básicos empleándose algunos con más frecuencia que otros. De acuerdo a los propósitos para los que se usen los índices se pueden modificar dependiendo del alcance y propósito de la investigación.

El análisis de las modificaciones o variaciones climáticas en escalas espaciales pequeñas requieren también mayor detalle en las observaciones pues deben describir el comportamiento climático en una región o localidad. El intervalo de observaciones debe ser diario y deben utilizarse muestras lo más continuas posibles evitando tener muchos datos faltantes, con la finalidad de conocer el comportamiento de la variable analizada a través del tiempo.

Es importante destacar que el comportamiento observado del clima en una localidad o región no necesariamente debe coincidir con el comportamiento esperado a nivel

mundial, por la razón de que los modelos de circulación general de la atmósfera trabajan con extensas escalas espaciales. Lo anterior subraya la importancia de analizar los registros climáticos locales y conocer el impacto que tendrá el calentamiento global en lugares específicos.

Una vez identificados los posibles cambios en la intensidad o frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos de una determinada región, se deben tomar medidas de mitigación o adaptación en los diferentes sectores de la sociedad. La implementación de medidas de adaptación como podría ser la modificación de patrones de diseño de obras hidráulicas o bien la modificación en las políticas de operación de presas de abastecimiento y generación hidroeléctrica, es una tarea donde deben intervenir distintos actores tanto de la sociedad civil como de los gobiernos.

Una vez definido el concepto de índice climático, se presenta en la tabla 4, los 27 índices climáticos elaborados por el ETCCDI para analizar los cambios en fenómenos meteorológicos extremos de temperatura y precipitación.

Tabla 4. Índices básicos de cambio climático desarrollados por el ETCCDI

n	Índice	Descripción
1	FD	Días con helada
2	SU	Días de verano
3	ID	Días con hielo
4	TR	Noches tropicales
5	GSL	Estación de crecimiento
6	TX <sub>x</sub>	Temperatura máxima extrema
7	TN <sub>x</sub>	Temperatura mínima más alta
8	TX <sub>n</sub>	Temperatura máxima más baja
9	TN <sub>n</sub>	Temperatura mínima extrema
10	TN10p	Noches frías
11	TX10p	Días frescos
12	TN90p	Noches cálidas
13	TX90p	Días calurosos
14	WSDI	Duración de los periodos cálidos
15	CSDI	Duración de los periodos fríos
16	DTR	Rango diurno de temperatura
17	RX1day	Precipitación máxima en un día
18	RX5day	Precipitación máxima en cinco días
19	SDII	Índice simple de intensidad diaria
20	R10mm	Días con lluvia mayor a 10 mm
21	R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm
22	Rnnmm	Días con lluvia mayor a nn.
23	CDD	Días secos consecutivos
24	CWD	Días húmedos consecutivos
25	R95pTOT	Días muy húmedos
26	R99pTOT	Días extremadamente húmedos
27	PRCPTOT	Precipitación total anual

A continuación se dan las definiciones formales de los 27 índices de cambio climático y la forma para calcular cada uno.

### 1. FD. Número de días con heladas (Frost Days).

Recuento anual de los días en que la temperatura mínima diaria,  $TN < 0^{\circ} C$ .

donde:  $TN_{ij}$  temperatura mínima diaria en el día  $i$  en el año  $j$ . Se contará el número de días cuando:

$$TN_{ij} < 0^{\circ} C.$$

**2. SU. Número de días de verano (SUMMER DAYS)**

Recuento anual de los días en que la temperatura máxima diaria,  $TX > 25^{\circ}C$ .

donde:  $TX_{ij}$  temperatura máxima diaria en el día  $i$  en el año  $j$ . Se contará el número de días cuando:

$$TX_{ij} > 25^{\circ}C$$

**3. ID. Número de días con hielo (ICING DAYS)**

Recuento anual de los días en que la temperatura máxima diaria,  $TX < 0^{\circ}C$ .

donde:  $TX_{ij}$  temperatura máxima diaria en el día  $i$  en el año  $j$ . Se contará el número de días cuando:

$$TX_{ij} < 0^{\circ}C$$

**4. TR. Número de noches tropicales (TROPICAL NIGHTS)**

Recuento anual de los días en que la temperatura mínima diaria,  $TN > 20^{\circ}C$ .

donde:  $TN_{ij}$  temperatura mínima diaria en el día  $i$  en el año  $j$ . Se contará el número de días cuando:

$$TN_{ij} > 20^{\circ}C$$

**5. GSL. Estación de Crecimiento (GROWING SEASON LENGTH)**

Recuento de la primera ocurrencia de por lo menos 6 días consecutivos con temperatura promedio:  $TG > 5^{\circ}C$ , y la primera ocurrencia después del primero de julio (1° enero en el hemisferio sur) de por lo menos 6 días consecutivos con  $TG < 5^{\circ}C$ .

donde:  $TG_{ij}$  temperatura media diaria en el día  $i$  en el año  $j$ . Se contará el número de días entre la primera ocurrencia de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$TG_{ij} > 5^{\circ}C$$

y la primera ocurrencia después del 1 de julio (1° enero en el hemisferio sur) de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$TG_{ij} < 5^{\circ}C$$

**6. TX<sub>x</sub>. Temperatura máxima extrema**

Es el valor mensual máximo de temperatura máxima diaria.

Sea  $TX_{ij}$  la temperatura máxima diaria en el mes  $K$  en el periodo  $j$ . La máxima temperatura máxima diaria cada mes es:

$$TX_{ij} = \text{Max} (TX_{kj})$$

**7. TN<sub>x</sub>. Temperatura máxima extrema**

Es el valor mensual máximo de temperatura mínima diaria.

Sea  $TN_{kj}$  la temperatura mínima diaria en el mes  $K$  en el periodo  $j$ . La temperatura máxima diaria mínima de cada mes es:

$$TN_{xkj} = \text{Max} (TN_{xkj})$$

**8. TX<sub>n</sub>. Temperatura máxima más baja**

Es el valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria.

Sea  $TX_{kj}$  la temperatura máxima diaria en el mes  $K$  en el periodo  $j$ . La mínima temperatura máxima diaria de cada mes es:

$$TXn_{kj} = \text{Min} (TX_{xkj})$$

**9. TN<sub>n</sub>. Temperatura mínima extrema**

Es el valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria.

Sea  $Tn_{kj}$  la temperatura mínima diaria en el mes  $K$  en el periodo  $j$ . La mínima temperatura mínima diaria de cada mes es:

$$TNn_{kj} = \text{Min} (Tn_{kj})$$

**10. Tn<sub>10p</sub>. Frecuencia de noches frías.**

Es el porcentaje de Porcentaje de días cuando  $TN <^{\text{percentil } 10}$

Sea  $TN_{ij}$  la temperatura mínima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$  y sea  $TN <^{\text{percentil } 10}$  el día calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5 días. El índice indica el porcentaje de tiempo donde:

$$TN_{ij} < T_n en 10$$

**11. Tn10p. Frecuencia de noches frías.**

Es el porcentaje de Porcentaje de días cuando  $TX <^{percentil 10}$

Sea  $TX_{ij}$  la temperatura mínima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$  y sea  $T_x <^{percentil 10}$  el día calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5 días. El índice indica el porcentaje de tiempo donde:

$$Tx_{ij} < T_x en 10$$

**12. Tn90p. Frecuencia de noches cálidas.**

Es el porcentaje de días cuando  $TN >^{percentil 90}$

Sea  $Tx_{ij}$  la temperatura mínima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$  y sea  $T_n en 90$  el día calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje de tiempo es determinado por:

$$Tn_{ij} > T_n en 90$$

**13. Tn90p. Frecuencia de noches cálidas.**

Es el porcentaje de días cuando  $TX >^{percentil 90}$

Sea  $Tx_{ij}$  la temperatura máxima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$  y sea  $T_x en 90$  el día calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje de tiempo es determinado por:

$$Tx_{ij} > T_x en 90$$

**14. WSDI. Duración de los periodos cálidos (Warm Spell Duration Index)**

Es el recuento anual de días con al menos 6 días consecutivos en que  $TX >^{percentil 90}$

Sea  $Tx_{ij}$  la temperatura máxima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$  y sea  $T_x en 90$  el día calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5 días. Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:



$$T_{xij} > T_{x, en90}$$

**15. SCDI. Duración de los periodos fríos (Cold Spells Duration Index)**

Es el recuento anual de días con al menos 6 días consecutivos en que  $T_n <^{percentil} 90$

Sea  $T_{nij}$  la temperatura mínima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$  y sea  $T_{x, en90}$  el día calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5 días. Entonces el número de días por periodo es sumado en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:

$$T_{nij} > T_{n, en90}$$

**16. DTR. Rango diurno de temperatura (Diurnal Temperature Range)**

Es la diferencia media mensual entre  $TX$  y  $TN$

Sea  $TX_{ij}$  y  $TN_{ij}$  las temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Si  $I$  representa el número de días en  $j$ , entonces:

$$DTR_j = \frac{\sum_1^I TN_{ij} - TX_{ij}}{I}$$

**17. RX1day. Precipitación máxima en un día**

Es el valor máximo mensual de precipitación en un día.

Sea  $RR_{ij}$  el total diario de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Entonces los valores máximos de 1- día para el periodo  $j$  son:

$$Rx1day_j = \max (RR_{ij})$$

**18. RX5day. Precipitación máxima en cinco días.**

Es el valor máximo mensual de 5 días consecutivos de precipitación.

Sea  $RR_{kj}$  la cantidad de precipitación para el intervalo de 5 días terminando en  $k$ , periodo  $j$ . Entonces los valores máximos de 5-días para el periodo  $j$  son:

$$Rx5day_j = \max (RR_{kj})$$

**19. SDII. Índice simple de intensidad diaria (Simple Daily Intensity Index)**

Sea  $RR_{wj}$  la cantidad diaria de precipitación en días húmedos,  $w$  ( $RR \geq 1$  mm) en el periodo  $j$ . Si  $W$  representa el número de días húmedos en  $j$ , entonces:

$$SDII_j = \frac{\sum_1^w RR_{wj}}{W}$$

**20. R10. Días con lluvia mayor a 10 mm.**

Sea  $RR_{kj}$  la cantidad diaria de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Se contará el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 10 \text{ mm}$$

**21. R20. Días con lluvia mayor a 20 mm.**

Sea  $RR_{kj}$  la cantidad diaria de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Se contará el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 20 \text{ mm}$$

**22. Rnn. Días con lluvia mayor a nmm.**

Sea  $RR_{kj}$  la cantidad diaria de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Si  $m$  representa el umbral definido por el usuario, cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq nmm$$

**23. CDD. Días secos consecutivos ( Consecutive Dry Days**

Sea  $RR_{kj}$  la cantidad diaria de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Se contará el número máximo de días consecutivos donde :

$$RR_{ij} < 1mm$$

**24. CWD. Días húmedos consecutivos ( Consecutive Wet Days)**

Sea  $RR_{kj}$  la cantidad diaria de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Se contará el más número máximo de días consecutivos donde :

$$RR_{ij} \geq 1mm$$

**25. R95pTOT. Días muy húmedos consecutivos**

Sea  $RR_{wj}$  la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo  $w$  ( $RR \geq 1.0 mm$ ) en el periodo  $j$  y sea  $RR_{wn}95$  el percentil 95 de precipitación en los días húmedos en el periodo de 1961-1990. Si  $W$  representa el número de días húmedos en el periodo entonces:

$$R95p_j = \sum_{w=1}^w RR_{wj} \text{ donde } RR_{wj} > RR_{wn}95$$

**26. R99pTOT. Días muy húmedos consecutivos**

Sea  $RR_{wj}$  la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo  $w$  ( $RR \geq 1.0 mm$ ) en el periodo  $j$  y sea  $RR_{wn}99$  el percentil 99 de precipitación en los días húmedos en el periodo de 1961-1990. Si  $W$  representa el número de días húmedos en el periodo entonces:

$$R99p_j = \sum_{w=1}^w RR_{wj} \text{ donde } RR_{wj} > RR_{wn}99$$

**27. PRCPTOT. Precipitación total.**

Sea  $RR_{ij}$  la cantidad diaria de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Si  $I$  representa el número de días en  $j$ , entonces:

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}$$

## I.6 Homogeneidad de registros climáticos

A partir de registros instrumentales del clima, por ejemplo datos de precipitación diaria, se determinan aspectos tan importantes para la vida humana como el de elegir el mejor sitio para colocar un fraccionamiento habitacional, determinar el tamaño de colectores de drenaje pluvial, la altura de una presa, o bien para determinar el periodo de retorno de una avenida. Por lo anterior la disponibilidad, calidad y continuidad de los datos climáticos en una localidad es fundamental para obtener resultados confiables en cualquier análisis que se realice a partir de datos climáticos.

Según el Instituto Nacional de Ecología<sup>9</sup> las condiciones que deben reunir las estaciones climatológicas para poder ser analizadas deben ser las siguientes:

- Las estaciones seleccionadas deben cubrir la mayor parte del área de interés.
- La distribución geográfica de las estaciones debe estar espacialmente equilibrada.
- Las estaciones seleccionadas deben contener el mayor número posible de años con datos completos.
- Se debe seleccionar un periodo de tiempo común en los registros climatológicos.

Los registros de observaciones instrumentales del clima obtenidos de las estaciones climatológicas deben además pasar pruebas de control de calidad para poder ser usados en cualquier análisis o modelación climática.

Cuando se realiza un estudio de las variaciones climáticas sobre registros de tiempo de alguna variable del clima se debe comprobar que la serie sea homogénea. Una serie es homogénea cuando las variaciones en la misma son causadas sólo por variaciones en el clima. Es decir la homogeneidad se refiere a cambios que son producidos por el propio sistema climático.

De acuerdo con lo anterior una serie es no homogénea cuando las variaciones son producidas por factores humanos. En este caso es necesario conocer cuáles de esos factores

---

<sup>9</sup> Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México. Jorge Vázquez Aguirre. Instituto Nacional de Ecología 2010. Proyecto de Fortalecimiento de capacidades en detección de cambio climático en México.

han influenciado las variaciones de los registros climáticos. Por ejemplo, las series de tiempo de una determinada estación climatológica pueden presentar no homogeneidades debido a: un cambio en el sitio de instalación, errores en las lecturas por parte del operador, deforestación, incremento en la urbanización cercana a la estación, etc.

Debido a la necesidad de conocer detalladamente no sólo los “datos” de las observaciones instrumentales del clima, sino de también conocer “los datos” asociados a los cambios por acciones humanas en los registros, ha surgido el concepto de “Metadato”. La palabra Metadato está construida con la adición del prefijo griego *meta* y del latín *datum* lo cual significa datos sobre los propios datos.

La idea de contar con metadatos es tener un registro completo de todas las variables que pueden tener influencia directa con la lectura y el registro de datos climáticos. De esta manera un metadato puede indicar dónde, cuándo y quién recolectó la información de las variables climáticas. Una serie de metadatos completa debe indicar todos los cambios que ha sufrido la misma en el tiempo, es decir describe la historia de la estación.

Los metadatos juegan un rol clave en la comprensión de la variabilidad climática, pues proporcionan la historia de la estación climatológica y dan confianza a los análisis y modelos realizados a partir de datos de la estación. Contar con la historia de la estación climatológica ayuda a asegurar que las variaciones climáticas son debidas a procesos propios de la atmósfera y no de las actividades humanas. Un metadato debe contener la suficiente información para contar la historia de la estación, a continuación se menciona a grandes rasgos la información que debe contener:

- Localización y nombre de identificación de la estación.
- Descripción del medio ambiente local y la exposición de los instrumentos.
- Tipos y características de los instrumentos instalados.
- Prácticas de observación.
- Procesamiento de los datos y unidades de medición.

- Información histórica del entorno de la estación; urbanización y cambios en el uso del suelo.

En México la base de datos oficial; CLICOM, contiene el registro histórico de todas las estaciones climatológicas de la CONAGUA. Esta base de datos, si bien contiene datos de la estación como son identificador, nombre, localización y estado de operación, no considera el registro de datos clave para distinguir si la variabilidad en un registro es debido a un cambio en el clima o bien un cambio debido a actividades humanas, como lo podría ser el cambio de algún instrumento o debido a las prácticas de observación de los mismos.

Debido a la importancia que tiene verificar la homogeneidad en cualquier modelo o análisis que intente verificar la variabilidad climática de una región, se juzga necesario empezar a desarrollar acciones tendientes a recolectar metadatos en todas las estaciones climatológicas del país, además de asegurar el registro continuo de las variables clima

## **CAPITULO II**

### **DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

La zona de estudio de este trabajo pertenece a la Cuenca del Valle de México específicamente a su zona conurbada. Se trabajó con registros de precipitación diaria medida con pluviómetro en las 16 delegaciones del Distrito Federal y 20 municipios del Estado de México.

De acuerdo a la disponibilidad, calidad y continuidad de la información climatológica con la que contaban las entidades, se eligieron los municipios y delegaciones para el análisis. Otro factor de decisión sobre las entidades a estudiar fue su pertenencia a la Zona Metropolitana del Valle de México y su nivel de urbanización.

## **II.I Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)**

El INEGI define Zona Metropolitana como el conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando como parte de su misma área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica, en esta definición se incluye además a aquellos municipios que por sus características particulares son relevantes para la planeación y políticas urbanas. Adicionalmente, se definen como zonas metropolitanas todos aquellos municipios que contienen una ciudad de más de un millón de habitantes.

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se ubica dentro del Valle del México y cuenta con una superficie de 3,540 km<sup>2</sup> lo que representa el 37% de la cuenca del Valle de México. De este total, 1,500 km<sup>2</sup> están completamente urbanizados.

La ZMVM tiene una altitud promedio es de 2,240 metros sobre el nivel del mar. La orografía de La Cuenca del Valle de México, donde se ubica la ZMVM, es accidentada; en el norte se localiza la Sierra de Guadalupe y el Cerro del Chiquihuite; en el centro se ubica el Cerro de la Estrella; hacia el oriente se encuentra el Cerro de San Nicolás y la Sierra volcánica de Santa Catarina; al sur y suroeste el terreno se eleva más de 3,600 metros de altitud en la Sierra del Ajusco, que aparta a la ZMVM del Valle de Cuernavaca; mientras que al poniente, la Sierra de las Cruces la separa del Valle de Toluca. Las principales elevaciones topográficas son los volcanes Popocatepetl (5,465 m.s.n.m) e Iztaccíhuatl (5,230 m.s.n.m).

En lo que se refiere al clima, debido a la extensión de la cuenca se presentan diferentes tipos de climas simultáneamente. Debido a que se ubica en una zona intertropical recibe una fuerte insolación durante todo el año, por lo cual la temperatura ambiente en general es de media a alta dependiendo de la altitud y el relieve; al noreste el clima es



semiseco mientras en el centro es templado subhúmedo y en las regiones elevadas el clima es semifrío subhúmedo.

Desde hace veinte años las condiciones meteorológicas y climáticas del Valle de México se han venido modificando, lo cual ha provocado que no se distingan los cambios estacionales, aunque se puede reconocer la temporada húmeda y seca. La temperatura media anual oscila entre 12°C y 18 °C, mientras que la temporada de lluvias en la cuenca abarca generalmente los meses de mayo a octubre. En los demás meses sólo se registran lluvias aisladas. La precipitación media anual fluctúa entre los 385 y 1,400 mm. Las lluvias son intensas, concentradas y de corta duración. Durante la temporada de lluvia se precipitan entre 80 y 90% de lluvia del año, es decir aproximadamente 6,723 millones de m<sup>3</sup> en el área de la cuenca.

La ZMVM se asienta en tres regiones hidrológicas: RH26 Río Panuco, que es la principal y ocupa la mayor superficie territorial; RH18 Río Balsas que se ubica en la zona sur; y la región RH12 Río Lerma Santiago que se ubica en el suroeste.

Territorialmente la ZMVM comprende el Distrito Federal con sus 16 delegaciones y 28 municipios del Estado de México, colinda al norte con el Estado de Hidalgo, al oriente con los estados de Puebla y Tlaxcala, al sur con el Estado de Morelos y al occidente con la cuenca del río Panuco. La ZMVM abarca un área de 3,540 km<sup>2</sup>, de los cuales el 30 % corresponden al Distrito Federal y el restante 70 % al Estado de México. La zona rural de la ZMVM cuenta con una variada vegetación entre la que destacan los bosques de encino, de encino-pino, oyamel, matorrales xerófilos y pastizales.

En lo referente a población la ZMVM es la tercera metrópoli más poblada del mundo, después de Tokio y New York, y la más grande de América Latina al contar con más de 20 millones de habitantes en 2010, 18% de la población nacional. En la Tabla 5 se presentan los municipios y delegaciones que conforman la zona de estudio.

Tabla 5. Delegaciones y Municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de México

<b>Delegaciones del Distrito Federal</b>	<b>Municipios del Estado de México</b>	
Álvaro Obregón	Atizapán de Zaragoza	Nextlalpan
Azcapotzalco	Atenco	Netzahualcóyotl
Benito Juárez	Acolman	Nicolás Romero
Coyoacán	Coacalco	Tecámac
Cuajimalpa	Cuautitlán	Teoloyucan
Cuauhtémoc	Cuautitlán Izcalli	Tepoztlán
Gustavo A. Madero	Chalco	Texcoco
Iztacalco	Chicoloapan	Tlalnepantla
Iztapalapa	Chimalhuacán	Tultepec
Magdalena Contreras	Ecatepec	Tultitlán
Miguel Hidalgo	Huixquilucan	Valle de Chalco
Milpa Alta	Ixtapaluca	Zumpango
Tlalpan	Jaltenco	
Tlahuac	La Paz	
Venustiano Carranza	Melchor Ocampo	
Xochimilco	Naucalpan	

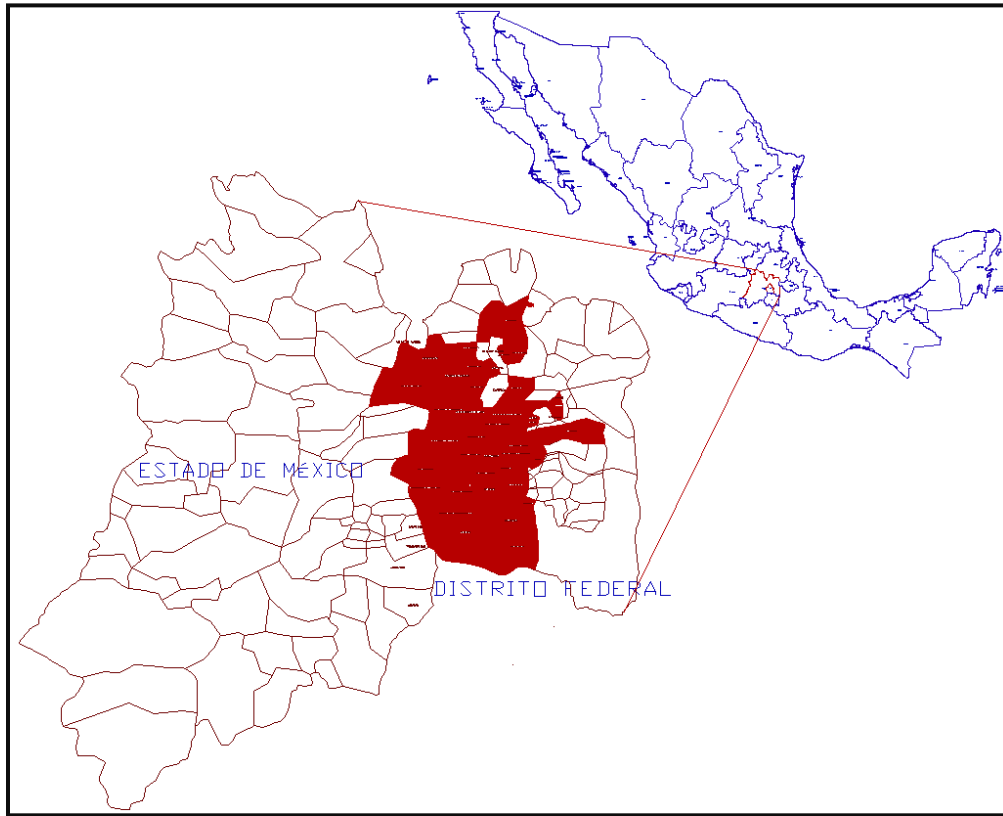


Figura 22. Ubicación de la Zona Metropolitana del Valle de México

## II.2 Municipios y Delegaciones en estudio

Después del análisis cualitativo y cuantitativo de la información climatológica existente, particularmente la referente a registros de precipitación, se eligió trabajar con las 16 delegaciones del Distrito Federal y con 20 municipios conurbados pertenecientes a la ZMVM. En la Tabla 6 se enumeran los municipios y delegaciones analizados en este estudio.

Tabla 6. Municipios y Delegaciones dentro de la zona de estudio

Delegaciones del Distrito Federal	Municipios del Estado de México	
Álvaro Obregón	Atizapán de Zaragoza	Tlalnepantla
Azcapotzalco	Atenco	Tultepec
Benito Juárez	Cuautitlán Izcalli	Tultitlán
Coyoacán	Chalco	Zumpango
Cuajimalpa	Chimalhuacán	
Cuauhtémoc	Ecatepec	
Gustavo A. Madero	Huixquilucan	
Iztacalco	Ixtapaluca	
Iztapalapa	La Paz	
Magdalena Contreras	Naucalpan	
Miguel Hidalgo	Nextlalpan	
Milpa Alta	Nicolás Romero	
Tlalpan	Tecámac	
Tlahuac	Teoloyucan	
Venustiano Carranza	Tepoztlán	
Xochimilco	Texcoco	

La Figura 23 muestra la delimitación de la zona de estudio, en esta se puede observar la ubicación de cada una de las entidades de donde se analizaron los registros de precipitación. La Figura 24 es una fotografía satelital obtenida a partir de la plataforma de Google Earth, en esta imagen se puede observar el alto grado de urbanización presente en el norte del Distrito Federal y los municipios conurbados del Estado de México.

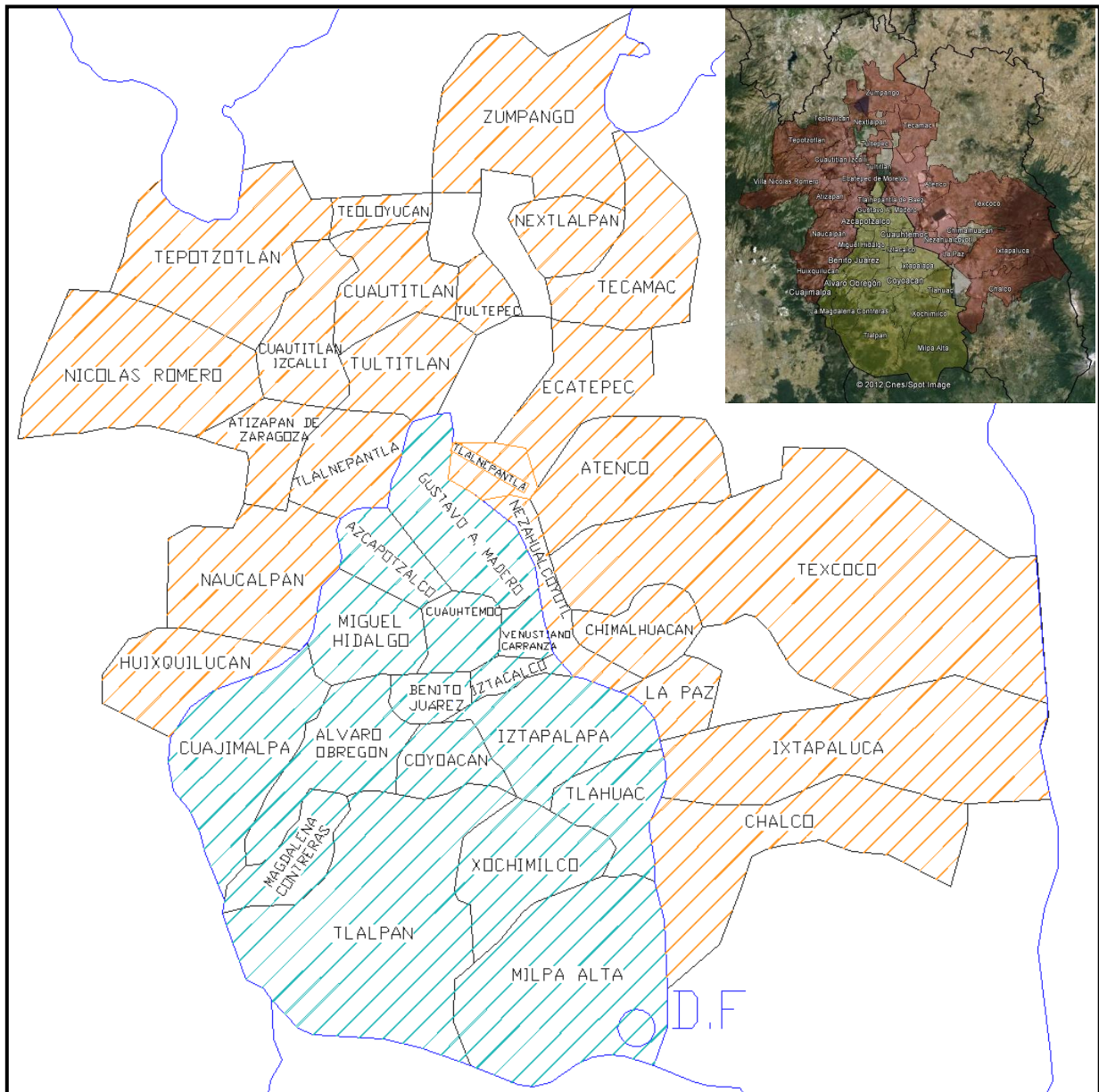


Figura 23. Municipios y Delegaciones dentro de la Zona de Estudio. Elaboración propia

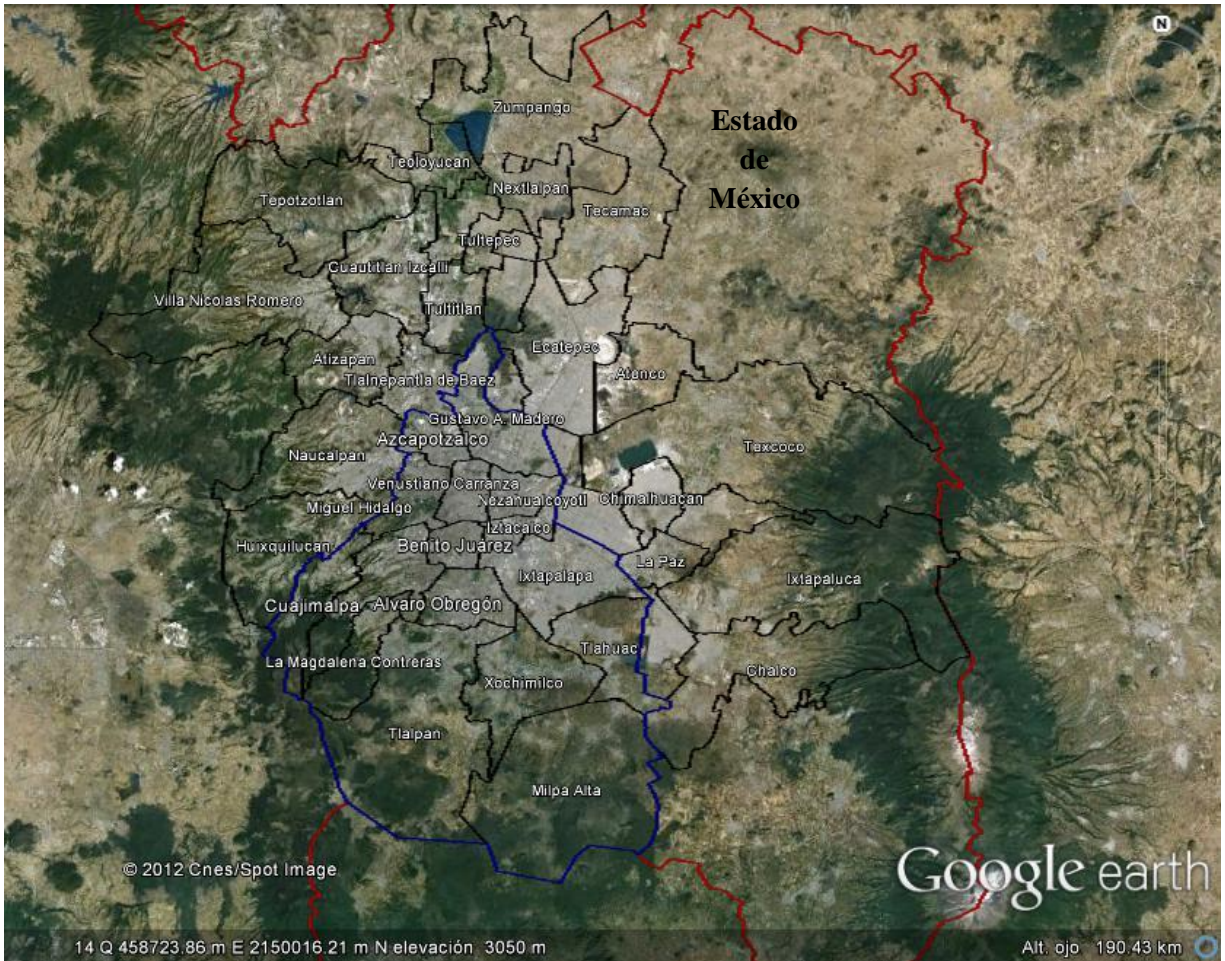


Figura 24. Imagen satelital de la zona en estudio. Fuente: Google earth

En la Tabla 7 se presentan las características de urbanización y población de cada una de las entidades en estudio. De esta se puede observar que los municipios del norte del Distrito Federal y los municipios conurbados a los mismos son los que presentan mayores índices de urbanización, lo cual podría ser un factor modificante del clima local en estas zonas.

Tabla 7. Características de urbanización y población de las entidades en estudio

Entidad	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud msnm	Población 2010	Superficie urbanizada 2010	Superficie Total por entidad	% Superficie Urbanizada
DF	Álvaro Obregón	19°24'00"	099°12'00"	2320	719,808.00	6,973.80	9,562.10	73%
DF	Azcapotzalco	19°28'58"	099°11'00"	2240	418,413.00	3,335.20	3,335.20	100%
DF	Benito Juárez	19°24'06"	099°09'30"	2242	361,966.00	2,654.80	2,654.80	100%
DF	Coyoacán	19°21'00"	099°09'42"	2243	623,672.00	5,366.60	5,366.60	100%
DF	Cuajimalpa de Morelos	19°22'28"	099°17'05"	2620	187,771.00	3,676.32	7,082.00	52%
DF	Cuauhtémoc	19°26'35"	099°08'40"	2230	531,004.00	3,249.20	3,249.20	100%
DF	Gustavo A. Madero	19°28'56"	099°06'45"	2240	1,168,120.00	8,586.90	8,737.00	98%
DF	Iztacalco	19°23'43"	099°05'52"	2235	386,399.00	2,305.60	2,305.60	100%
DF	Iztapalapa	19°21'30"	099°05'35"	2247	1,856,515.00	11,292.00	11,292.00	100%
DF	La Magdalena Contreras	19°20'00"	099°12'50"	2350	234,220.00	1,868.20	6,400.00	29%
DF	Miguel Hidalgo	19°24'24"	099°11'28"	2265	357,733.00	4,607.50	4,612.00	100%
DF	Milpa Alta	19°11'32"	099°01'23"	2410	119,613.00	3,867.38	29,700.00	13%
DF	Tláhuac	19°18'15"	099°03'15"	2250	371,990.00	4,029.87	8,530.00	47%
DF	Tlalpan	19°18'30"	099°13'30"	2410	614,201.00	8,750.72	30,880.00	28%
DF	Venustiano Carranza	19°25'00"	099°06'50"	2265	438,504.00	3,360.60	3,360.00	100%
DF	Xochimilco	19°16'30"	099°08'20"	2260	419,397.00	6,274.50	11,760.00	53%
EDO MEX	Atenco	19°33'30"	098°54'45"	2240	46,507.00	1,725.66	8,412.00	21%
EDO MEX	Atizapán de Zaragoza	19°33'40"	099°14'49"	2280	477,797.00	7,792.10	9,060.00	86%
EDO MEX	Chalco	19°15'53"	098°53'51"	2240	279,270.00	5,490.43	21,780.00	25%
EDO MEX	Chimalhuacán	19°26'15"	098°57'15"	2400	551,674.00	3,539.80	4,333.00	82%
EDO MEX	Cuautitlán	19°38'46"	099°12'41"	2260	527,898.00	7,908.92	10,893.00	73%
EDO MEX	Ecatepec de Morelos	19°36'35"	099°03'36"	2250	1,733,971.00	11,890.90	15,850.00	75%
EDO MEX	Huixquilucan	19°21'40"	099°21'03"	2680	224,679.00	4,251.67	13,970.00	30%
EDO MEX	Ixtapaluca	19°19'07"	098°52'56"	2260	521,984.00	8,161.12	32,570.00	25%
EDO MEX	La Paz	19°21'38"	098°58'48"	2330	248,484.00	2,407.50	3,650.00	66%
EDO MEX	Naucalpan	19°28'31"	099°14'16"	2400	783,970.00	7,730.62	15,620.00	49%
EDO MEX	Nextlalpan	19°44'25"	099°04'21"	2250	20,702.00	850.81	5,420.00	16%
EDO MEX	Villa Nicolás Romero	19°37'30"	099°18'51"	2400	322,671.00	5,716.11	23333.00	24%
EDO MEX	Tecámac	19°42'47"	098°58'06"	2250	340,028.00	6,745.79	15,600.00	43%

Tabla 7. Continuación. Características de población e urbanización de las entidades en estudio

Entidad	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud msnm	Población 2010	Superficie urbanizada 2010	Superficie Tota por entidad	% Superficie Urbanizada
EDO MEX	Teoloyucan	19°44'39"	099°10'52"	2250	75,730.00	1,859.96	5,325.00	35%
EDO MEX	Tepoztlán	19°42'58"	099°13'25"	2300	65,978.00	2,504.14	18,700.00	13%
EDO MEX	Texcoco	19°30'20"	098°52'55"	2250	203,327.00	7,212.02	43,168.00	17%
EDO MEX	Tlalnepantla	19°32'12"	099°11'41"	2250	660,931.00	6,921.81	7,671.00	90%
EDO MEX	Tultepec	19°41'06"	099°07'41"	2250	117,101.00	2,058.16	2,600.00	79%
EDO MEX	Tultitlán	19°38'42"	099°10'10"	2250	510,650.00	5,666.10	6890.00	82%
EDO MEX	Zumpango	19°47'49"	099°05'57"	2250	136,433.00	3,782.97	22,267.00	17%



## **CAPITULO III**

### **REGISTROS DE PRECIPITACIÓN**

En este capítulo se presentan los registros de precipitación utilizados en este trabajo. Debido a la importancia de contar con la suficiente información de calidad se eligió un periodo común en todos los registros y posteriormente se estimaron los datos diarios faltantes en cada registro por medio de la técnica de interpolación inversa. De esta manera se obtuvo un periodo común de precipitación diaria en un intervalo de 46 años (1965-2010), en 58 estaciones climatológicas pertenecientes a 36 entidades dentro de la ZMVM; 16 delegaciones del Distrito Federal y 20 municipios del Estado de México.

### **III.1 Selección de estaciones climatológicas y periodo común de registros de Precipitación.**

El requisito fundamental para realizar el cálculo de los Índices de Cambio Climático es contar con registros suficientes y de calidad de la variable climática a analizar. Aunado a lo anterior también se debe contar con un periodo de tiempo común en los registros dentro del área de estudio, dado que se requiere realizar un análisis espacio-temporal. Como se mencionó anteriormente, el registro disponible tendrá una longitud de 46 años, que es menor a la longitud de 60 años requerida para realizar estudios de variabilidad climática, sin embargo, con las debidas reservas de los resultados obtenidos se procederá a continuar con este estudio.

Para el desarrollo de este trabajo se consultó el CLICOM 2010, la Base de Datos oficial del clima a cargo de la CONAGUA, de la cual se obtuvieron en una primera etapa los registros de precipitación de toda la ZMVM. Posteriormente se realizó un análisis sobre la cantidad y calidad de la información disponible en cada una de las estaciones climatológicas consultadas. Del análisis de la información se encontraron estaciones con registros muy amplios pero con demasiados huecos de información o bien con registros cortos y continuos.

Para encontrar el periodo de tiempo común se llevó a cabo un análisis regional en el que se compararon los registros de precipitación cada 24 horas de todas las estaciones en estudio. Con la finalidad de contar con datos confiables producto de la interpolación se eligieron solo las estaciones con registros que contuvieran suficiente información o bien que existiera información común en otras estaciones cercanas para el transporte de la misma. De esta manera se eligió el intervalo de 1965-2010, como periodo común del cual se tiene la suficiente información en el área de estudio para estimar los registros faltantes. En la Tabla 8 se muestran las estaciones que se eligieron para la estimación de registros faltantes a escala diaria así como la localidad a la que pertenecen.

Tabla 8. Estaciones climatológicas consideradas en el estudio

Delegación/ Municipio	Clave	Nombre	Coordenadas UTM		Grados sexagesimales					
					N			O		
			X(Norte)	Y( Este)	(°)	(´)	(´´)	(°)	(´)	(´´)
Álvaro Obregón	9039	Presa Tacubaya	2144793.9	477687.96	19	23	49.97	99	12	45.03
	9046	Santa Fe	2143259.88	475498.42	19	22	59.97	99	14	0.01
	9038	Presa Mixcoac	2141420.73	471995.33	19	21	59.98	99	16	0.01
Azcapotzalco	9003	Aquiles Sedan 46	2152782.79	480059.24	19	28	9.97	99	11	24.01
	9021	Egipto 21	2153397.09	480468.05	19	28	30.00	99	11	10.00
Benito Juárez	9011	Colonia del valle	2144850.09	482500.43	19	23	52.00	99	10	0.00
	9040	San Borja 726	2143251.77	482498.89	19	22	60.00	99	10	0.00
	9054	General Anaya	2141407.56	482497.11	19	2	0.00	99	10	0.00
Coyoacán	9070	Campo Exp. Coyoacán	2139717.61	481912	19	21	4.98	99	10	20.00
	9071	Colonia Educación	2137777.5	486111.61	19	20	1.98	99	7	56.02
Cuajimalpa	9016	Cuajimalpa	2139582.25	468491.52	19	20	59.99	99	18	0.02
Cauhtémoc	9015	Ródano 14 CFE	2147863.03	481774.32	19	25	30.00	99	10	25.01
	9033	Colonia Guerrero	2150625.6	486004.83	19	26	59.98	99	8	0.03
Gustavo A. Madero	9029	Gran canal 06+250	2153573.48	490409.05	19	28	35.98	99	5	29.00
	9043	San Juan de Aragón	2152312.63	491691.15	19	27	54.98	99	4	45.01
Iztacalco	9036	Playa caleta 454 Colonia Marte	2144567.91	489733.44	19	23	42.97	99	5	52.02
Iztapalapa	9026	Morelos 77	2141401.23	491248.56	19	21	59.99	99	5	0.02
Magdalena Contreras	9037	Presa Anzaldo	2137724.96	477241.61	19	19	59.97	99	13	0.02
Miguel Hidalgo	9010	Colonia América	2146483.07	478827.42	19	24	45.00	99	12	6.01
	9012	Colonia Escandón	2145250.77	481392.54	19	24	4.97	99	10	38.02
Milpa Alta	9032	Milpa Alta	2121912.37	497692.99	19	11	25.99	99	1	19.03
	9058	Vertedor Milpa Alta	2121113.17	498247.77	19	11	0.00	99	0	60.00
	9045	Santa Ana Tlacotengo	2120621.31	499707.95	19	10	43.99	99	0	10.03
Venustiano Carranza	9013	Colonia Moctezuma	2148164.61	488918.98	19	25	39.98	99	6	20.03
	9007	Cinzel 42	2146935.89	487751.73	19	24	59.97	99	7	0.02
Tlahuac	9051	Tlahuac	2129903.65	499620.53	19	15	45.98	99	0	13.02
Tlalpan	9004	Calvario 61	2123302.06	484319.35	19	12	11.00	99	8	57.01
	9022	El Guarda	2115712.55	481800.58	19	8	3.98	99	10	23.02

Tabla 8. Continuación.

Delegación/ Municipio	Clave	Nombre	Coordenadas UTM		Grados sexagesimales					
					N			O		
			X(Norte)	Y( Este)	(°)	(')	(")	(°)	(')	(")
Xochimilco	9041	San Francisco Tlalnepantla	2122593.41	486479.67	19	11	48.00	99	7	43.00
Atenco	15044	La Grande	2164577.15	509031.54	19	34	34.00	98	54	50.00
	15008	Atenco	2161011.67	509149.89	19	32	38.00	98	54	46.00
Atizapán	15075	Presa las Ruinas	2165151.91	470808.55	19	34	52.00	99	16	42.00
Chalco	15020	Chalco	2129415.15	510946.51	19	15	30.00	98	53	45.02
Cuautitlán	15098	San Martín Obispo	2169627.25	479786.67	19	37	18.00	99	11	34.00
Ecatepec	15040	Gran canal	2168295.22	493708.36	19	36	34.99	99	3	36.01
	15041	Gran Canal 27	2162976.65	497960.44	19	33	41.98	99	1	10.02
Chimalhuacán	15145	Plan Lago de Texcoco	2150683.07	507172.5	19	27	2.00	98	55	54.00
Huixquilucan	15033	Huixquilucan	2140821.78	463155.03	19	21	39.97	99	21	3.00
Ixtapaluca	15017	Cuatepec	2143404.21	516159.22	19	23	4.99	98	50	46.01
	15018	Manuel Ávila Camacho	2136805.33	524656.18	19	19	29.99	98	45	55.01
La Paz	15050	Los Reyes	2140415.56	500875.19	19	21	27.98	98	59	30.01
Naucalpan	15027	El Salitre	2156180.36	468520.43	19	30	0.00	99	17	60.00
	15059	El Molino Blanco	2153678.04	476824.37	19	28	39.00	99	13	15.00
	15127	Totolica San Bartolo	2152359.85	474227.97	19	27	56.00	99	14	44.00
	15077	Presa Totolica	2150952.08	470231.53	19	27	10.00	99	17	1.00
Nextlalpan	15099	San Mateo Acuitlapilco	2185292.72	495402.17	19	45	47.98	99	2	38.01
Teoloyucan	15115	Santo Tomas	2186561	482512.01	19	46	29.00	99	10	1.00
Tecámac	15022	Chiconautla	2173488.86	498194.59	19	39	23.97	99	1	2.02
	15090	San Jerónimo Xonocahuacan	2183909.7	505296.65	19	45	2.98	98	56	58.02
Texcoco	15170	Chapingo DGE	2154466.25	511922.51	19	29	5.00	98	53	11.00
	15167	El Tejocote 1	2149885.37	510205.23	19	26	36.00	98	54	10.00
Tepoztlán	15074	Presa la Concepción	2177758.63	468383.64	99	41	42.00	99	18	6.00
	15081	Represa el Alemán	2178790.48	477031.49	19	42	16.00	99	13	9.00
Tlalnepantla	15137	Amealco	2158154.53	488371.37	19	31	4.98	99	6	39.01
	15092	San Juan Ixhuatepec	2158554.36	487992.76	19	31	17.99	99	6	52.03
Tultepec	15129	Tultepec	2176536.75	486723.77	19	41	3.00	99	7	36.00
Villa Nicolás Romero	15019	Vicente Guerrero	2166765.12	462800.17	19	35	44.00	99	21	17.00
Tultitlan	15073	Presa Guadalupe	2169824.73	470408.4	19	37	24.00	99	16	56.00
Zumpango	15042	Gran Canal	2189352.65	489526.33	19	47	59.98	99	6	0.01

En la Figura 25 se puede observar la distribución espacial de las estaciones climatológicas incluidas en la Tabla 8. El total de estaciones con registros de precipitación diaria es de 58 y el número de entidades en estudio es de 36, todas pertenecientes a la ZMVM; 16 delegaciones del Distrito Federal y 20 municipios del Estado de México. El periodo común de tiempo para los registros de precipitación es de 46 años (1965-2010). Se hace notar que el principal problema de esta base de datos es la falta de continuidad y de datos diarios en la mayoría de los registros.

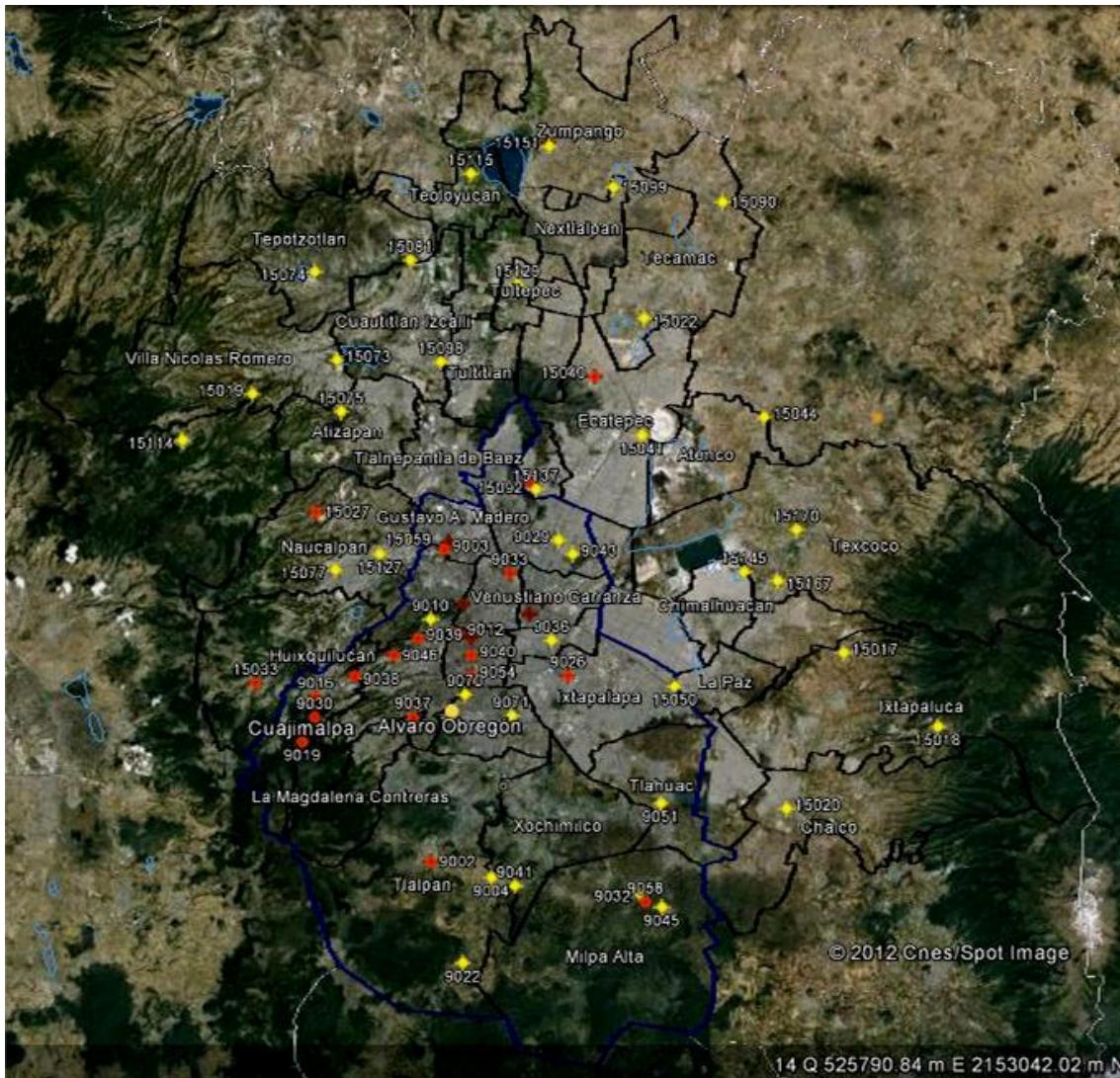


Figura 25. Distribución espacial de las estaciones climatológicas dentro de este estudio. En color amarillo se señalan las estaciones en operación, en color rojo las estaciones suspendidas. Fuente: Google earth y CONAGUA 2012.

### III.2 Análisis y control de calidad de los registros de precipitación

Con la finalidad de asegurar que los registros de precipitación solo contengan valores pertenecientes al patrón climático del lugar en estudio, se lleva a cabo el análisis y control de calidad de los registros de precipitación. El objetivo de realizar el control de calidad es detectar y eliminar valores que han sido introducidos por error en los registros, como pueden ser aquellos que excedan o disminuyan de manera abrupta el rango de variación de la variable precipitación.

Al problema de contar con valores extraños en los registros se le suma la falta de continuidad en la toma de datos instrumentales del clima. Para resolver la falta de información se realiza comúnmente la estimación de datos faltantes con alguna técnica de interpolación, lo cual recalca la importancia de realizar un adecuado control de calidad en los registros existentes para no extrapolar errores en la estimación de datos faltantes en otras estaciones climatológicas.

Las principales inconsistencias que se presentan en una serie de datos suelen ser por errores humanos (durante la toma y digitación de datos), errores sistemáticos por la mala calibración o por reemplazo de los instrumentos de medición. También se presentan errores cuando cambia la ubicación de la estación y no se registra dicha modificación, por el cambio de personal que realiza las observaciones, entre otras.

Existen distintas técnicas para el control de calidad de información, desde las más simples hasta las más robustas. A continuación se presentan las técnicas utilizadas en este trabajo para el control de calidad de la información:

- i. *Verificación de errores lógicos.* Se constató que no existieran valores de precipitación menores a cero.
- ii. *Validación de valores extremos.* Consulta de fuentes de información alternas para verificar que los valores extremos son ocasionados por algún fenómeno meteorológico extremo como frentes fríos, ciclones tropicales, etc.

- iii. *Comparación con fechas adyacentes.* Comparación de datos poco comunes de una fecha en particular con observaciones adyacentes.
- iv. *Comparación con estaciones vecinas.* Puntos extraños de los incisos ii y iii se compararon con registros de estaciones vecinas en las mismas fechas.

Estas pruebas de análisis y control de calidad se aplicaron a los registros diarios de lluvia de las 58 estaciones en estudio obtenidas del CLICOM 2010 y posteriormente se estimaron los datos diarios faltantes en el registro común de la zona de estudio.

### III.3 Interpolación de lluvias

Para la estimación de datos faltantes a partir de otros datos existen diversas técnicas de interpolación. Para este trabajo fue necesario estimar datos diarios faltantes para completar los registros en el periodo común elegido en la zona de estudio. A continuación se presenta la descripción general del proceso de interpolación así como la técnica de la interpolación inversa utilizada en este estudio.

#### *Forma general de la Condición de Linealidad.*

Sean  $X_j$  y  $Y_j$  las coordenadas  $j$  en un espacio bidimensional y  $P_j$  una función de las coordenadas  $X_j$  y  $Y_j$  la que depende del proceso observado en  $n$  estaciones de medición,  $j$  es el subíndice que indica el sitio al cual se refiere el proceso medido,  $j=1,2,\dots,n$ .  $P_e$  es una estimación del proceso en un punto con coordenadas  $X_e, Y_e$ .

La estimación puntual se hace de los datos medidos en las  $n$  estaciones y esta puede ser representada por una combinación lineal pesada de aquellos valores, es decir:

$$P_e = \sum_{d=1}^n W_d P_d \dots\dots\dots(1)$$

Donde :

$W_j$  factor de peso del punto de muestra  $j$ .

La ecuación anterior es una forma general de la función de interpolación llamada condición de linealidad. La condición de riesgo nulo implica que  $E = (P_e) = E(P)$ . El factor de peso se empleará para las diferentes técnicas de interpolación, siendo la única diferencia la forma de evaluación de los valores  $W_j$ .

*Técnica de la Interpolación Inversa*

Esta técnica es un esquema que pertenece a una familia de métodos de distribuciones pesadas. La influencia de la lluvia en una estación para el cálculo de la misma en cualquier otro punto es inversamente proporcional a la distancia entre los dos puntos. El método da mayor peso a la estación más cercana y se reduce conforme la distancia es mayor, dependiendo del exponente  $\beta$ . Los pesos de la función de interpolación son solamente una función de la distancia entre el punto de interés  $(X_e, Y_e)$  y los puntos de medición  $(X_j, Y_j)$  para  $j=1,2...n$ . Considerando la distancia  $d_{ej}$ , el peso correspondiente al punto  $(X_j, Y_j)$  está dado en general por:

$$W_j = \frac{F(d_{ej})}{\sum_{i=1}^n (F d_{ei})} \dots\dots\dots(2)$$

Donde  $F(d_{ej})$ : representa una función dada de la distancia  $d_{ej}$ . Una función comúnmente usada de la función  $F(*)$  es:

$$F(d_{ej}) = \left[ \frac{1}{d_{ej}} \right]^\beta \dots\dots\dots(3)$$

Donde  $\beta$  :es una constante apropiada, de acuerdo a lo anterior sustituyendo la función  $F(*)$  en la ecuación de peso se tiene:



$$W_j = \frac{\left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^\beta}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^\beta} \dots\dots\dots(4)$$

Es importante hacer notar que el factor de peso  $W_j$  tiende a cero cuando hay incremento en la distancia  $d_{ej}$  y/o el parámetro  $\beta$ . Así mismo cuando la potencia  $\beta$  toma valores de 1 ó 2 la técnica es llamada *Interpolación del Cuadrado de la Distancia* respectivamente.

#### III.4 Estimación diaria de datos de lluvia faltantes

Como se mencionó anteriormente para el cálculo de los índices de cambio climático es necesario contar con registros de datos instrumentales del clima suficientes y con la calidad adecuada. Para tener lo anterior se estimaron los datos faltantes de lluvia en todas los registros donde había huecos de información para el intervalo de 1965-2010.

La técnica para estimar dichos datos fue la interpolación inversa con el factor de peso  $\beta = 2$ , es decir la interpolación del cuadrado de la distancia tomando en cuenta las dos estaciones más cercanas a la estación de interés es decir:

$$W_j = \frac{\left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^2}{\sum_{j=1}^{n=2} \left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^2} \dots\dots\dots(5)$$

El procedimiento para realizar la interpolación se describe a continuación:

- 1) Se obtuvieron los registros de lluvia acumulada cada 24 horas del CLICOM 2010, se consideraron 58 estaciones climatológicas dentro de la zona de estudio.
- 2) Se eligió el periodo común para la zona de estudio ( 1965-2010).
- 3) Se realizó el análisis y control de calidad de los registros provenientes del CLICOM.

- 4) Se construyó la matriz de distancias con las coordenadas UTM de la 58 estaciones climatológicas, de la cual se obtuvieron las distancias de las 2 estaciones más cercanas a la estación de interés.
- 5) Se realizó la interpolación de los registros de lluvia faltantes en todas las series de datos de interés con la ecuación 5.

En la Figura 26 se presentan los resultados en gráficas de la estimación diaria de datos de lluvia faltantes en la estación 9037 perteneciente a la delegación Magdalena Contreras, la línea en color rojo, en este caso, representa la línea de tendencia de la precipitación anual acumulada. Los resultados completos de los registros se incluyen en el Anexo A de este trabajo.

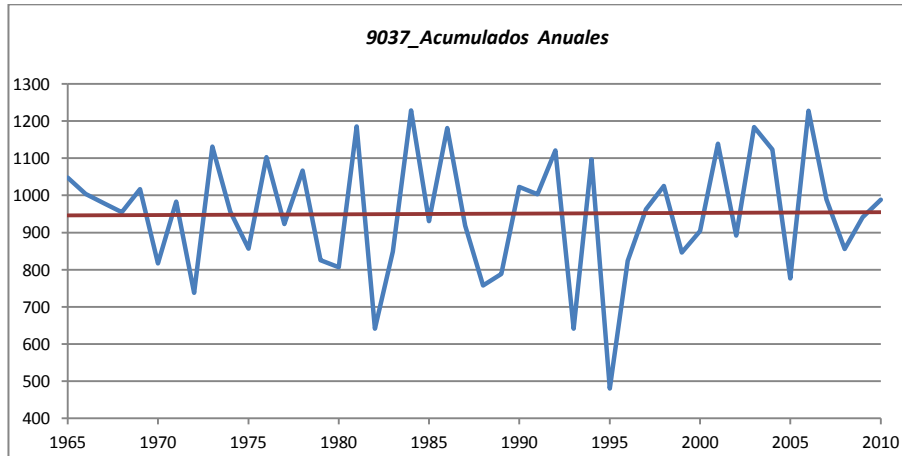


Figura 26. Registros de precipitación completados con la Técnica de Interpolación Inversa. Delegación Magdalena Contreras.

Se calculó la lluvia media para cada una de las 36 entidades en estudio y se trazó una línea de tendencia para observar si se han presentado cambios en el patrón de lluvia acumulada. En la Figura 27 se presentan las tendencias observadas en los registros de precipitación acumulada en el periodo 1965-2010. En color azul se muestran las entidades con tendencia nula o en la que no se observan cambios en el patrón de cantidad de lluvia anual, el color verde simboliza las tendencias ascendentes es decir los aumentos en el patrón de lluvia anual acumulada, mientras que el color naranja representa las tendencias

descendentes, donde se nota que ha disminuido la cantidad de lluvia acumulada en el tiempo.

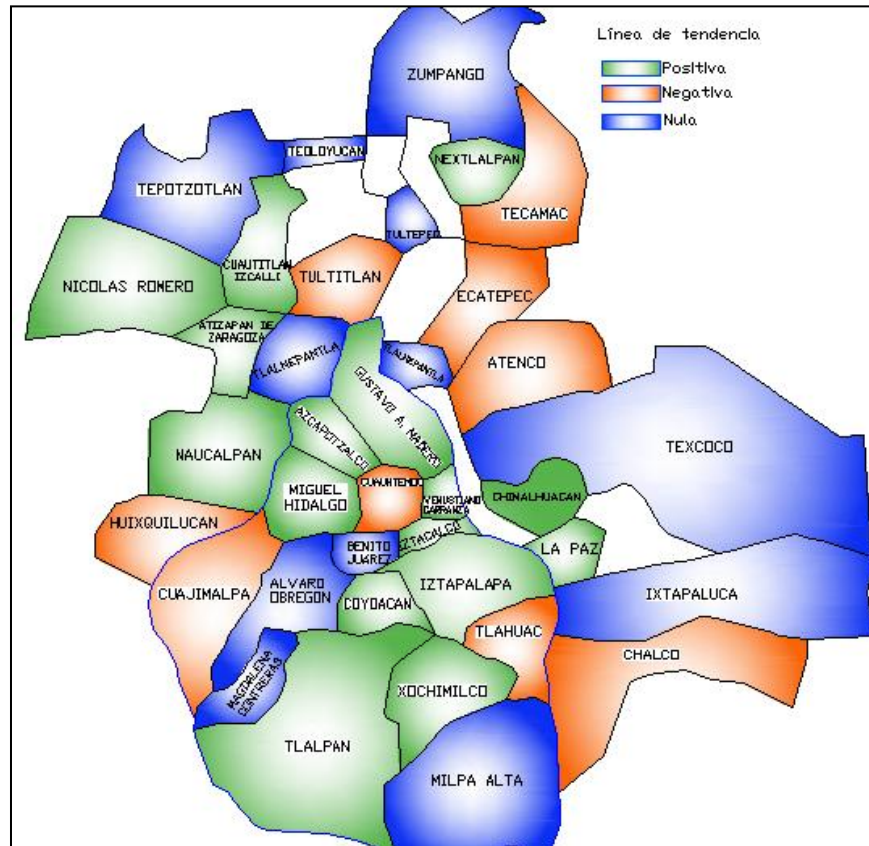


Figura 27. Tendencia observada de precipitación acumulada por entidad.

## **CAPITULO IV**

### **CÁLCULO DE ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO**

En este capítulo se presentan los resultados del cálculo de los índices de cambio climático en cada una de las 36 entidades consideradas en este estudio. Se calcularon los índices para la variable de precipitación máxima anual acumulada cada 24 horas obteniendo la lluvia media para cada localidad, a partir de los 58 registros las estaciones climatológicas estudiadas, posteriormente se calcularon los índices propuestos por la CONAGUA para cada uno de los municipios y delegaciones en estudio.

Un requisito fundamental para la obtención correcta de los Índices de Cambio Climático es verificar la homogeneidad de los registros de lluvia, además debido a que dichos índices se calculan para eventos extremos, se debe también verificar la independencia de los eventos de lluvia. Por lo anterior una vez completados todos los registros de precipitación diaria a través de la estimación de los mismos por la Técnica de la Interpolación Inversa, se realizaron las pruebas de homogeneidad e independencia que se mencionan a continuación.

#### IV.1. Pruebas de Independencia.

Cuando se trabaja con series de tiempo de eventos extremos se debe comprobar que la serie está compuesta de variables aleatorias y se rigen por las leyes de la estadística. Con el objetivo de comprobar lo anterior se aplicó la Prueba de Independencia de Eventos la cual se describe a continuación:

Para que se pueda llevar a cabo el análisis de frecuencias se requiere que la muestra  $Q_i^j$  de la serie  $j$  para  $i=1,2,\dots,n_j$ , este compuesta por variables aleatorias. Para probarlo se aplica la prueba de Independencia de Anderson ( Salas et al,1988), la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial  $r_k^j$  para diferentes tiempos de retraso  $k$ . Si se analiza un solo registro, entonces  $j=1^{10}$ .

La expresión para obtener el coeficiente de autocorrelación de retraso  $k$  es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{j=1}^{n_j-k} (q_i^j - \bar{q}^j)((q_{i+k}^j - \bar{q}^j))}{\sum_{i=1}^{n_j} (q_i^j - \bar{q}^j)^2}; \text{ para } r_0^1 = 1 \text{ y } k = 1, 2, \dots, \frac{n_j}{3} \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

$$\bar{q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{q_i^j}{n_j} \dots\dots\dots(7)$$

Además los limites al 95% de confianza para  $r_k^j$  se pueden obtener como

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{(n_j - k - 1)}}{n_j - k} \dots\dots\dots(8)$$

<sup>10</sup> Técnicas Estadísticas en Hidrología. Carlos A. Escalante Sandoval, Lilia Reyes Chávez. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería 2005. Página 132.

La gráfica de los valores estimados para  $r_k^j$  (ordenadas) contra los tiempos de retraso  $k$  (abcisas), junto con los correspondientes límites de confianza, se llama correlograma de la muestra. Si solo si, el 10% de los valores  $r_k^j$  sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie  $Q_i^j$  es independiente y por lo tanto es una variable que sigue las leyes de la probabilidad.

La aplicación de este criterio busca probar que la serie de eventos es dependiente espacialmente pero independiente en el tiempo. Se mide que la ocurrencia de un evento extremo no tenga nada que ver con el año anterior; es decir que no exista relación entre los eventos, por lo cual se espera que la correlación entre dichos eventos sea cero.

En la Figura 28 se muestra el correlograma de la estación 9037 el cual como se puede observar se encuentra dentro de los límites de confianza al 95% por lo cual la serie de eventos es independiente. En el Anexo A de este trabajo se incluyen los correlogramas de todas las estaciones en estudio, así como los obtenidos para todas las entidades en estudio.

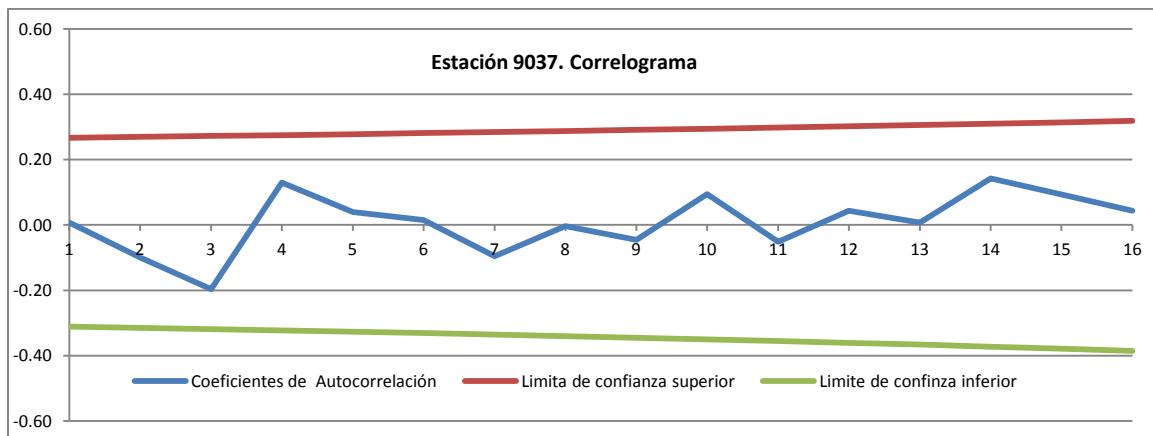


Figura 28. Resultados de la Prueba Estadística de Independencia de Eventos de Anderson. Estación 9037.

## IV.2. Pruebas de Homogeneidad.

Las características estadísticas de las series hidrológicas, como la media, desviación estándar y los coeficientes de correlación serial, se afectan cuando la serie presenta tendencia en la media o en la varianza, o cuando ocurren saltos negativos o positivos; tales anomalías son producidas por la pérdida de homogeneidad.

En general la falta de homogeneidad de los datos es inducida por las actividades humanas como la deforestación, apertura de nuevas áreas de cultivo, rectificación de cauces, construcción de embalses y reforestación. También es producto de los procesos naturales súbitos, como incendios forestales, terremotos, deslizamientos de laderas y erupciones volcánicas.

Las pruebas estadísticas que miden la homogeneidad de una serie de datos presentan una hipótesis nula y una regla para aceptarla o rechazarla. Estas pruebas sirven para determinar si las series de tiempo han sufrido cambios o modificaciones como el incremento o decremento de los gastos o lluvias anuales acumuladas.

En este trabajo se aplicaron tres pruebas estadísticas para verificar la homogeneidad de las series de precipitación la cuales son las pruebas de; Helmert,  $t$  de Student y Cramer.

### *Prueba Estadística de Helmert.*

Es una prueba sencilla y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento  $Q_i^j$  de la serie  $j$  para  $i=1,2,\dots,n_j$  con respecto a su valor medio  $\bar{Q}^j$ . Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S, de lo contrario se considera como un cambio C. La serie se considera homogénea si cumple que:

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1} \dots\dots\dots(9)$$

A continuación se presentan los resultados de la aplicación de esta prueba a la estación 15129, el Anexo A contiene los resultados completos para todas las estaciones utilizadas

Desviación	Secuencia(0)/ Cambio (1)		
-2.1		5.4	0
8.8	1	6.6	0
-17.6	1	6.6	0
-1.2	0	-14.4	1
-11.1	0	22.9	1
4.0	1	-4.4	1
0.6	0	-1.4	0
3.9	0	-5.6	0
2.1	0	8.0	1
2.1	0	16.1	0
-21.0	1	-6.9	1
-4.1	0	7.2	1
20.8	1	-48.3	1
-4.1	1	-9.3	0
-11.1	0		
17.9	1		
-13.4	1		
-21.5	0		
10.4	1		
1.9	0		
11.3	0		
-15.7	1		
-24.6	0		
4.8	1		
20.0	0		
21.8	0		
6.9	0		
11.5	0		
8.7	0		
4.8	0		
-3.2	1		
6.0	1		

Estadísticos de la Serie	
Promedio	<b>44.1</b>
Desviación estándar	<b>13.8</b>
Coficiente de asimetría	<b>1.0</b>
Curtosis	<b>5.1</b>
Coficiente de variación	<b>0.3</b>
Mínimo	<b>21.2</b>
Máximo	<b>92.4</b>

<b>n</b>	<b>46</b>
<b>N.Cambios</b>	<b>20</b>
<b>N.Secuencias</b>	<b>25</b>
<b>C+S=N-1</b>	<b>45</b>

Figura 29. Resultados de la Prueba Estadística Helmert. Estación 15129



*Prueba Estadística de Cramer*

Se utiliza con el propósito de verificar la homogeneidad en el registro  $Q_i^j$  de la serie  $j$  para  $i=1,2,\dots,n_j$ , y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un periodo de tiempo a otro. Con este propósito se consideran tres bloques, el primero, del tamaño de la muestra total  $n_j$ ; el segundo de tamaño  $n_{60}$  (60% de los últimos valores de la muestra  $n_j$ ); y el tercero de tamaño  $n_{30}$  (30% de los últimos valores de la muestra  $n_j$ ).

La prueba compara el valor de  $\bar{Q}^j$  del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos  $\bar{Q}_{60}^j$  y  $\bar{Q}_{30}^j$ . Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media, se deberá cumplir que no exista una diferencia significativa entre las medias de los bloques.

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j}, \text{ para una sola muestra analizada } j = 1, \dots, \dots (10)$$

$$S_Q^j = \left[ \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2 \right]^{1/2} \dots (11)$$

$$\bar{Q}_{60}^j = \sum_{K=1}^{n_{60}} \frac{Q_K^j}{n_{60}} \dots (12)$$

$$\bar{Q}_{30}^j = \sum_{K=1}^{n_{30}} \frac{Q_K^j}{n_{30}} \dots (13)$$

$$\tau_{60}^j = \frac{\bar{Q}_{60}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j} \dots (14)$$

$$\tau_{30}^j = \frac{\bar{Q}_{30}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j} \dots (15)$$

$$t_w = \left[ \frac{n_w(n_j-2)}{n_j-n_w[1+(\tau_w^j)^2]} \right]^2 |\tau_w^j| \dots (16)$$

para  $w = 60$  y  $w = 30$

El estadístico  $t_w$  tiene distribución  $t$  de Student de dos colas con  $v = n_1+n_2-2$  grados de libertad y para un nivel de  $\alpha=0.05$ . Sí y solo si, el valor absoluto de  $t_w$  para  $w=60$  y  $w=30$ , es mayor que el de la distribución  $t$  de Student, se concluye que la diferencia entre

las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie  $Q_i^j$  se considera no homogénea. En la Figura 30 se presenta el cálculo de esta prueba para la estación 15040 perteneciente al municipio de Ecatepec, en el Anexo A se incluyen los resultados de la aplicación de esta prueba estadística a los registros de lluvia de las 58 estaciones en estudio.

Estadísticos de la Serie 100%		Registros		
		100%	60%	30%
Promedio	<b>36.7</b>	32.9		
Desviación estándar	<b>11.1</b>	46.5		
Varianza	<b>123.5</b>	51.5		
Coficiente de asimetría	<b>0.8</b>	43.5		
Curtosis	<b>3.4</b>	27		
Coficiente de variación	<b>0.3</b>	34		
Mínimo	<b>16.2</b>	31.5		
Máximo	<b>67.1</b>	35.5		
		36		
		30		
		53.5		
		41		
		49.5		
		29		
		63		
		27	27	
		40	40	
		31	31	
		29.4	29	
		24.5	25	
		34	34	
		48	48	
		41.6	42	
		57.5	58	
		34.3	34	
		32.6	33	
		47	47	
		52.3	52	
		21.9	22	
		34.9	35	
		25.2	25	
		23.8	24	24
		30.4	30	30
		32.4	32	32
		34.6	35	35
		42.2	42	42
		28	28	28
		36.3	36	36
		21.6	22	22
		35.1	35	35
		30.8	31	31
		67.1	67	67
		37	37	37

La serie es Homogénea

Figura 30. Resultados de la Prueba Estadística Cramer. Estación 15040

*Prueba Estadística t de Student*

Cuando la causa probable de la pérdida de homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, la prueba del estadístico  $t$  es muy útil. Si se considera una serie  $Q_i^j$  para  $i=1,2,\dots,n_j$ , del sitio  $j$ , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño  $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$ , entonces, el estadístico de prueba se define con la expresión

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[ \frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \dots\dots\dots(17)$$

Donde:

$\bar{x}_1, S_1^2$  son la media y varianza de la primera parte del registro del tamaño  $n_1$ .

$\bar{x}_2, S_2^2$  son la media y varianza de la segunda parte del registro del tamaño  $n_2$ .

El valor absoluto de  $t_d$  se compara con el valor de la distribución  $t$  de Student de dos colas, y con  $\nu = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel de  $\alpha=0.05$ .

Sí y solo si, el valor absoluto de  $t_d$  es mayor que el de la distribución  $t$  de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie  $Q_i^j$  se no considera homogénea.

Estadísticos de la primera parte de la serie		Registros	
Promedio	<b>41.8</b>		
Desviación estándar	<b>11.8</b>	<b>1 parte</b>	<b>2 parte</b>
Varianza	<b>139.1</b>	38.8	77.5
Coficiente de asimetría	<b>1.0</b>	38.0	90.0
Curtosis	<b>3.3</b>	63.9	39.0
Coficiente de variación	<b>0.3</b>	34.8	35.5
Mínimo	<b>24.5</b>	30.0	41.0
Máximo	<b>70.2</b>	31.2	21.0
		35.5	43.2
		39.1	41.0
		60.4	36.5
		46.4	26.0
		35.4	68.6
		70.2	19.8
		31.0	27.6
		44.0	25.1
		53.5	41.2
		40.0	68.0
		31.0	37.1
		24.5	30.0
		56.5	40.0
		35.5	57.2
		45.3	45.0
		35.5	40.0
		41.5	45.0

Estadísticos de la segunda parte de la serie	
Promedio	<b>43.3</b>
Desviación estándar	<b>18.0</b>
Varianza	<b>323.1</b>
Coficiente de asimetría	<b>1.1</b>
Curtosis	<b>4.0</b>
Coficiente de variación	<b>0.4</b>
Mínimo	<b>19.8</b>
Máximo	<b>90.0</b>

TD=	<b>-0.315</b>
td=	<b>2.0168</b>
<b>La serie es Homogénea</b>	

Figura 31. Resultados de la Prueba Estadística t de Student. Estación 9045

### IV.3 Cálculo de Índices de Cambio Climático adoptados por la CONAGUA.

En este trabajo se calcularon los Índices de Cambio Climático propuestos por la CONAGUA y el Centro Nacional de Desastres (CENAPRED) para la variable de precipitación. Como se menciona en el capítulo I de este trabajo los Índices propuestos por el ETCCDI pueden ser modificados de acuerdo al objetivo de cada estudio en particular.

Con la intención de analizar cambios en los patrones de precipitación se utiliza el Índice  $R_{nn}$  (días con lluvia mayor a  $nn$  en mm). Debido al impacto que tienen los eventos consecutivos de lluvia durante varios días en la infraestructura hidráulica se analizaron también los trenes de lluvia 2 hasta 10 días consecutivos. La base para calcular los trenes de lluvia son los índices  $RX1day$  y  $RX5day$ . En la Tabla 9 se muestran los índices  $R_{nn}$  para analizar cambios en los patrones de precipitación, mientras en la Tabla 10 se presentan los índices aplicados para el cálculo de los trenes de lluvia.

Tabla 9. Índices de Cambio Climático utilizados para detectar cambios en los patrones de lluvia.

ID	Nombre del Indicador	Definición	Unidad
R <sub>00</sub>	Día sin lluvia	Número de días en un año con PRCP= 0 mm	Días
R <sub>005</sub>	Lluvia Ligera	Número de días en un año con PRCP > 0.1 mm y PRCP ≤ 5 mm	Días
R <sub>520</sub>	Lluvia Moderada	Número de días en un año con PRCP > 5 mm y PRCP ≤ 20 mm	Días
R <sub>2070</sub>	Lluvia Fuerte	Número de días en un año con PRCP > 20 mm y PRCP ≤ 70 mm	Días
R <sub>70150</sub>	Lluvia Intensa	Número de días en un año con PRCP > 70 mm y PRCP ≤ 150 mm	Días
R <sub>m150</sub>	Lluvia Torrencial	Número de días en un año con PRCP > 150 mm	Días

Tabla 10. Índices de Cambio Climático utilizados para analizar trenes de lluvia.

ID	Nombre del Indicador	Definición	Unidad
RX <sub>2day</sub>	Máximo de PECP en 2 días	Máximo anual de la PCRP registrada en 2 días consecutivos.	mm
RX <sub>3day</sub>	Máximo de PECP en 3 días	Máximo anual de la PCRP registrada en 3 días consecutivos.	mm
RX <sub>4day</sub>	Máximo de PECP en 4 días	Máximo anual de la PCRP registrada en 4 días consecutivos.	mm
RX <sub>5day</sub>	Máximo de PECP en 5 días	Máximo anual de la PCRP registrada en 5 días consecutivos.	mm
RX <sub>6day</sub>	Máximo de PECP en 6 días	Máximo anual de la PCRP registrada en 6 días consecutivos.	mm
RX <sub>7day</sub>	Máximo de PECP en 7 días	Máximo anual de la PCRP registrada en 7 días consecutivos.	mm
RX <sub>8day</sub>	Máximo de PECP en 8 días	Máximo anual de la PCRP registrada en 8 días consecutivos.	mm
RX <sub>9day</sub>	Máximo de PECP en 9 días	Máximo anual de la PCRP registrada en 9 días consecutivos.	mm
RX <sub>10day</sub>	Máximo de PECP en 10 días	Máximo anual de la PCRP registrada en 10 días consecutivos.	mm

#### IV.4 Resultados de Índices de Cambio Climático

Aquí se presentan los resultados de la aplicación de los Índices de Cambio Climático a los registros de precipitación cada 24 horas de las 58 estaciones en estudio. Se presentan también los resultados calculados para las 36 entidades estudiadas.

##### *Índice R<sub>00</sub>*

Este índice mide el número de días al año sin precipitación apreciable. En la Figura 32 se presentan los resultados de este índice para la estación 15145 perteneciente a la delegación Azcapotzalco, los resultados completos se incluyen en el Anexo A de este trabajo.

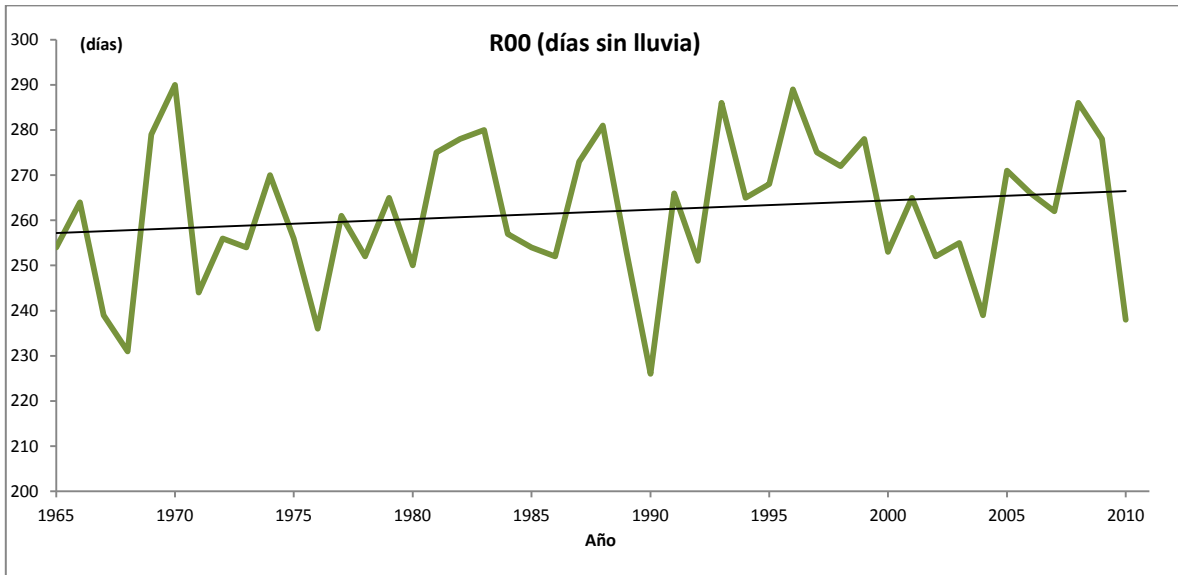


Figura 32. Serie anual  $R_{00}$  para la estación 15145 ubicada en el municipio de Chimalhuacán.

En lo que se refiere al análisis por delegaciones y municipios se obtuvo la lluvia media diaria de cada localidad y, a partir de ésta se calcularon los índices de cambio climático para la variable precipitación.

Para el caso del índice  $R_{00}$  en la Figura 33 se muestran las tendencias observadas para el índice de días si lluvia ( $R_{00}$ ) en las localidades estudiadas. En color azul se representa las tendencias nulas, es decir aquellas donde no se observa una disminución o un aumento de los días sin lluvia, en color verde se presentan las tendencias positivas donde se observa un decremento anual en los días con lluvia, mientras las tendencias negativas (color naranja) indican un aumento en los días con lluvia al año.

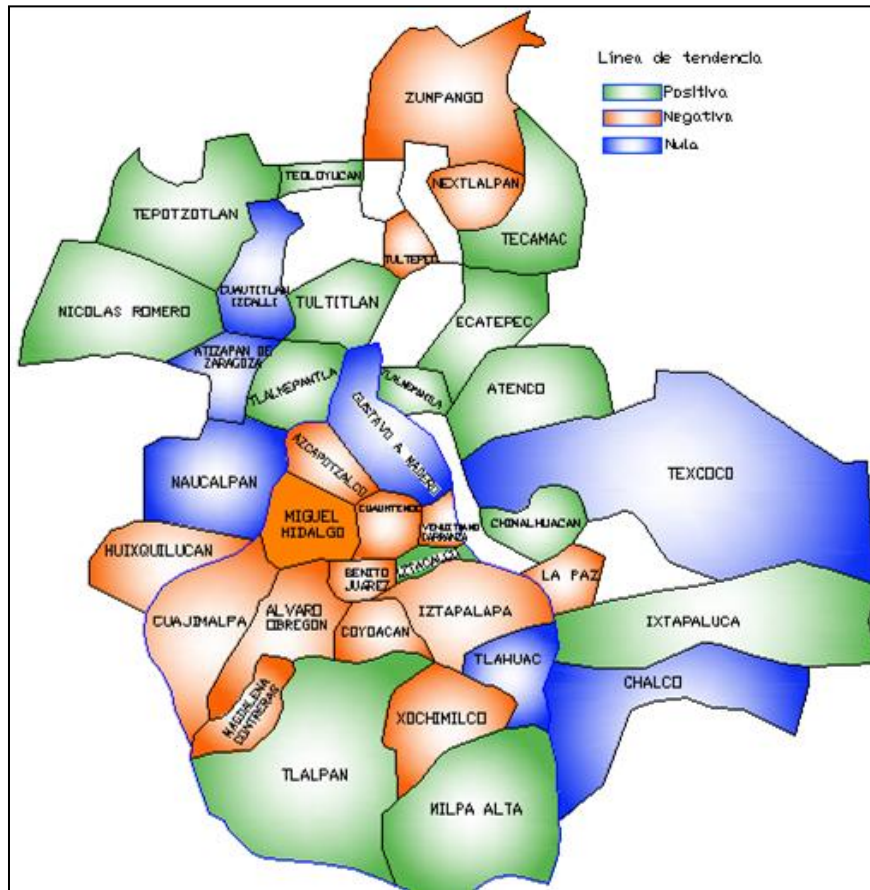


Figura 33. Tendencias de la serie anual  $R_{00}$  para las entidades en estudio.

### Índice $R_{005}$

Este índice mide el número de días al año con  $PRCP > 0.1$  mm y  $PRCP \leq 5$  mm, a los días que presentan este rango de precipitación se les llama *días con lluvia ligera*. En la Figura 34 se muestran los resultados y tendencia del índice  $R_{005}$  en la estación 9046 ubicada en la delegación Álvaro Obregón, los resultados completos se incluyen en el Anexo A de este trabajo.



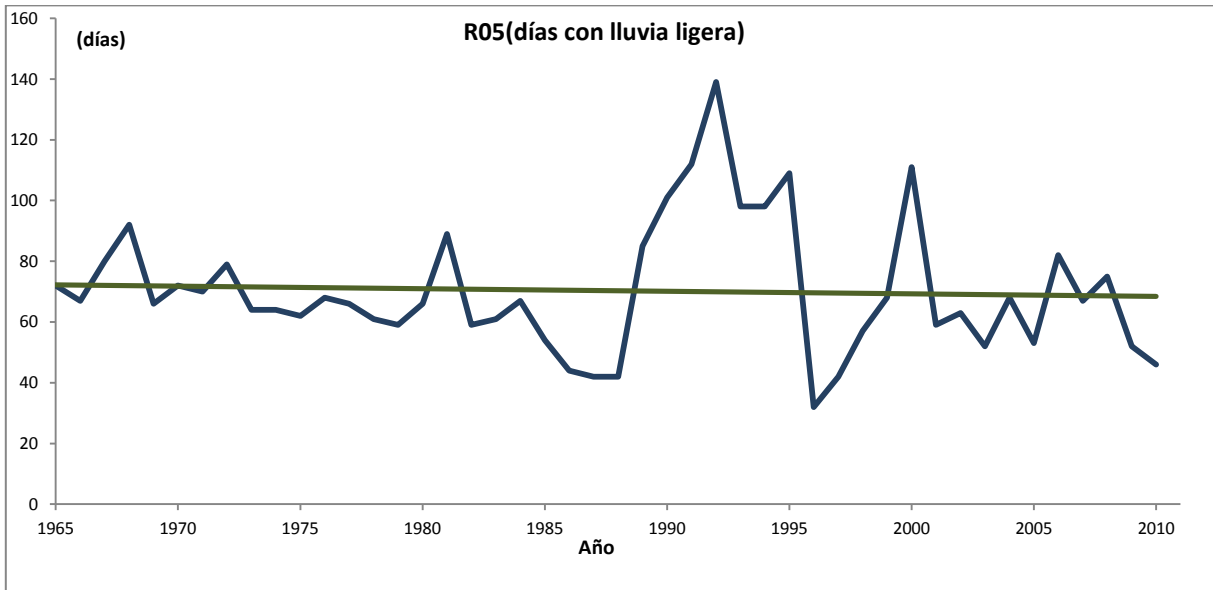


Figura 34. Serie anual  $R_{005}$  para la estación 9046 ubicada en la delegación Álvaro Obregón.

Para el caso del índice  $R_{05}$  en la Figura 35 se muestran las tendencias observadas para el índice de días con lluvia ligera ( $R_{005}$ ) en las localidades estudiadas. En color azul se representa las tendencias nulas, es decir aquellas donde no se observa una disminución o un aumento en la ocurrencia de días con lluvia ligera, en color verde se presentan las tendencias positivas donde se observa un incremento anual en los días con lluvia ligera, mientras las tendencias negativas (color naranja) indican una disminución en los días con lluvia ligera al año.

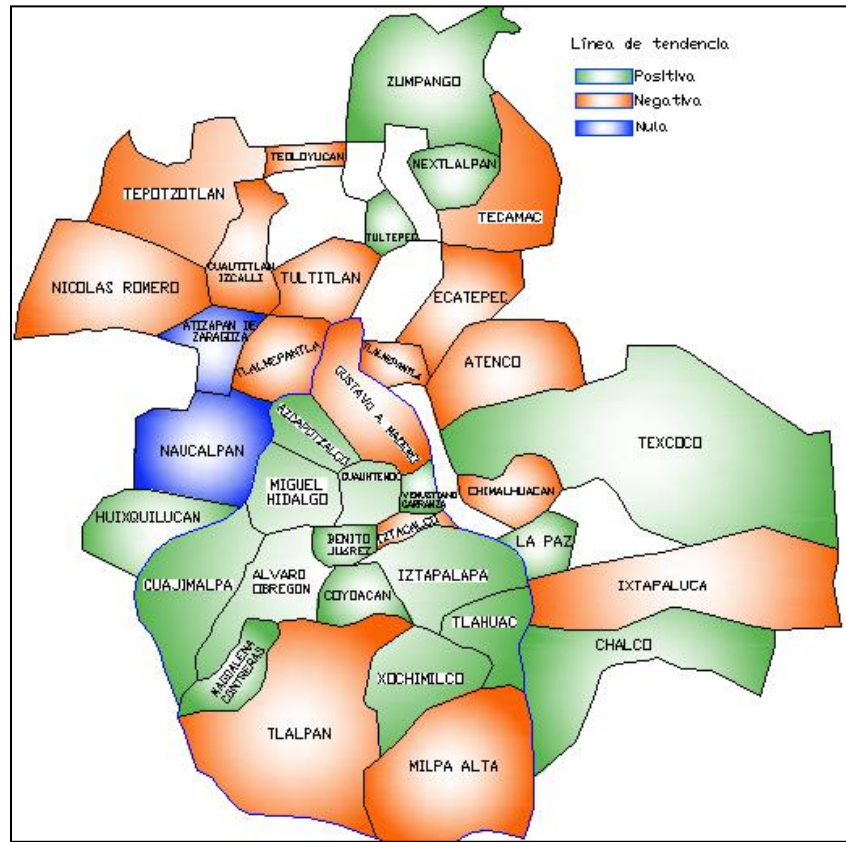


Figura 35. Tendencias de la serie anual  $R_{005}$  para las entidades en estudio.

### Índice $R_{520}$

Este índice mide el número de días al año número de días en un con  $PRCP > 5 \text{ mm}$  y  $PRCP \leq 20 \text{ mm}$ , a los días que presentan este rango de precipitación se les llama *días con lluvia moderada*. En la Figura 36 se muestran los resultados y tendencia del índice  $R_{520}$  en la estación 15075 ubicada en el municipio de Atizapán, los resultados completos se incluyen en el Anexo A de este trabajo.

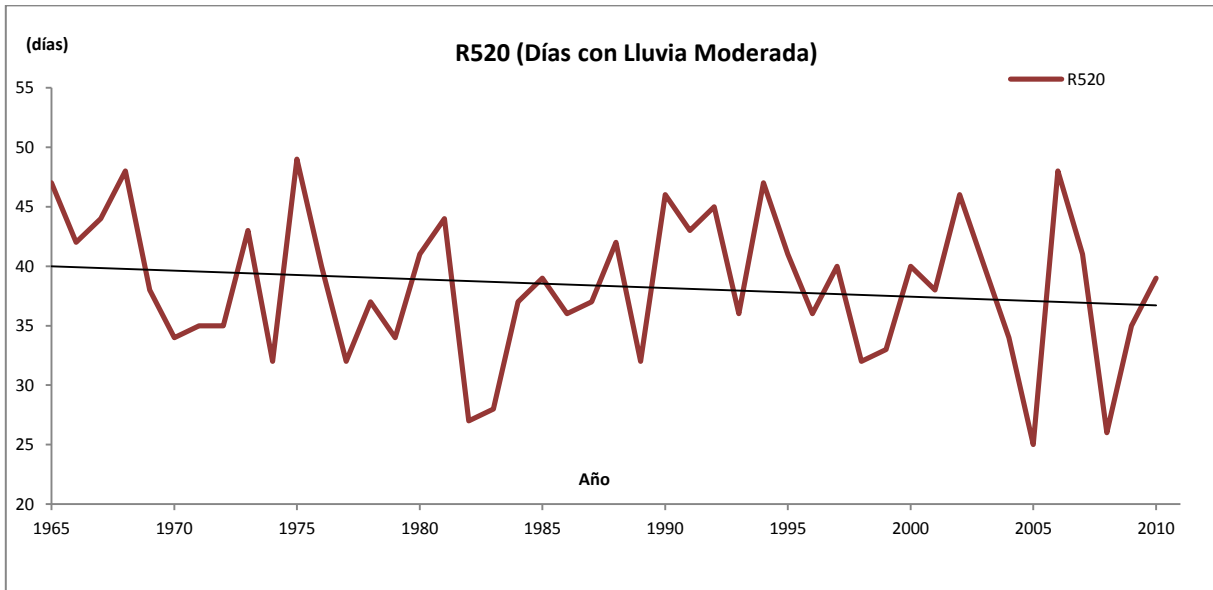


Figura 36. Serie anual  $R_{520}$  para la estación 15075 ubicada en el municipio de Atizapán.

Para el caso del índice  $R_{020}$ , en la Figura 37 se muestran las tendencias observadas para el índice de días con lluvia moderada ( $R_{520}$ ) en las localidades estudiadas. En color azul se representan las tendencias nulas, es decir aquellas donde no se observa una disminución o un aumento en la ocurrencia de días con lluvia moderada, en color verde se presentan las tendencias positivas donde se observa un incremento anual en los días con lluvia moderada, mientras las tendencias negativas (color naranja) indican una disminución en los días con lluvia moderada al año.

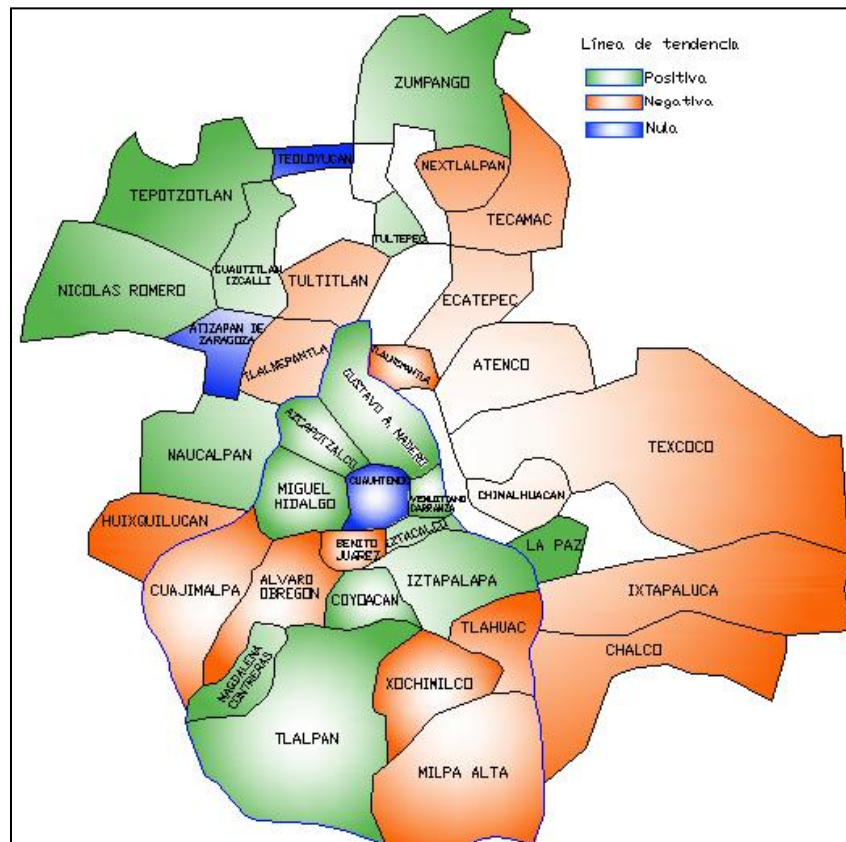


Figura 37. Tendencias de la Serie anual  $R_{520}$  para las entidades en estudio.

### Índice $R_{2070}$

Este índice mide el número de días al año con  $PRCP > 20 \text{ mm}$  y  $PRCP \leq 70 \text{ mm}$ , a los días que presentan este rango de precipitación se les llama *días con lluvia fuerte*. En la Figura 38 se muestran los resultados y tendencia del índice  $R_{2070}$  en la estación 15027 ubicada en el municipio de Naucalpan, los resultados completos se incluyen en el Anexo A de este trabajo.

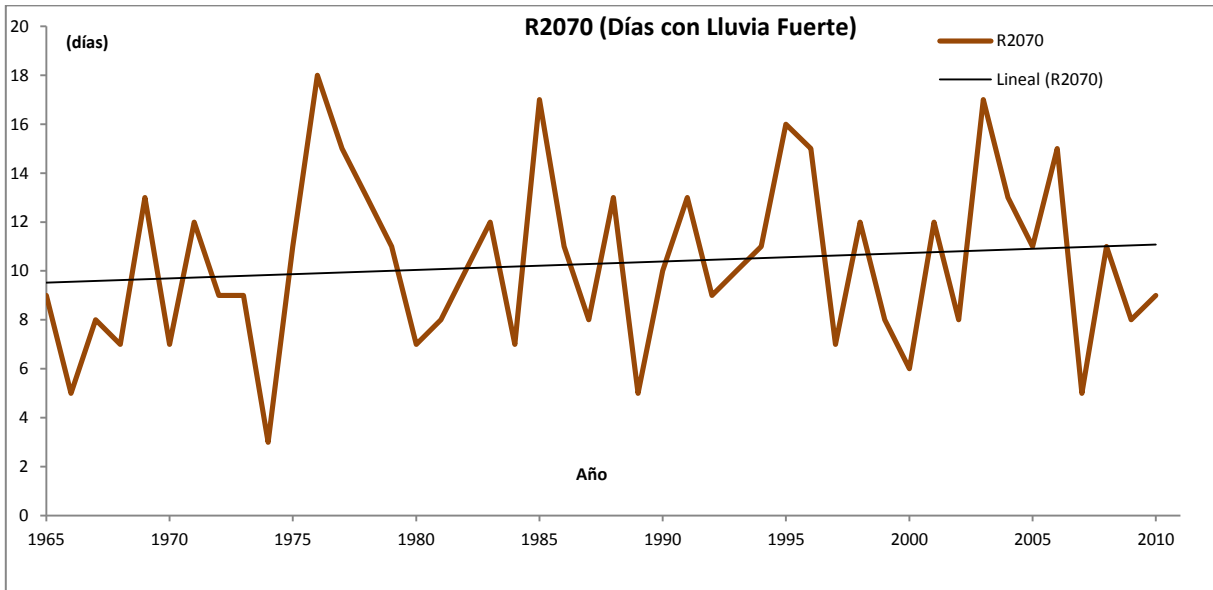


Figura 38. Serie anual  $R_{2070}$  para la estación 15027 ubicada en el municipio de Naucalpan.

Para el caso del índice  $R_{2070}$ , en la Figura 39 se muestran las tendencias observadas para el índice de días con lluvia fuerte ( $R_{2070}$ ) en las localidades estudiadas. En color azul se representa las tendencias nulas, es decir aquellas donde no se observa una disminución o un aumento en la ocurrencia de días con lluvia fuerte, en color verde se presentan las tendencias positivas donde se observa un incremento anual en los días con lluvia fuerte, mientras las tendencias negativas (color naranja) indican una disminución en los días con lluvia fuerte al año.

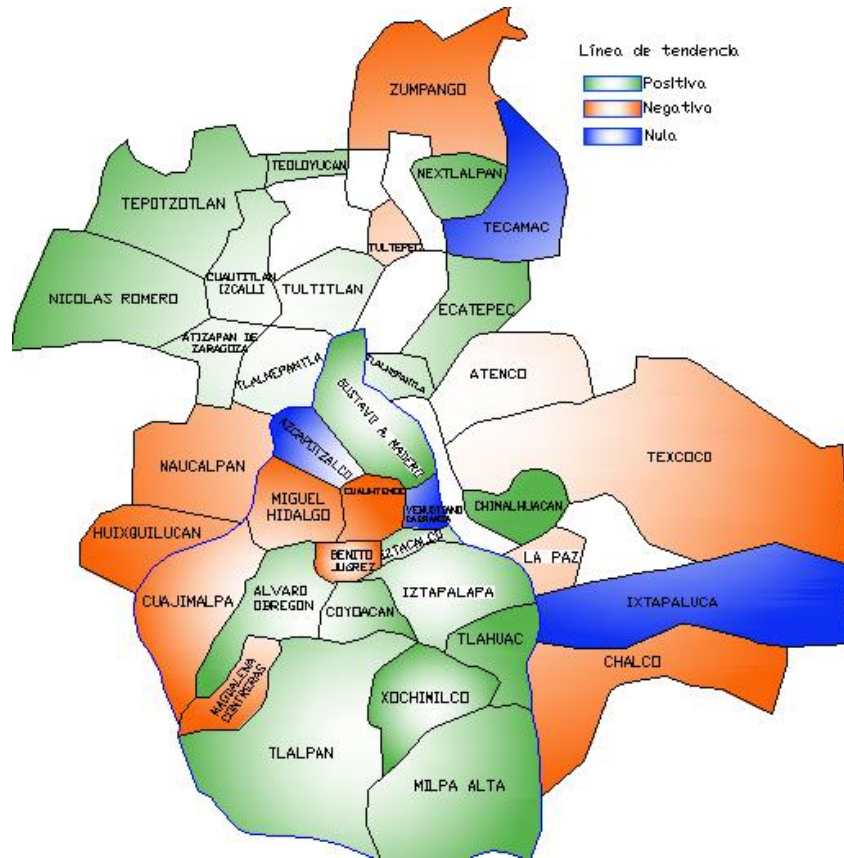


Figura 39. Tendencias de la serie anual  $R_{2070}$  para las entidades en estudio.

### Índice $R_{70150}$

Este índice mide el número de días en un año con  $PRCP > 70$  mm y  $PRCP \leq 150$  mm, a los días que presentan este rango de precipitación se les llama *días con lluvia intensa*. En la Figura 40 se muestran los resultados y tendencia del índice  $R_{70150}$  en la estación 15033 perteneciente al municipio de Huixquilucan, los resultados completos se incluyen en el Anexo A de este trabajo.

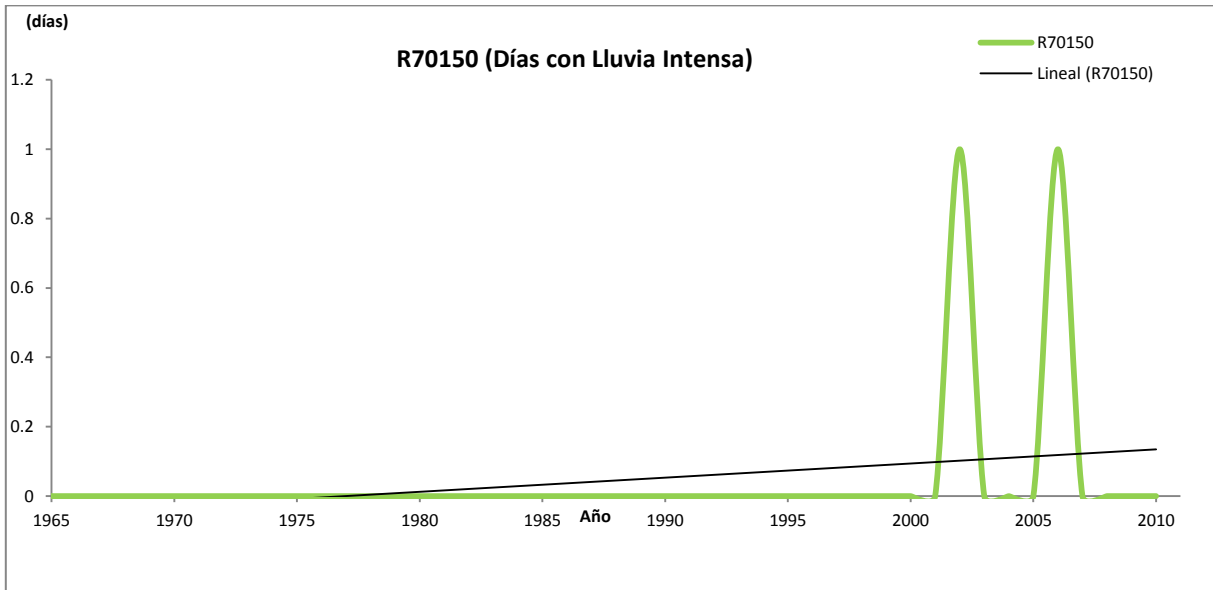


Figura 40. Serie anual  $R_{70150}$  para la estación 15033 ubicada en el municipio de Huixquilucan.

Para el caso del índice  $R_{70150}$ , en la Figura 41 se muestran las tendencias observadas para el índice de días con lluvia fuerte ( $R_{70150}$ ) en las localidades estudiadas. En color azul se representa las tendencias nulas, es decir aquellas donde no se observa una disminución o un aumento en la ocurrencia de días con lluvia intensa, en color verde se presentan las tendencias positivas donde se observa un incremento anual en los días con lluvia intensa, mientras las tendencias negativas (color naranja) indican una disminución en los días con lluvia intensa al año.

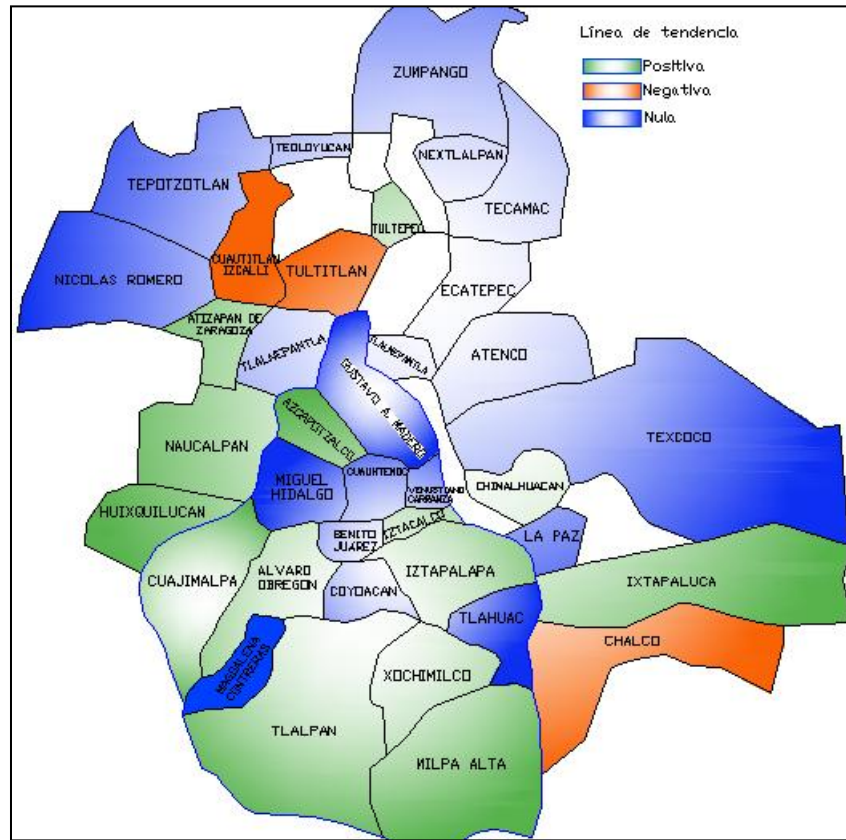


Figura 41. Tendencias de la serie anual  $R_{70150}$  para las entidades en estudio.

### Índice $R_{m150}$

Este índice mide el número de días en un año con  $PRCP > 150$  mm, a los días que presentan este rango de precipitación se les llama *días con lluvia torrencial*. Los resultados del cálculo de este índice en la zona de estudio indican que para el periodo de análisis (1965-2010) solo se había presentando un evento de esta magnitud en la delegación Xochimilco. En la Figura 42 se muestran los resultados y tendencia del índice  $R_{m150m}$  en la estación 9041 perteneciente a la delegación de Xochimilco, los resultados completos se incluyen en el Anexo A de este trabajo.



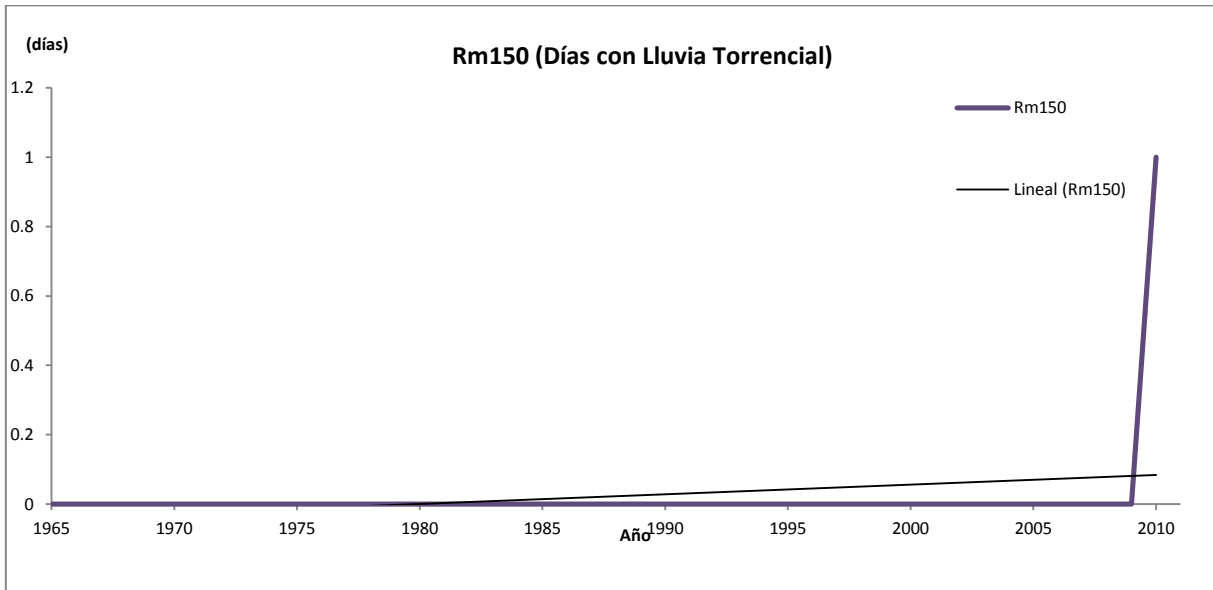


Figura 42. Serie anual  $R_{70150}$  para la estación 9041 ubicada en la delegación Xochimilco.

Para el caso del índice  $R_{70150}$ , en la Figura 43 se muestran las tendencias observadas para el índice de días con lluvia torrencial ( $R_{m150}$ ) en las localidades estudiadas. En color azul se representa las tendencias nulas, es decir aquellas donde no se han presentado eventos de esta magnitud, en color verde se presentan las tendencias positivas donde se observa un incremento anual en los días con lluvia intensa. Se puede observar que la única entidad donde se presentaron eventos de lluvia mayores a 150 mm en un día es la delegación Xochimilco.

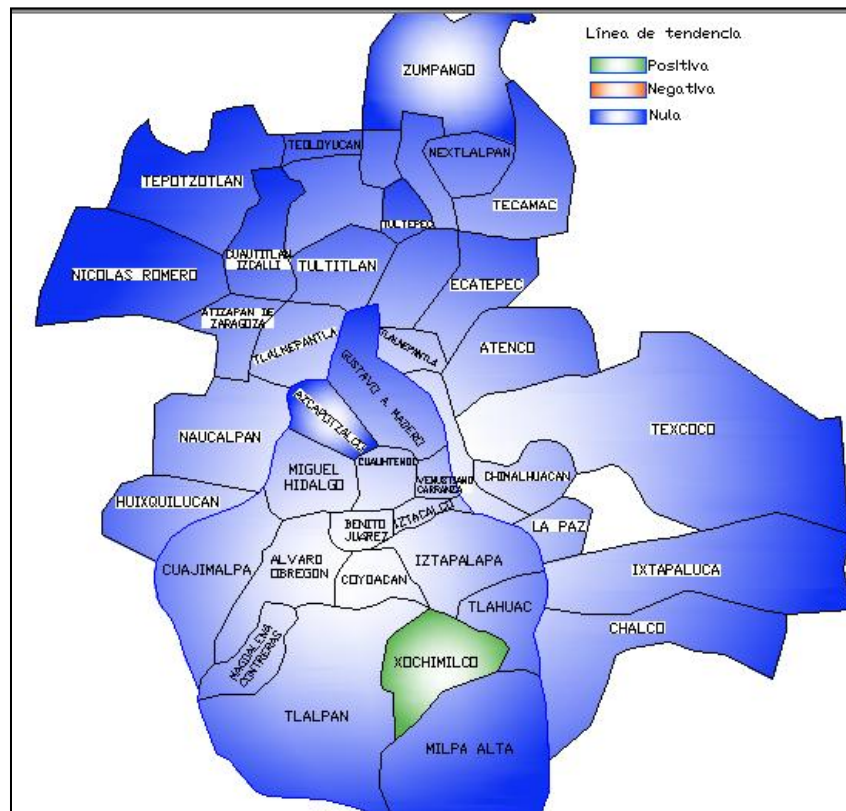


Figura 43. Tendencias de la serie anual  $R_{m150}$  para las entidades en estudio

### *Índice $R_{Xday}$*

Este índice mide los valores máximos de lluvia en una serie de eventos consecutivos, en este trabajo se calcularon los trenes de lluvia desde 1 hasta 10 días consecutivos. Posteriormente se obtuvo una línea de tendencia para cada uno de los registros analizados y para los registros representativos por entidad.

### *Índice $R_{1day}$*

Este índice corresponde a los máximos diarios anuales de cada registro estudiado. En la Figura 44 se muestran los resultados del cálculo de este índice así como la línea de tendencia para la estación 9029 ubicada en la delegación Gustavo A. Madero, los resultados completos para este índice se incluyen en el Anexo A de este trabajo

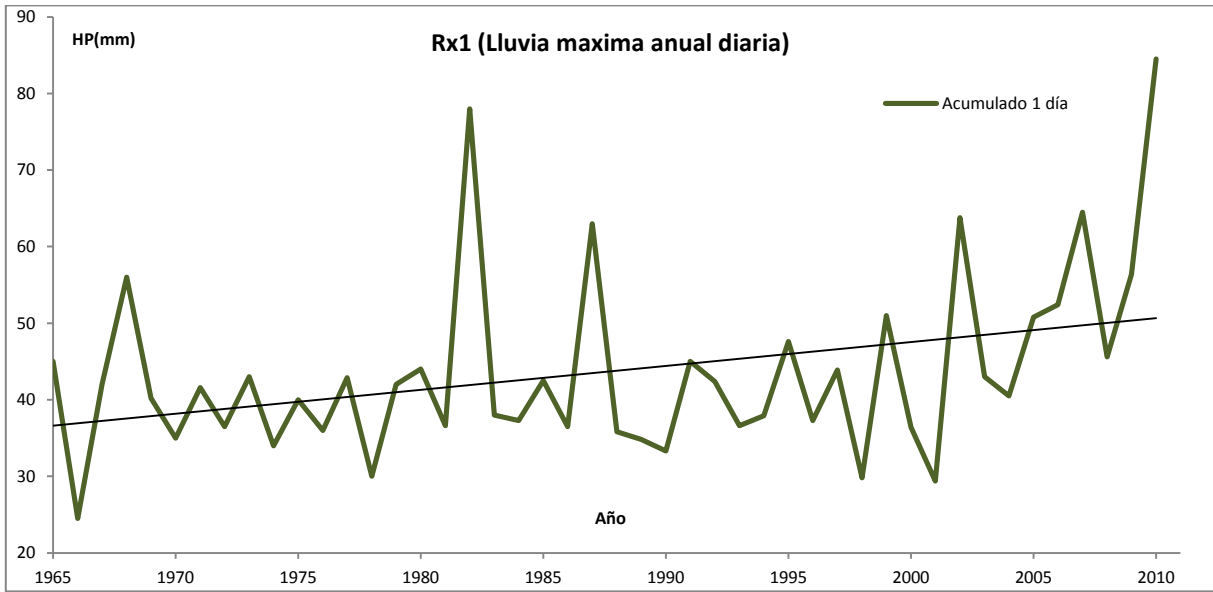


Figura 44. Serie anual  $R_{x1day}$  para la estación 9029 ubicada en la delegación Gustavo A. Madero.

Las tendencias para los máximos diarios anuales por entidad se muestran en la Figura 45 obtenidos a partir de la lluvia media en cada municipio y delegación en estudio, en esta Figura se pueden observar donde se han presentado cambios en las magnitudes de los eventos de lluvia extremos en un día. Estos cambios pueden estar dirigidos hacia el incremento o decremento en la lamina de lluvia acumulada en un día o bien, muestran tendencias nulas, es decir no se aprecian cambios en los patrones de las mismas.

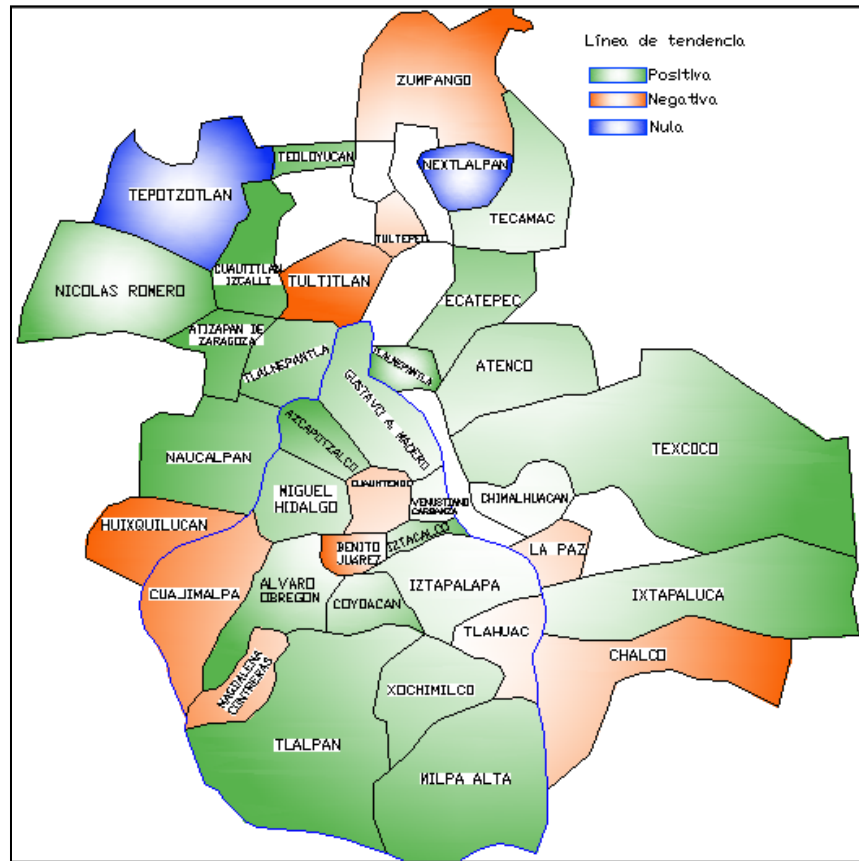


Figura 45. Tendencias de la serie anual  $R_{x1day}$  para las entidades en estudio

### *Índice $R_{2day}$*

Este índice corresponde los trenes de lluvia de dos días consecutivos. En la Figura 46 se muestran los resultados del cálculo de este índice así como la línea de tendencia para la estación 9015 perteneciente a la delegación Cuauhtémoc, los resultados completos para este índice se incluyen en el Anexo A de este trabajo.

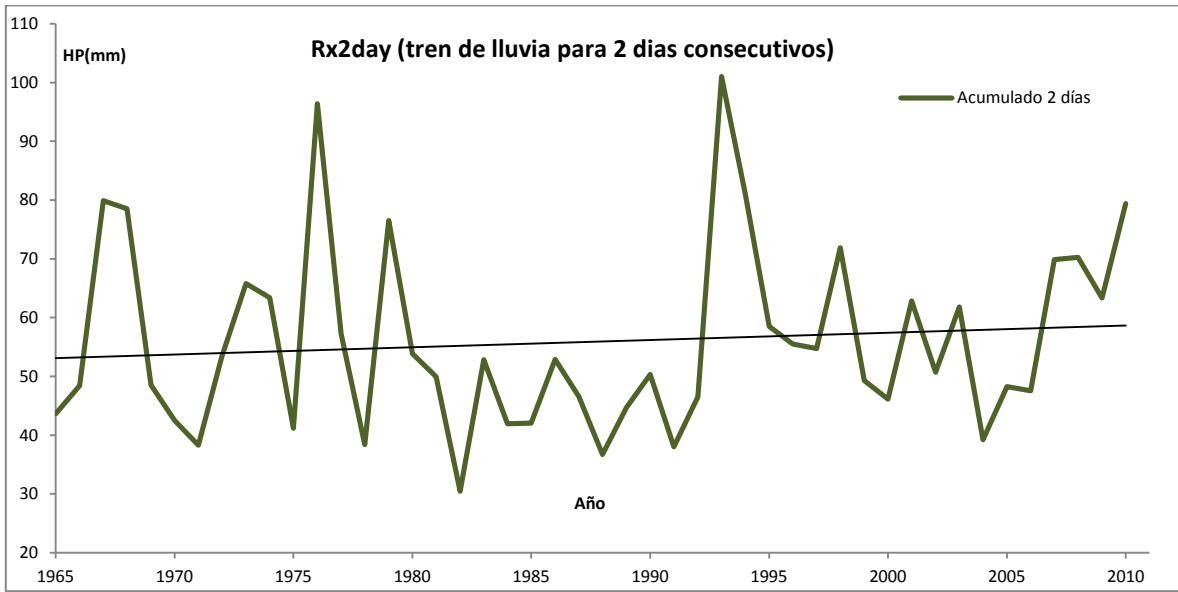


Figura 46. Serie anual  $R_{x2day}$  para la estación 9015 ubicada en la delegación Cuauhtémoc.

Las tendencias para el índice  $R_{x2day}$  por entidad se muestran en la Figura 47, obtenidas a partir de la lluvia media en cada municipio y delegación en estudio, en esta Figura se pueden observar donde se han presentado cambios en las laminas máximas de lluvia acumulada durante dos días consecutivos. Las tendencias pueden estar dirigidas hacia el incremento o decremento en la lamina de lluvia acumulada en dos días o bien, mostrar tendencias nulas, es decir no se aprecian cambios en los patrones de las mismas.



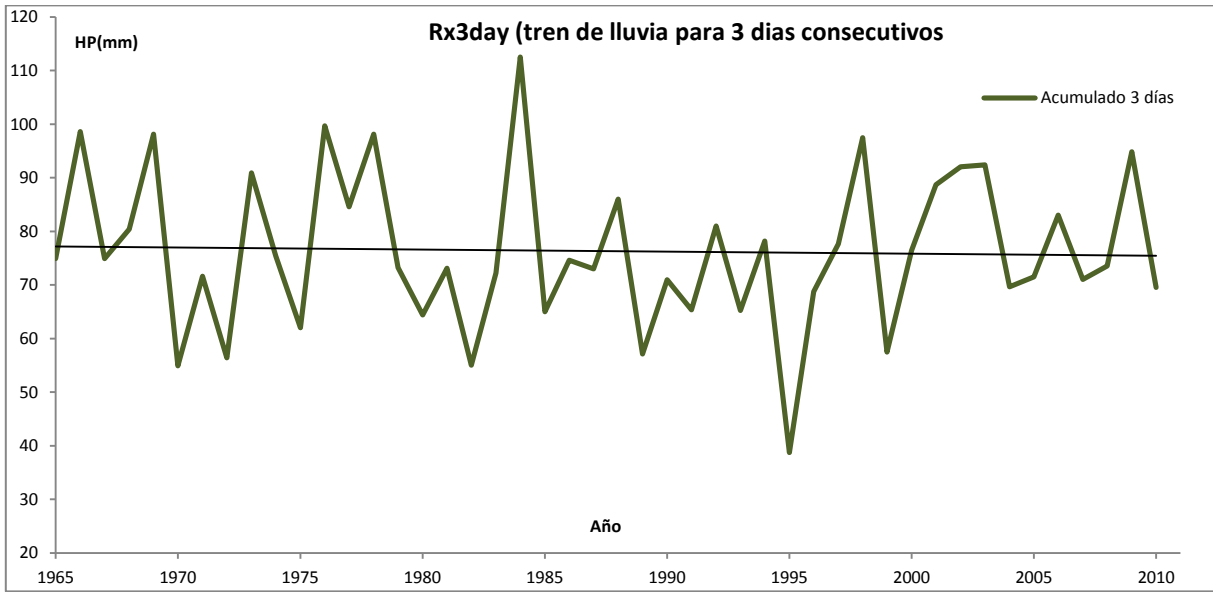


Figura 48. Serie anual  $R_{x3day}$  para la estación 9037 ubicada en la delegación Magdalena Contreras.

Las tendencias para el índice  $R_{x3day}$  por entidad se muestran en la Figura 49, obtenidas a partir de la lluvia media en cada municipio y delegación en estudio, en esta Figura se pueden observar donde se han presentado cambios en las laminas máximas de lluvia acumulada durante tres días consecutivos ocurrida en un año. Las tendencias pueden estar dirigidas hacia el incremento o decremento en la lámina de lluvia acumulada en tres días o bien, mostrar tendencias nulas, es decir no se aprecian cambios en los patrones de las mismas.

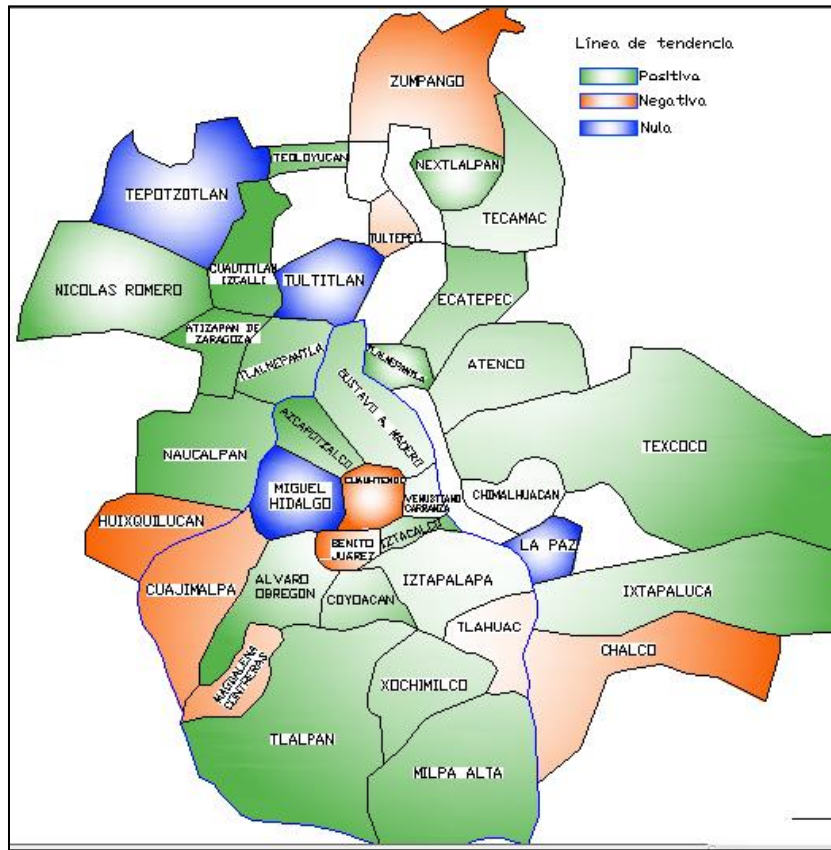


Figura 49. Tendencias de la serie anual  $R_{x3day}$  para las entidades en estudio

### *Índice $R_{4day}$*

Este índice corresponde los trenes de lluvia de cuatro días consecutivos. En la Figura 50 se muestran los resultados del cálculo de este índice así como la línea de tendencia para la estación 15018 perteneciente al municipio de Ixtapaluca, los resultados completos para este índice se incluyen en el Anexo A de este trabajo.



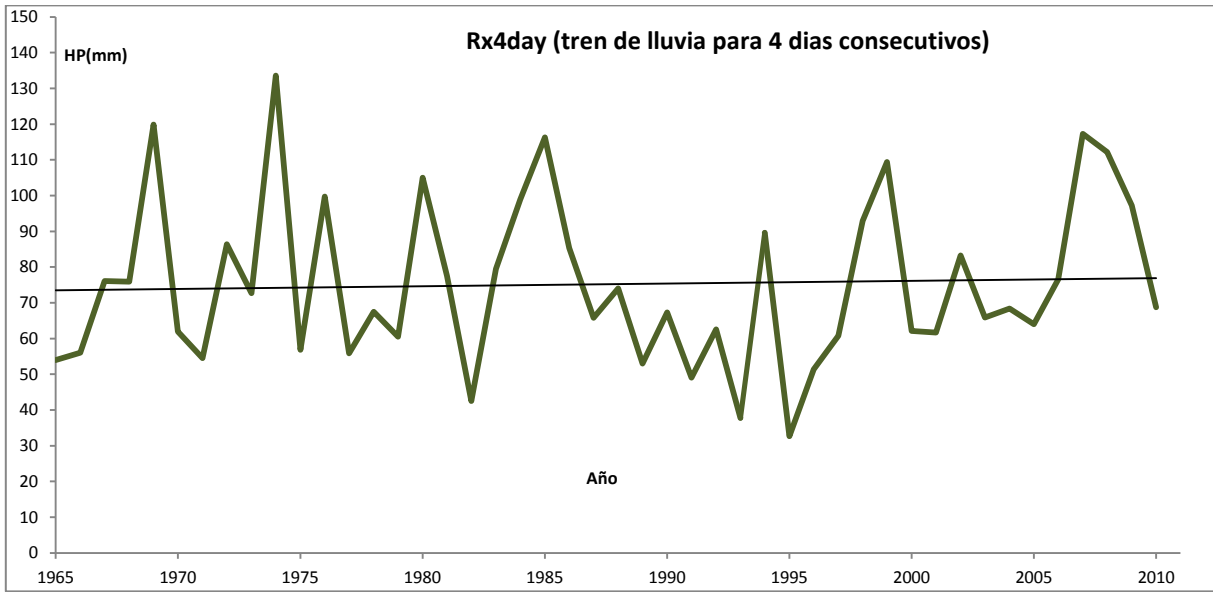


Figura 50. Serie anual  $R_{x4day}$  para la estación 15018 ubicada en el municipio de Ixtapaluca.

Las tendencias para el índice  $R_{x4day}$  por entidad se muestran en la Figura 51, obtenidas a partir de la lluvia media en cada municipio y delegación en estudio, en esta Figura se pueden observar donde se han presentado cambios en las laminas máximas de lluvia acumulada durante cuatro días consecutivos ocurrida en un año. Las tendencias pueden estar dirigidas hacia el incremento o decremento en la lámina de lluvia acumulada en cuatro días o bien, mostrar tendencias nulas, es decir no se aprecian cambios en los patrones de las mismas.

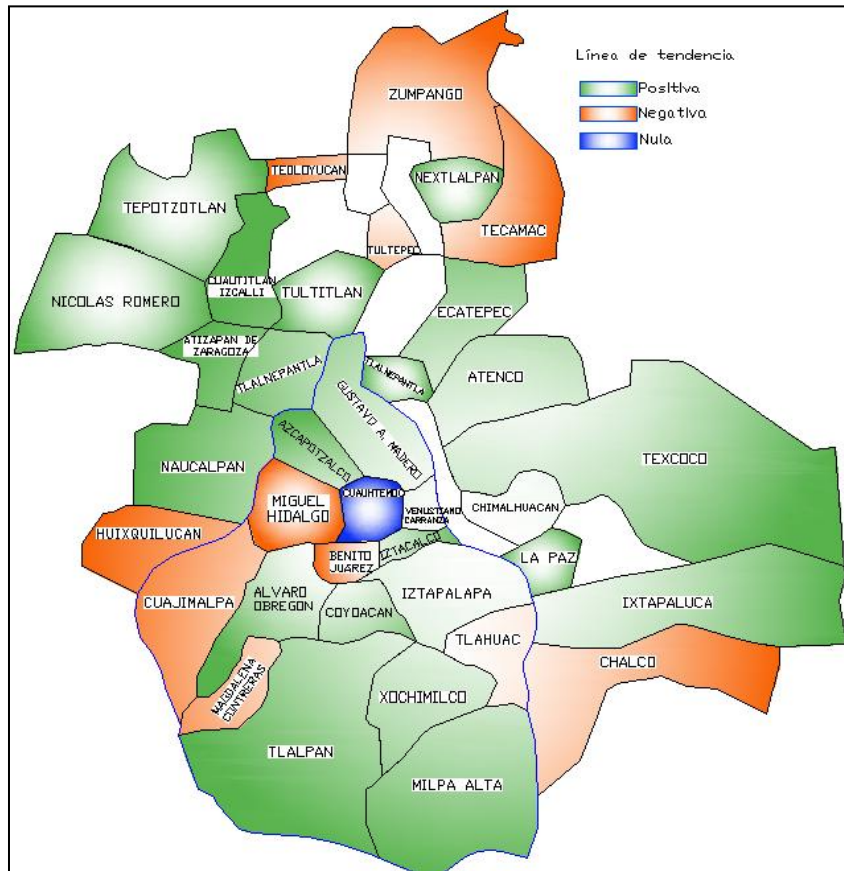


Figura 51. Tendencias de la serie anual  $R_{x4day}$  para las entidades en estudio

### Índice $R_{5day}$

Este índice corresponde los trenes de lluvia de cinco días consecutivos. En la Figura 52 se muestran los resultados del cálculo de este índice así como la línea de tendencia para la estación 15092 perteneciente al municipio de Zumpango, los resultados completos para este índice se incluyen en el Anexo A de este trabajo.

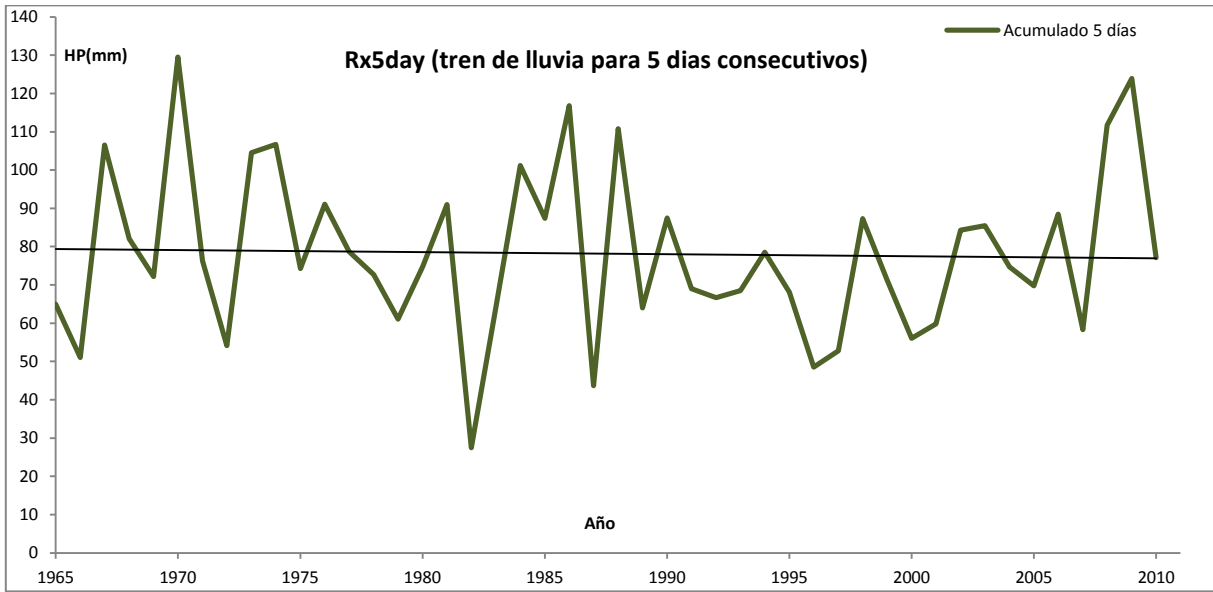


Figura 52. Serie anual  $R_{x5day}$  para la estación 15092 ubicada en el municipio de Zumpango.

Las tendencias para el índice  $R_{x5day}$  por entidad se muestran en la Figura 53, obtenidas a partir de la lluvia media en cada municipio y delegación en estudio, en esta Figura se pueden observar donde se han presentado cambios en las laminas máximas de lluvia acumulada durante cinco días consecutivos ocurrida en un año. Las tendencias pueden estar dirigidas hacia el incremento o decremento en la lámina de lluvia acumulada en cinco días o bien, mostrar tendencias nulas, es decir no se aprecian cambios en los patrones de las mismas.

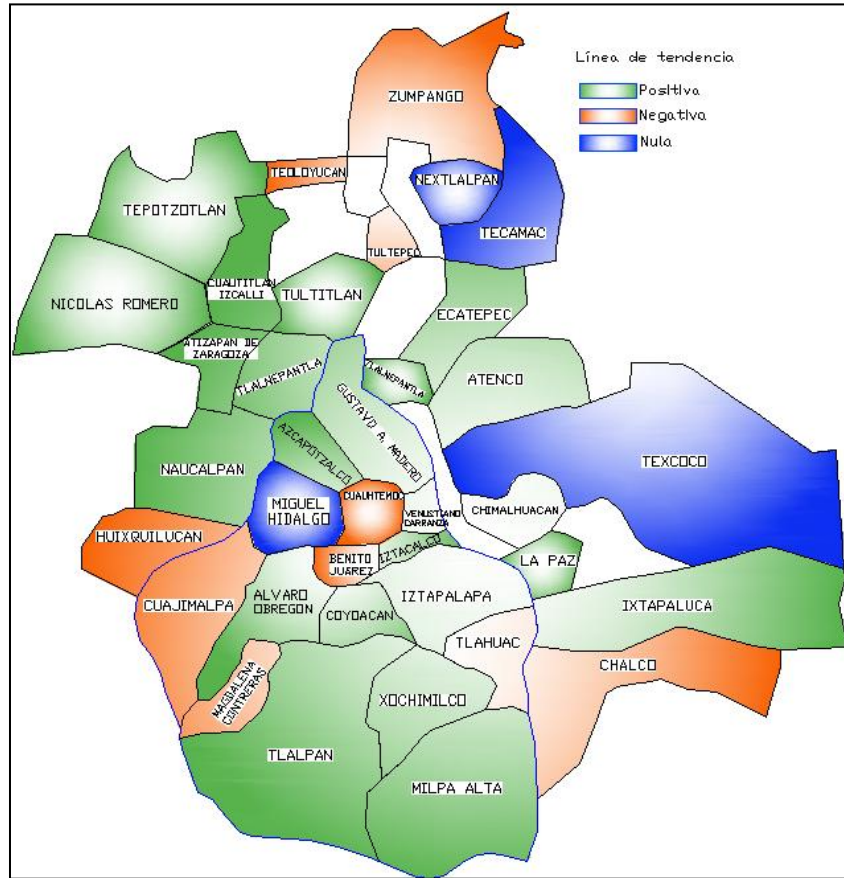


Figura 53. Tendencias de la serie anual  $R_{x5day}$  para las entidades en estudio

### Índice $R_{6day}$

Este índice corresponde los trenes de lluvia de seis días consecutivos. En la Figura 54 se muestran los resultados del cálculo de este índice así como la línea de tendencia para la estación 15129 perteneciente al municipio de Tultepec, los resultados completos para este índice se incluyen en el Anexo A de este trabajo.

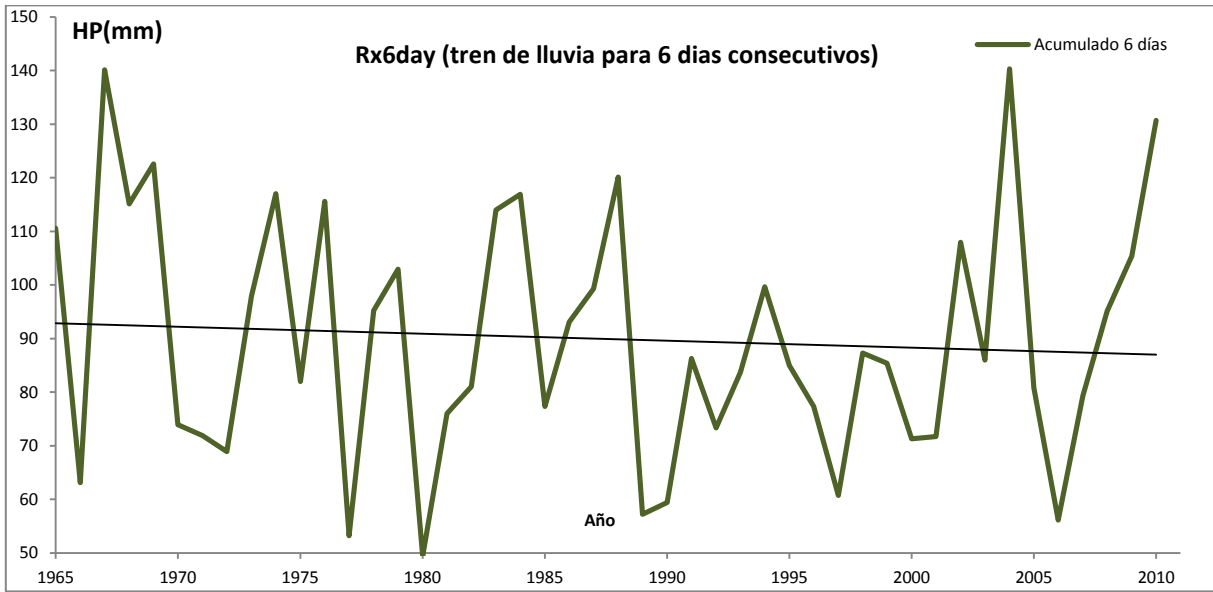


Figura 54. Serie anual  $R_{x6day}$  para la estación 15129 ubicada en el municipio de Tultepec.

Las tendencias para el índice  $R_{x6day}$  por entidad se muestran en la Figura 55, obtenidas a partir de la lluvia media en cada municipio y delegación en estudio, en esta Figura se pueden observar donde se han presentado cambios en las laminas máximas de lluvia acumulada durante seis días consecutivos ocurrida en un año. Las tendencias pueden estar dirigidas hacia el incremento o decremento en la lámina de lluvia acumulada en seis días o bien, mostrar tendencias nulas, es decir no se aprecian cambios en los patrones de las mismas.

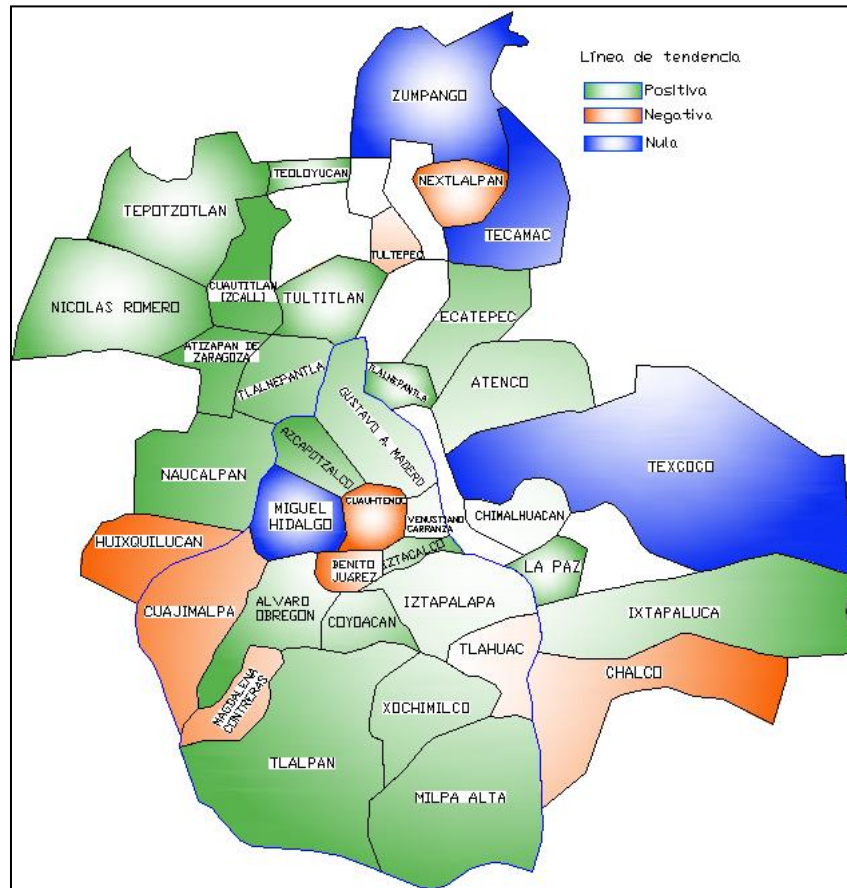


Figura 55. Tendencias de la serie anual  $R_{x6day}$  para las entidades en estudio

### **Índice $R_{7day}$**

Este índice corresponde los trenes de lluvia de siete días consecutivos. En la Figura 56 se muestran los resultados del cálculo de este índice así como la línea de tendencia para la estación 15098 perteneciente al municipio de Cuautitlán Izcalli, los resultados completos para este índice se incluyen en el Anexo A de este trabajo.

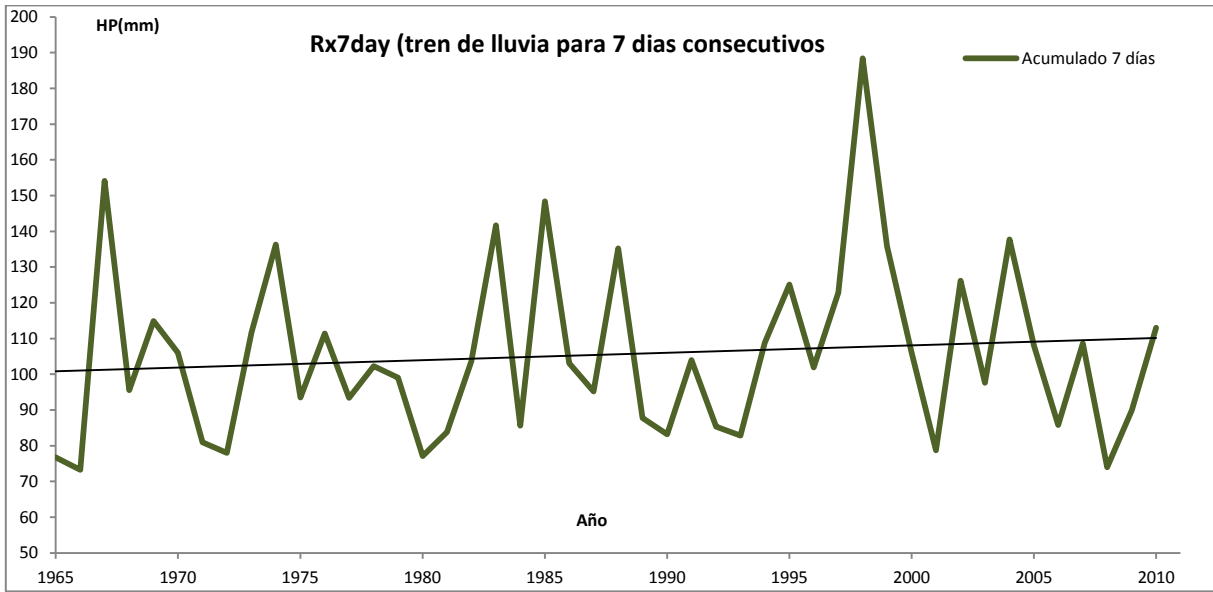


Figura 56. Serie anual  $R_{x7day}$  para la estación 15098 ubicada en el municipio de Cuautitlán Izcalli.

Las tendencias para el índice  $R_{x7day}$  por entidad se muestran en la Figura 57, obtenidas a partir de la lluvia media en cada municipio y delegación en estudio, en esta Figura se pueden observar donde se han presentado cambios en las laminas máximas de lluvia acumulada durante siete días consecutivos ocurrida en un año. Las tendencias pueden estar dirigidas hacia el incremento o decremento en la lámina de lluvia acumulada en siete días o bien, mostrar tendencias nulas, es decir no se aprecian cambios en los patrones de las mismas.

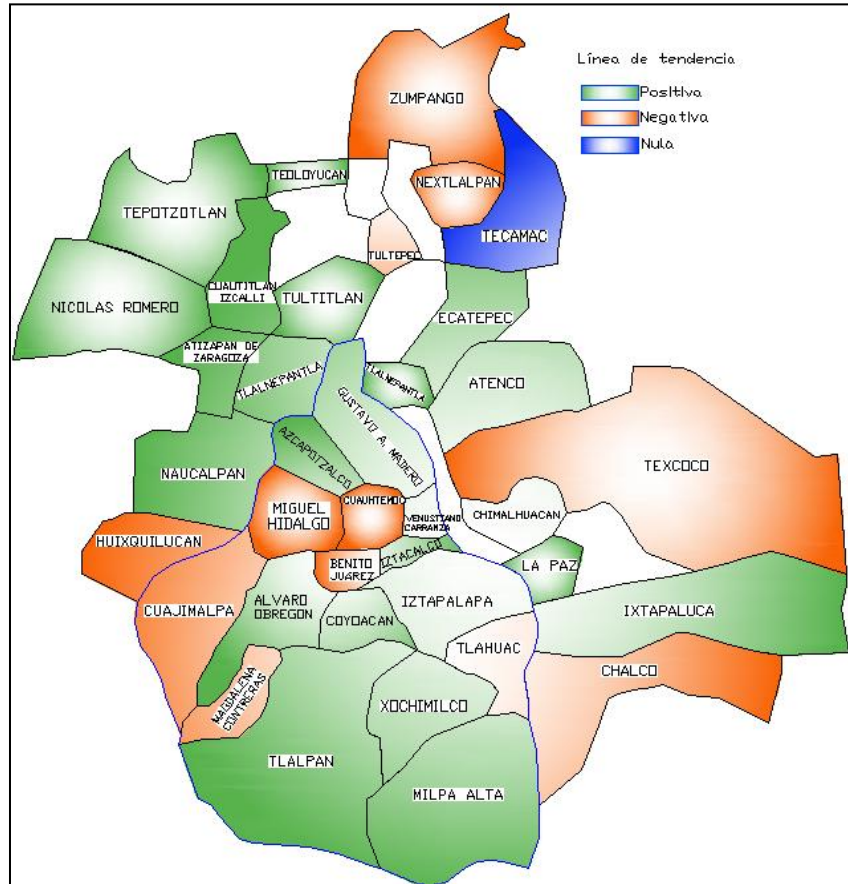


Figura 57. Tendencias de la serie anual  $R_{x7day}$  para las entidades en estudio.

### *Índice $R_{8day}$*

Este índice corresponde los trenes de lluvia de ocho días consecutivos. En la Figura 58 se muestran los resultados del cálculo de este índice así como la línea de tendencia para la estación 9013 perteneciente a la delegación Venustiano Carranza, los resultados completos para este índice se incluyen en el Anexo A de este trabajo.



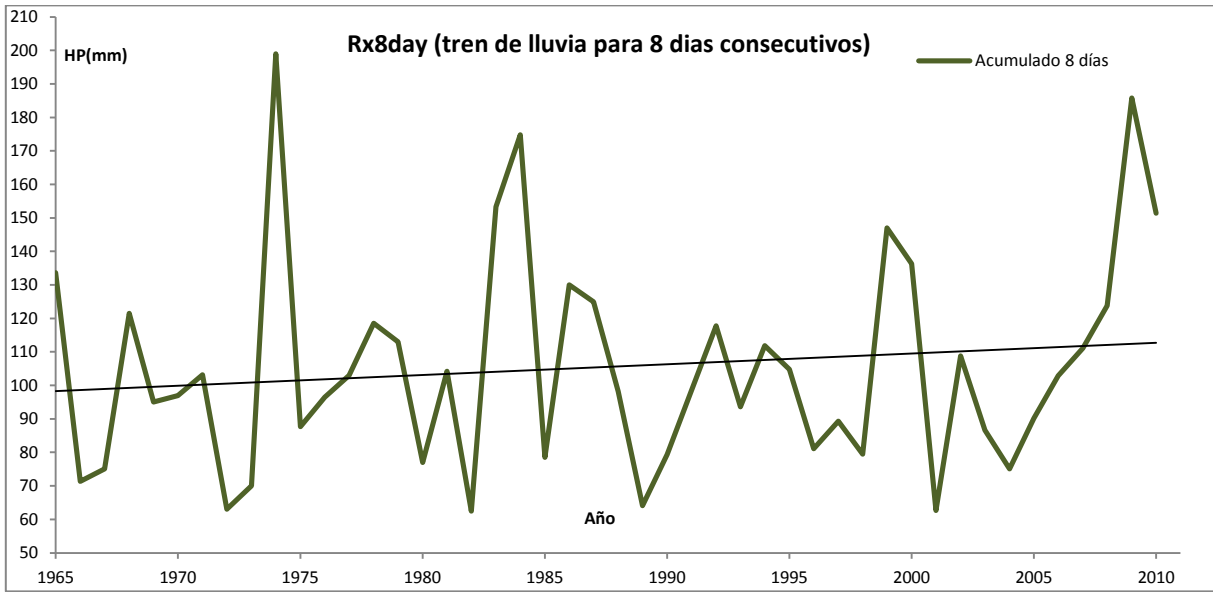


Figura 58. Serie anual  $R_{x8day}$  para la estación 9013 ubicada en la delegación Venustiano Carranza.

Las tendencias para el índice  $R_{x8day}$  por entidad se muestran en la Figura 59, obtenidas a partir de la lluvia media en cada municipio y delegación en estudio, en esta Figura se pueden observar donde se han presentado cambios en las laminas máximas de lluvia acumulada durante ocho días consecutivos ocurrida en un año. Las tendencias pueden estar dirigidas hacia el incremento o decremento en la magnitud de los trenes de lluvia para ocho días o bien, mostrar tendencias nulas, es decir no se aprecian cambios en los patrones de las mismas.

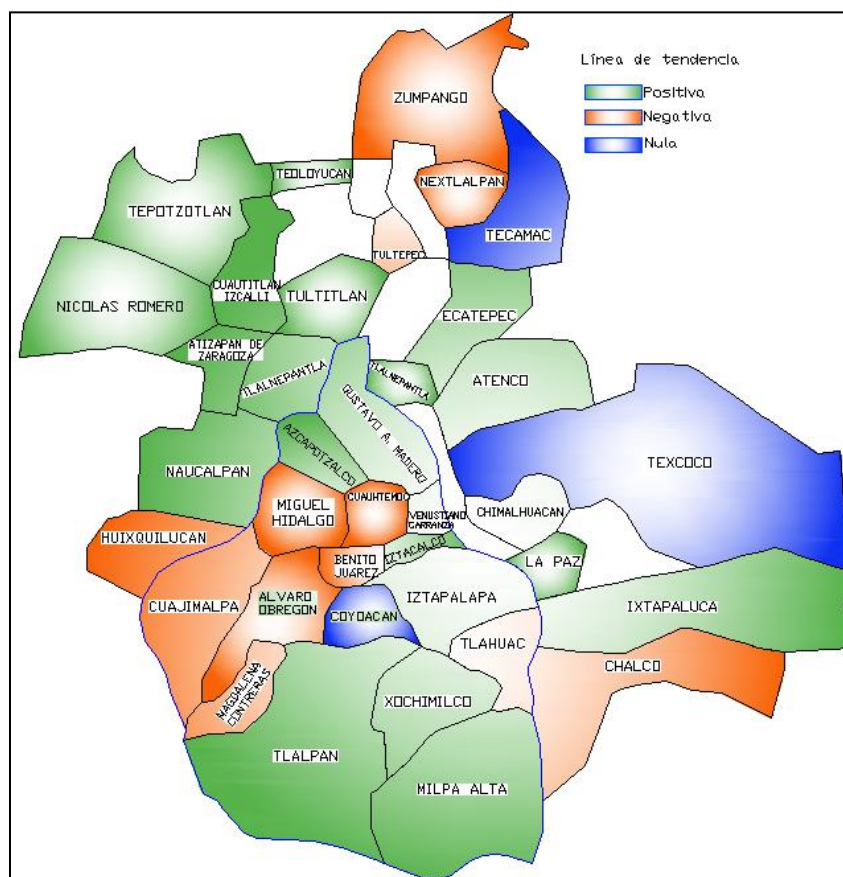


Figura 59. Tendencias de la serie anual  $R_{x8day}$  para las entidades en estudio.

### *Índice $R_{9day}$*

Este índice corresponde los trenes de lluvia de nueve días consecutivos. En la Figura 60 se muestran los resultados del cálculo de este índice así como la línea de tendencia para la estación 9026 perteneciente a la delegación Iztapalapa, los resultados completos para este índice se incluyen en el Anexo A de este trabajo.

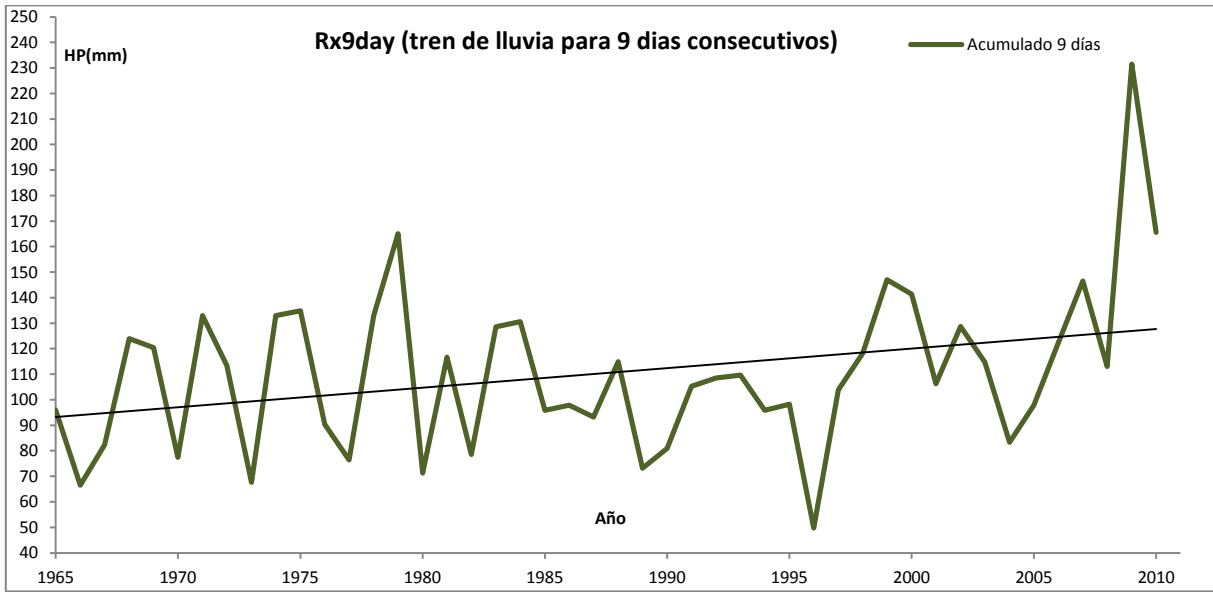


Figura 60. Serie anual  $R_{x9day}$  para la estación 9026 ubicada en la delegación Iztapalapa.

Las tendencias para el índice  $R_{x9day}$  por entidad se muestran en la Figura 61, obtenidas a partir de la lluvia media en cada municipio y delegación en estudio, en esta Figura se pueden observar donde se han presentado cambios en las laminas máximas de lluvia acumulada durante nueve días consecutivos ocurrida en un año. Las tendencias pueden estar dirigidas hacia el incremento o decremento en la magnitud de los trenes de lluvia para nueve días o bien, mostrar tendencias nulas, es decir no se aprecian cambios en los patrones de las mismas.

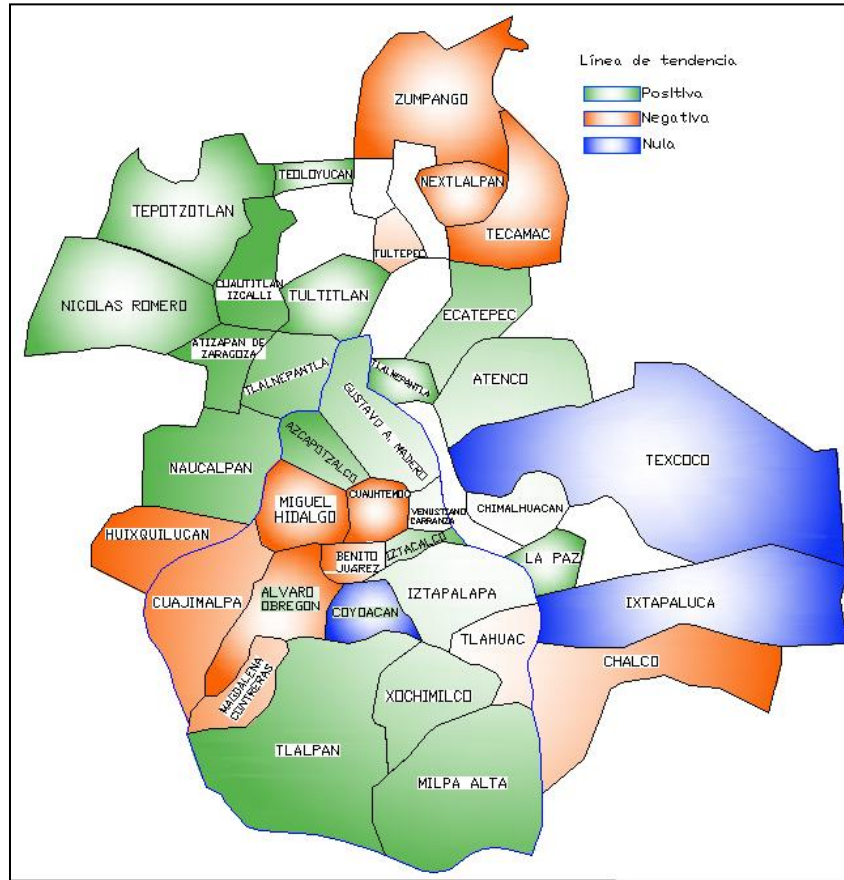


Figura 61. Tendencias de la serie anual  $R_{x9day}$  para las entidades en estudio.

**Índice  $R_{10day}$**

Este índice corresponde los trenes de lluvia de diez días consecutivos. En la Figura 62 se muestran los resultados del cálculo de este índice así como la línea de tendencia para la estación 9071 perteneciente a la delegación Coyoacán, los resultados completos para este índice se incluyen en el Anexo A de este trabajo.

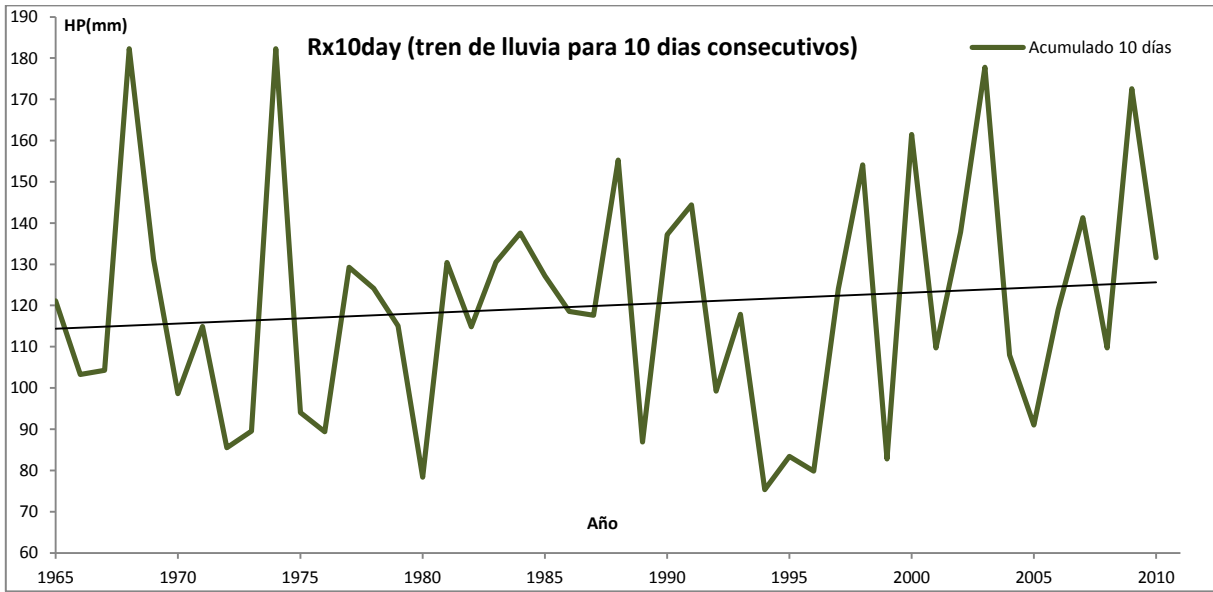


Figura 62. Serie anual  $R_{x10day}$  para la estación 9071 ubicada en la delegación Coyoacán.

Las tendencias para el índice  $R_{x10day}$  por entidad se muestran en la Figura 63, obtenidas a partir de la lluvia media en cada municipio y delegación en estudio, en esta Figura se pueden observar donde se han presentado cambios en las laminas máximas de lluvia acumulada durante diez días consecutivos ocurrida en un año. Las tendencias pueden estar dirigidas hacia el incremento o decremento en la magnitud de los trenes de lluvia para diez días o bien, mostrar tendencias nulas, es decir no se aprecian cambios en los patrones de las mismas.

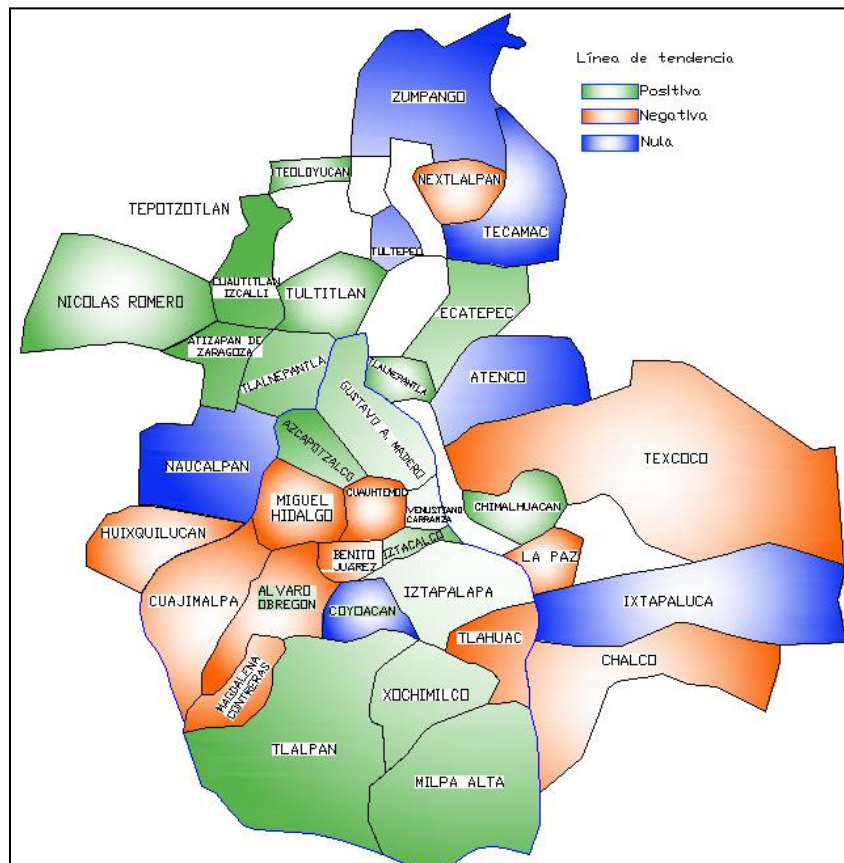


Figura 63. Tendencias de la serie anual  $R_{x10day}$  para las entidades en estudio.

## **CAPITULO V**

### **CÁLCULO DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO**

El dimensionamiento de las estructuras hidráulicas en zonas donde no existen registros hidrométricos, como lo son las áreas urbanas, requiere de la estimación de la tormenta de diseño. De esta manera, la tormenta de diseño es la entrada al sistema hidrológico y el escurrimiento, la respuesta, obtenido por algún método lluvia-escurrimiento.

Debido a que la intensidad de una tormenta se distribuye de diferente manera en el tiempo, desde su inicio hasta su término, y al hecho de que cuando se calcula una estructura hidráulica ésta se dimensiona para un gasto pico asociado a un periodo de retorno, se construyen las curvas intensidad-duración-periodo de retorno (I-D-T).

Las Curvas I-D-T representan la relación entre las variables que definen la precipitación: la intensidad (mm/h) que es el cociente de la lámina de lluvia acumulada entre la duración de la tormenta, periodo de duración el cual es un periodo de tiempo dentro de la duración de la tormenta y regularmente depende del tiempo de concentración de la

cuenca en estudio, periodo de retorno el cual es el intervalo de tiempo promedio entre los eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño.

Para conocer la distribución temporal (intensidad) de una tormenta actualmente existen diferentes instrumentos de medición desde los pluviógrafos hasta estaciones automatizadas que envían información en tiempo real a un centro de datos. Este tipo de instrumentos en nuestro país es escaso y donde existe tiene relativamente poco tiempo funcionando. Los registros de precipitación acumulada cada 24 horas medidos con pluviómetro son los más comunes y con mayores intervalos de medición en nuestro país y en la mayor parte del mundo, por lo cual desde mediados del siglo pasado se comenzaron a desarrollar diversas metodologías para obtener las intensidades de lluvia para duraciones menores a 24 horas a partir de registros de pluviómetros.

Entre las metodologías más utilizadas se encuentran las de F.C. Bell, D.M. Hershfield, LL. Weiss, W.T. Wilson y B.M. Reich quienes desarrollaron sus investigaciones en Estados Unidos demostrando que estas se pueden aplicar en distintos climas en diferentes partes del mundo.

Ahora bien, debido a que los datos de precipitación de lluvia obtenidos con pluviómetro se miden en intervalos de observación fijos (por ejemplo cada 24 horas de 8:00 am– 8:00 am) no se pueden conocer las cantidades máximas verdaderas durante el periodo deseado. Al respecto la Organización Meteorológica Mundial señala que:

"Estudios efectuados a partir de millares de años- estación de datos de precipitación de lluvia indican que, multiplicando por 1.13 las cantidades máximas anuales de lluvias horarias o diarias de un único intervalo de observación fijo comprendido entre 1 y 24 horas, se obtendrán valores cercanos a los obtenidos mediante un análisis de máximos verdaderos."<sup>11</sup>

Así mismo la Organización Meteorológica Mundial en el mismo documento recomienda lo siguiente:

"Para duraciones inferiores a 24 horas conviene estimar los valores de la frecuencia de la lluvia en una hora a partir de los valores de 24 horas y así interpolar las duraciones intermedias y extrapolar

---

<sup>11</sup> Guía de prácticas hidrológicas Volumen II Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas. Organización Meteorológica Mundial. OMM 168.



las duraciones inferiores a una hora. La lluvia de una hora con período de retorno de dos años está relacionada con la lluvia de 24 horas con periodo de retorno de dos años, de acuerdo con el promedio anual de días con tormentas, mediante estudios que incluyeron una amplia variedad de climas."

De acuerdo a lo mencionado anteriormente a continuación se describe el procedimiento utilizado para obtener las curvas I-D-T, empleando el método propuesto por el U.S. Weather Bureau y ampliado en 1963 por B.M. Reich <sup>12</sup>, el cual ha demostrado su efectividad en el cálculo de duraciones menores a 24 horas.

- i. Se reúnen los registros anuales disponibles de precipitación diaria medida con pluviómetro y se obtienen los máximos anuales de cada año de registro. Es importante mencionar que tanto la calidad como la cantidad de información es vital para obtener resultados confiables.
- ii. A la serie de valores de lluvia máximos anuales se les multiplica por 1.13 para obtener las láminas de lluvia máximas diarias anuales.
- iii. Se realiza el análisis de frecuencias de las series de máximos diarias anuales ajustadas en el paso anterior y se ajusta al mejor modelo de distribución de frecuencia disponible. Como resultado de esto se obtienen las magnitudes de lluvia asociadas a diferentes periodos de retorno. El periodo de retorno se elige de acuerdo a la importancia de la estructura que se diseñará, sin embargo, se debe determinar necesariamente el evento de lluvia para un periodo de retorno de  $T_r = 2$  años y una duración de  $d = 24$  horas. En lo que respecta a las distribuciones de probabilidad las más utilizadas son: distribución normal, lognormal, Gamma, Log Pearson, Gumbel, General de Valores Extremos y Gumbel Mixta, sin embargo existen otras y se recomienda consultar la bibliografía de este trabajo para abundar en el tema.
- iv. La figura 64 es una relación empírica por medio de la cual se estima la lluvia de una hora y periodo de retorno de 2 años en ausencia de registros pluviográficos.

---

<sup>12</sup> Short-Duration Rainfall intensity estimates and other design aids for regions of sparse data.

Para esta estimación se requiere conocer el número de días con lluvia apreciable ( $H_p > 1 \text{ mm}$ ) y la lluvia media anual de las máximas diarias del registro disponible.

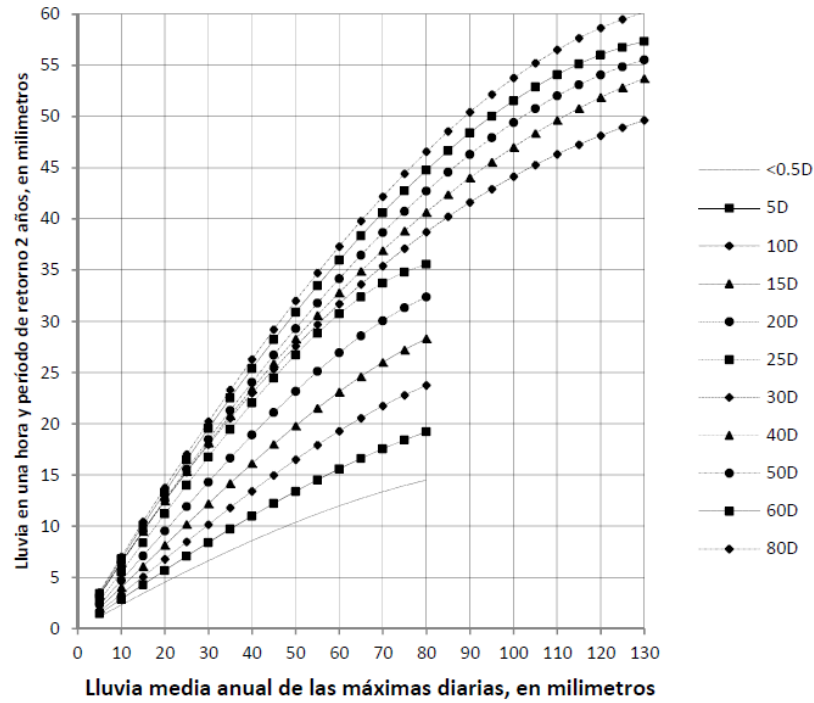


Figura 64. Relación empírica para estimar la lluvia de una hora y periodo de retorno de 2 años, en ausencia de registros pluviográficos. D= días con lluvia igual o superior a 1 mm.

- v. Hasta aquí se conocen los valores  $H_p^{tr=2}_{d=24 \text{ hrs}}$  y  $H_p^{tr=2}_{d=1 \text{ hr}}$ . El siguiente paso es calcular el coeficiente  $R$ , el cual relaciona la lluvia con periodo de retorno de 2 años para las duraciones de 1 y 24 horas, esta relación se ha demostrado permanece constante con cualquier periodo de retorno.

$$R = \frac{H_p^{Tr=2 \text{ años}}_{D=1 \text{ hr}}}{H_p^{Tr=2 \text{ años}}_{D=24 \text{ hrs}}}$$

El coeficiente  $R$  sirve para obtener la altura de lámina de lluvia con duración de una hora para cualquier periodo de retorno. De esta manera basta con multiplicar los eventos de lluvia obtenidos en el análisis de frecuencia para duraciones de 24 horas

y distintos periodos de retorno para obtener la lluvia de 1 hora asociada al periodo de retorno considerado.

- vi. Si se desea calcular duraciones mayores a 1 hora y hasta 10 días, se debe calcular la altura de lluvia de una hora haciendo uso del coeficiente R, calculado anteriormente, además se usa la lluvia con duración de 24 horas,  $d=1$  hr y  $d= 24$  hrs, para el periodo de retorno de interés. En papel logarítmico, figura 65, se grafican los valores de las alturas de lluvia antes mencionadas y se traza una recta que une los puntos graficados y se interpola la duración que se esté buscando.

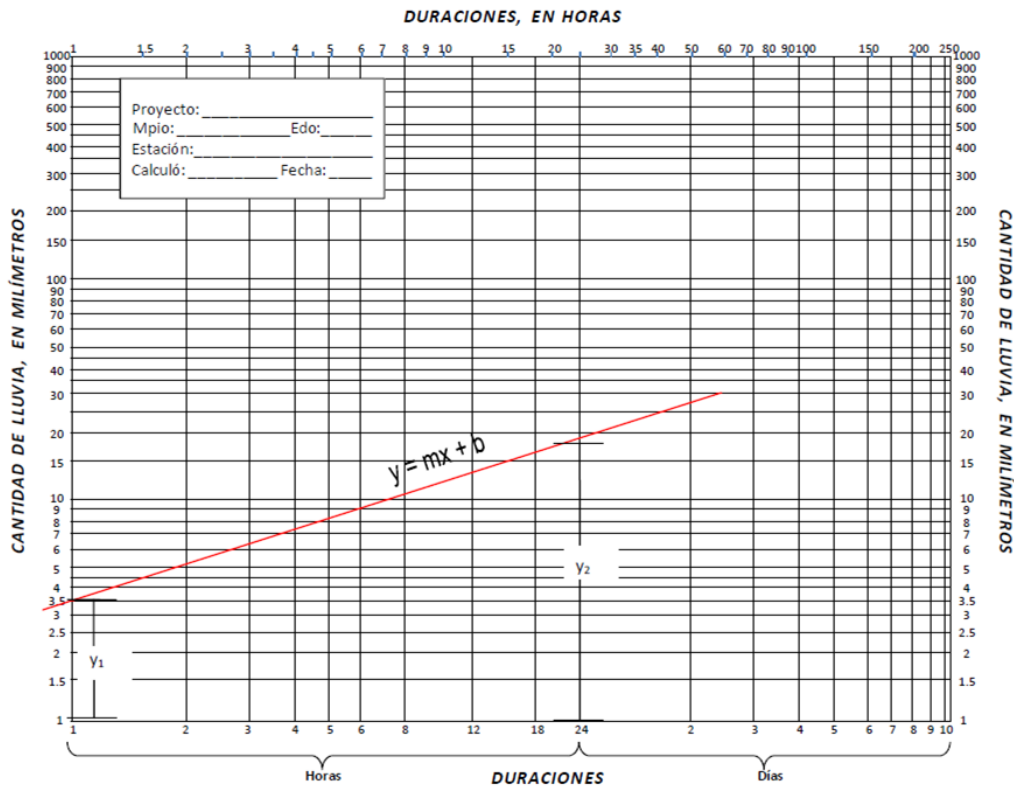


Figura 65. Papel logarítmico utilizado para realizar las interpolaciones de duraciones mayores a una hora hasta 10 días.

La solución analítica de la interpolación se realiza a partir de la ecuación de la recta, figura 65, como se describe a continuación: se utiliza la ecuación de la recta haciendo cambio de variables y aplicando logaritmos obteniendo la ecuación 18.

$$y = \frac{Hp_{24hr} - Hp_{1hr}}{\ln(24) - \ln(1)} * \ln(d) + Hp_{1hr} \dots\dots\dots(18)$$

vii. Cuando se requiere calcular una duración menor a una hora se emplean los coeficientes propuestos por la OMM en el reporte N.168 mostrados en la tabla 11.

Tabla 11. Coeficientes para interpolar lluvias con duraciones menores a una hora

<b>Duración (m)</b>	5	10	20	30	40	45	50	60
<b>Relación</b>	0.3	0.32	0.54	0.71	0.82	0.9	0.92	1

viii. Con la información obtenida en los pasos anteriores, alturas de precipitación asociadas a una duración y periodo de retorno se pueden construir las curvas Hp-D-Tr (Altura de precipitación- Duración- Periodo de Retorno).

ix. Las curvas I-D-T se obtienen a partir de las curvas Hp-D-Tr, al considerar la lluvia en función del tiempo, es decir la intensidad. La intensidad de la lluvia depende directamente de la altura de la lámina de lluvia y es directamente proporcional de la duración de la tormenta. La intensidad de lluvia se define formalmente de la siguiente manera:

$$I_d^{Tr} = \frac{Hp_d^{Tr}}{d} \dots\dots\dots(19)$$

Donde:

$I_d^{Tr}$  Es la intensidad de lluvia en mm/h para un periodo de retorno  $Tr$  en años y una duración  $d$  en horas.

$Hp_d^{Tr}$  Es la altura de precipitación en mm para un periodo de retorno  $Tr$  en años y una duración  $d$  en horas.

$d$  Duración de la tormenta en horas.

En la tabla 12 se presentan los resultados del análisis de frecuencias de los registros de precipitación cada 24 horas pertenecientes a la delegación Alvaro Obregón, los resultados completos se presentan en el anexo B de este trabajo.

Tabla 12. Eventos de diseño obtenidos del análisis de frecuencias para los registros de la delegación Alvaro Obregón.

Delegación	Estación	Distribución	Método	Tr (años)											EEA	Parámetro		
				1.1	2	5	10	20	50	100	500	1000	5000	10000		Ubicación	Escala	Forma
Alvaro Obregón	HP9019	General Valores Extremos	(M)	35.9	54.7	73.8	87.6	101.7	121.5	137.5	178.5	198.1	248.8	273.0	7.2	48.878	15.481	-0.092
Alvaro Obregón	HP9038	General Valores Extremos	(M-L)	33.5	49.9	64.9	74.8	84.3	96.6	105.9	127.3	136.5	157.9	167.1	2.4	45.046	13.198	-0.001
Alvaro Obregón	HP9039	General Valores Extremos	(M-L)	32.7	51.0	68.1	79.5	90.6	105.2	116.2	142.1	153.4	180.1	191.8	3.3	45.583	14.846	-0.014
Alvaro Obregón	HP9046	General Valores Extremos	(M-L)	35.9	56.9	76.4	89.6	102.3	118.9	131.6	161.2	174.2	204.8	218.2	3.1	50.654	17.005	-0.015

La figura 66 muestra el cálculo de las curvas I-D-T para la estación 9019 perteneciente a la delegación Alvaro Obregón los resultados completos se incluyen en el anexo B de este trabajo.

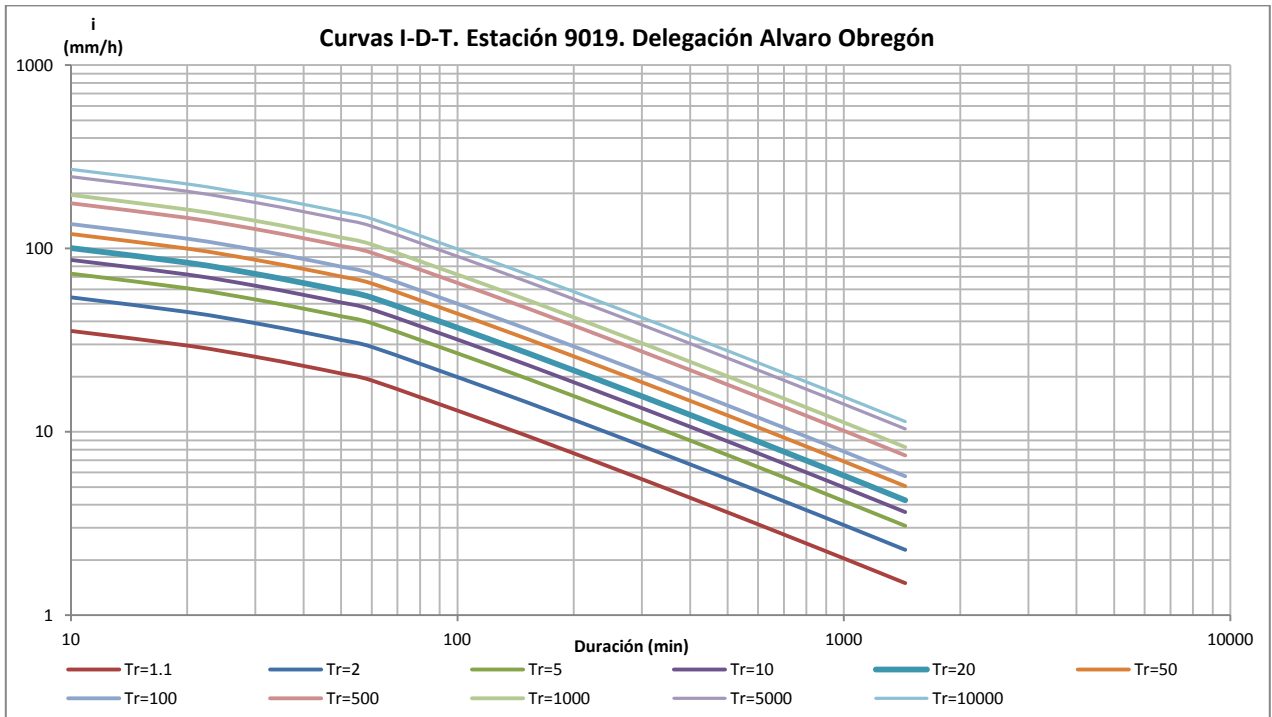


Figura 66. Curvas I-D-T estación 9019 perteneciente a la delegación Alvaro Obregón.

Como parte de los resultados de este trabajo se elaboraron las isoyetas de precipitación para las duraciones de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos, las cuales se presentan completas en el anexo C, en las figuras 67 a la 72 se muestran las isoyetas para el periodo de retorno de 100 años y las duraciones antes mencionadas.

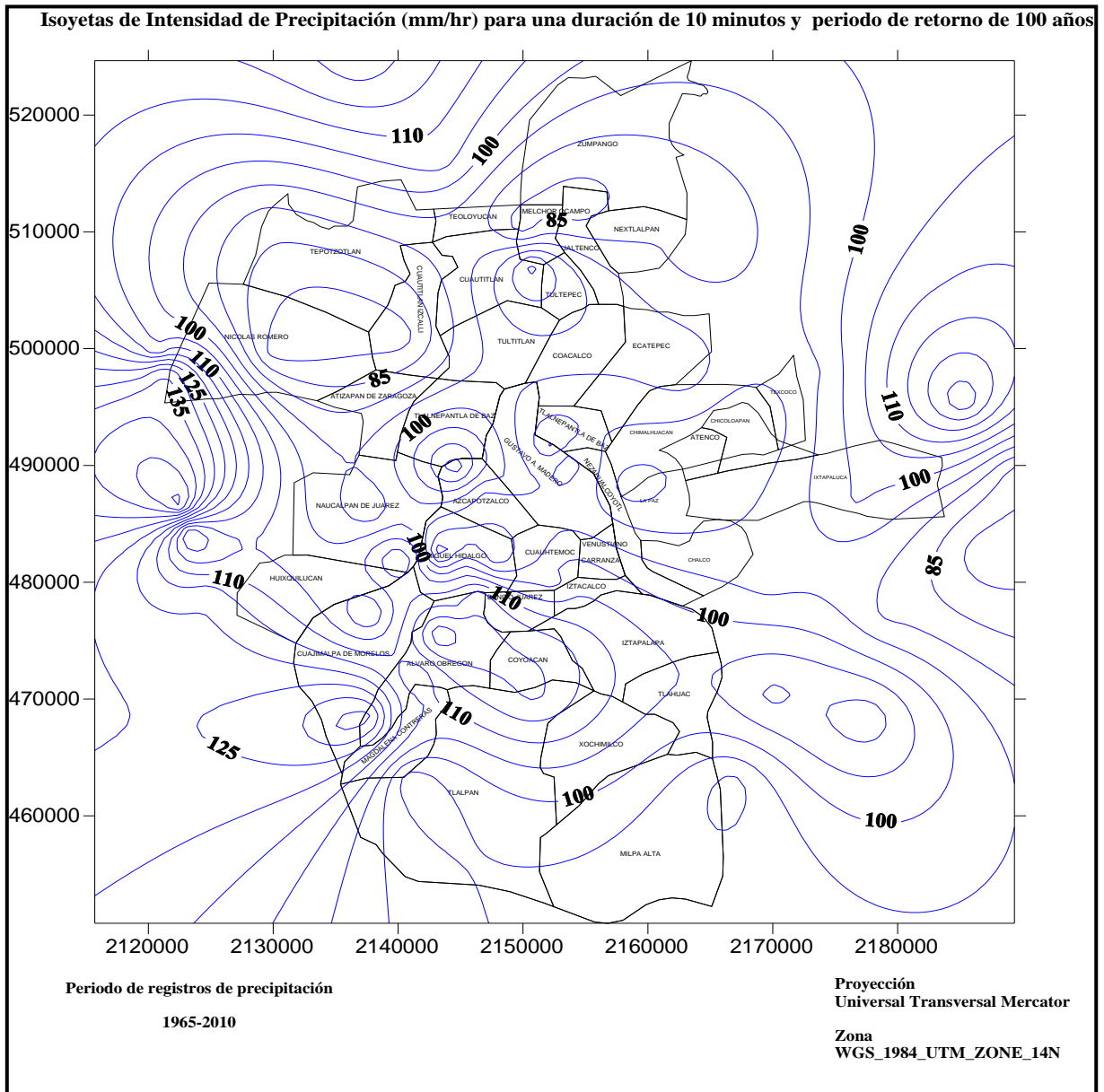


Figura 67. Isoyetas de precipitación para una duración de 10 minutos y periodo de retorno de 100 años elaborada para el área de estudio.

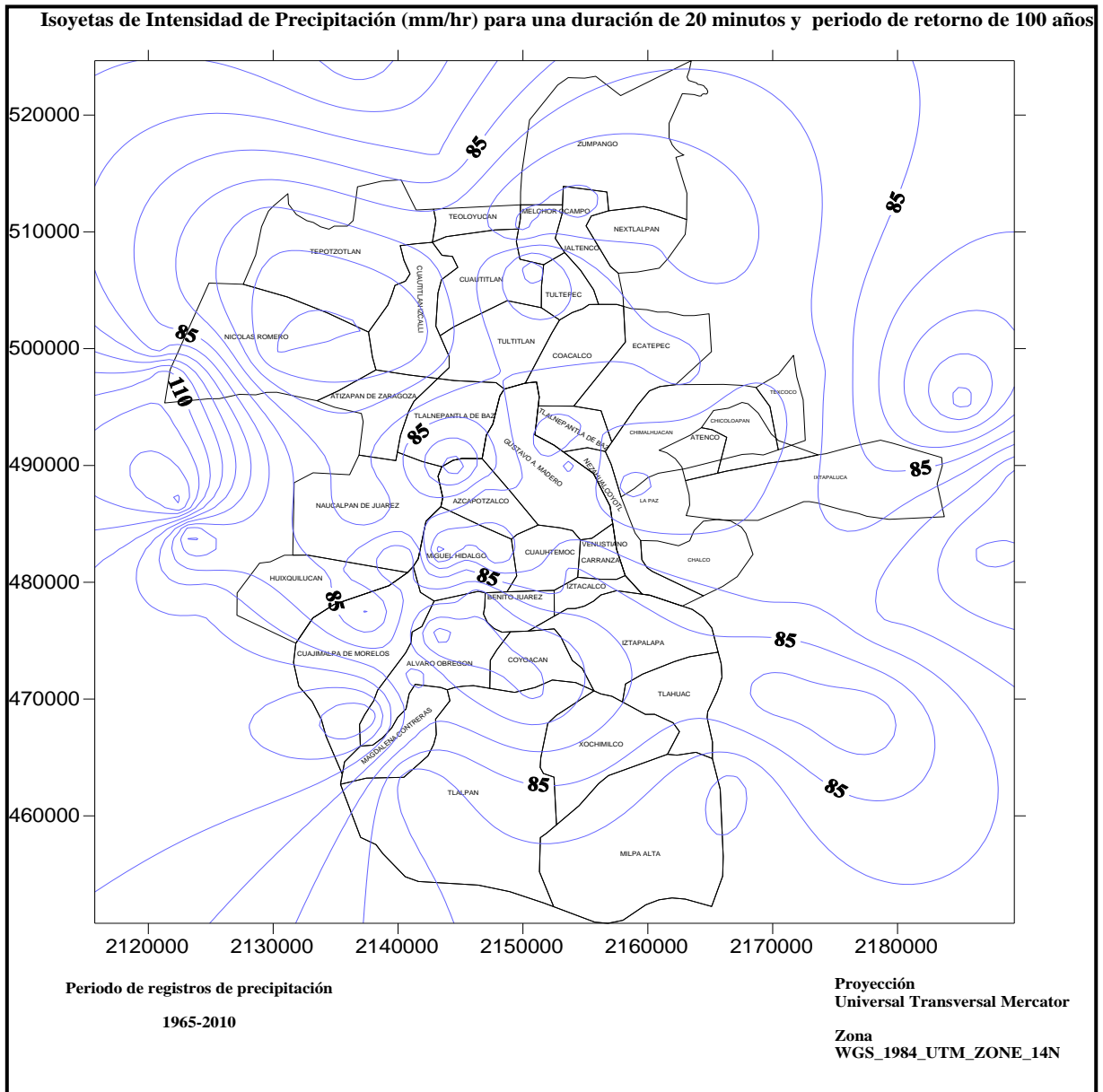


Figura 68. Isoyetas de precipitación para una duración de 20 minutos y periodo de retorno de 100 años elaborada para el área de estudio.



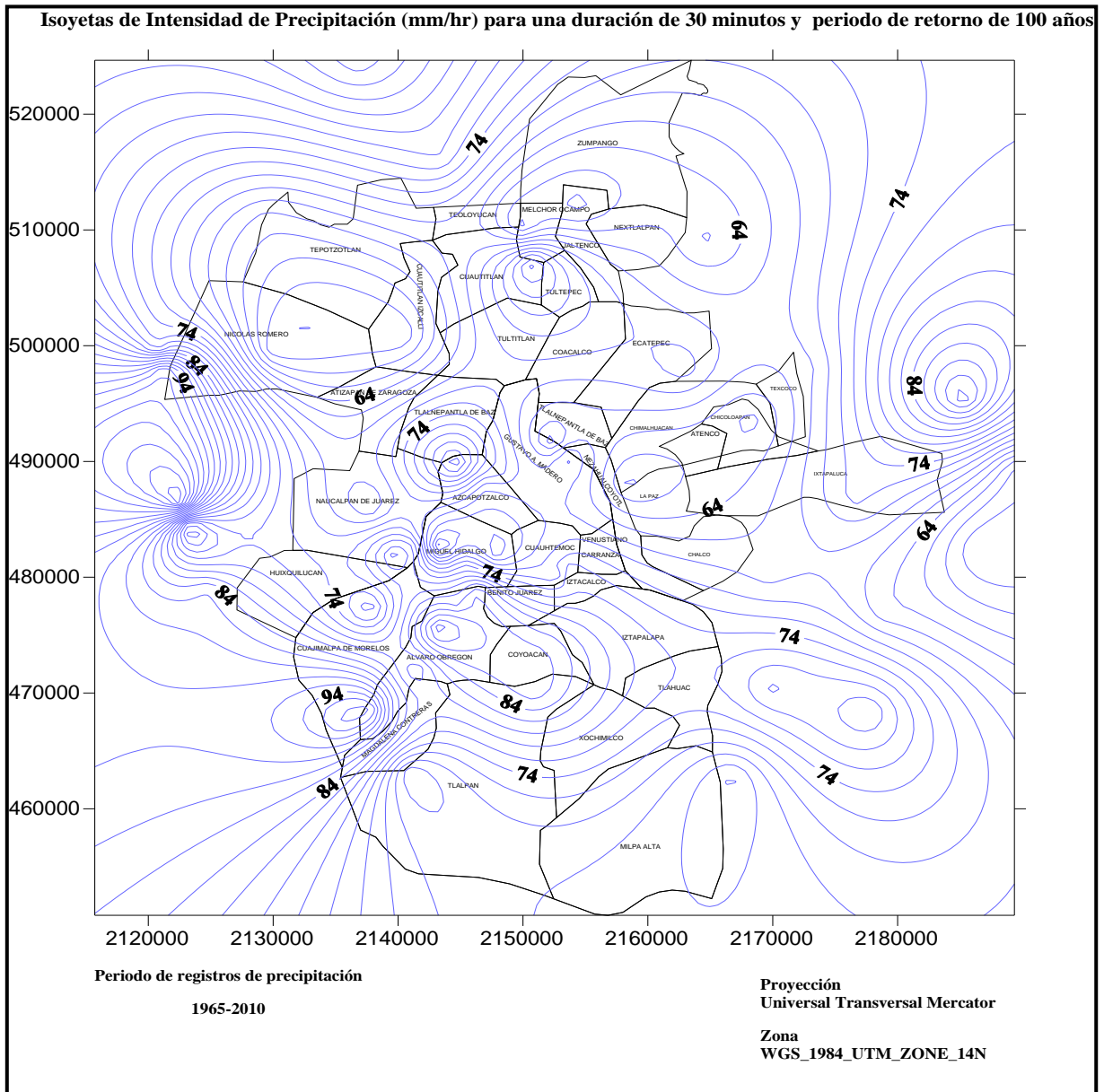


Figura 69. Isoyetas de precipitación para una duración de 30 minutos y periodo de retorno de 100 años elaborada para el área de estudio.

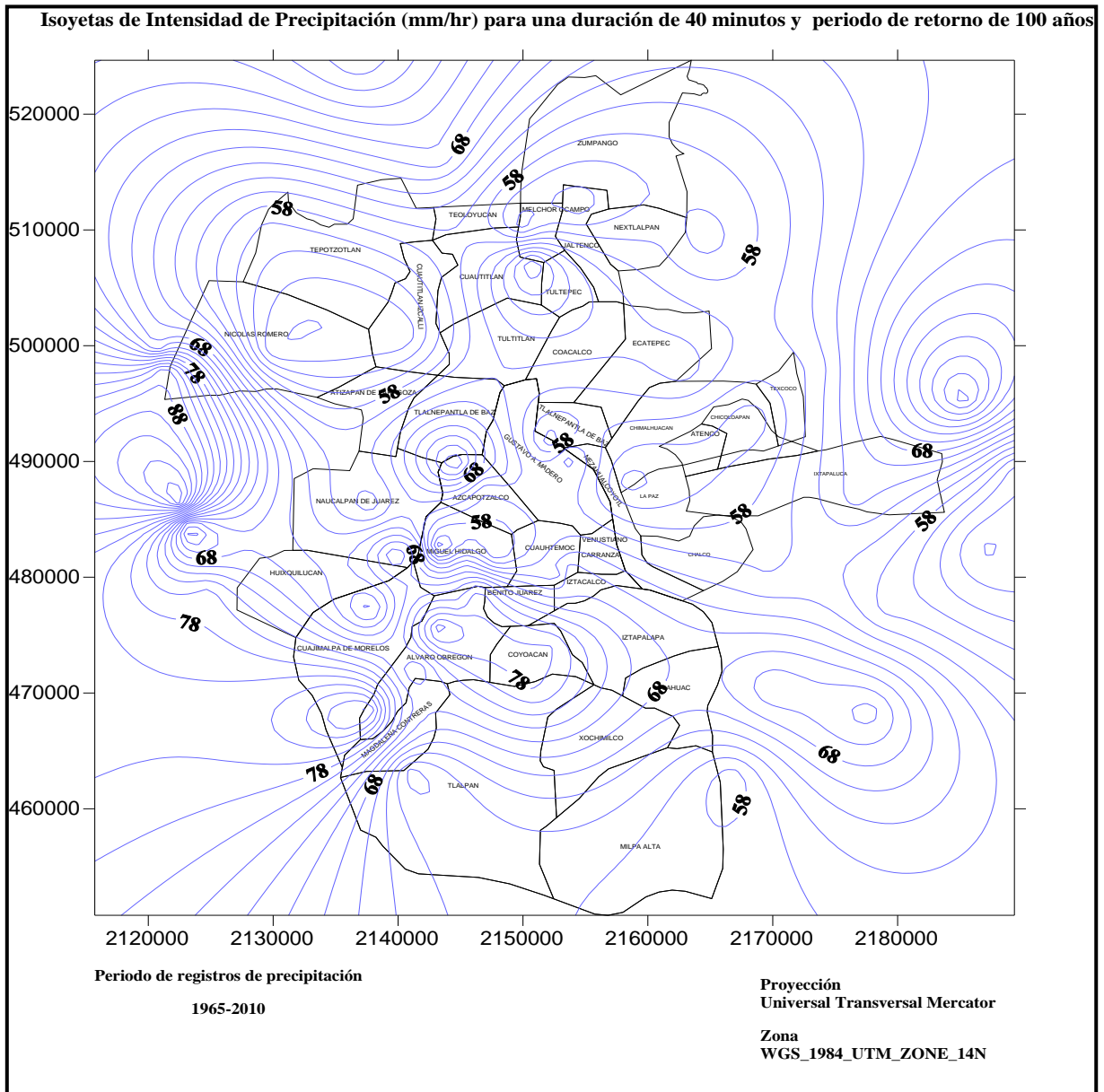


Figura 70. Isoyetas de precipitación para una duración de 40 minutos y periodo de retorno de 100 años elaborada para el área de estudio.

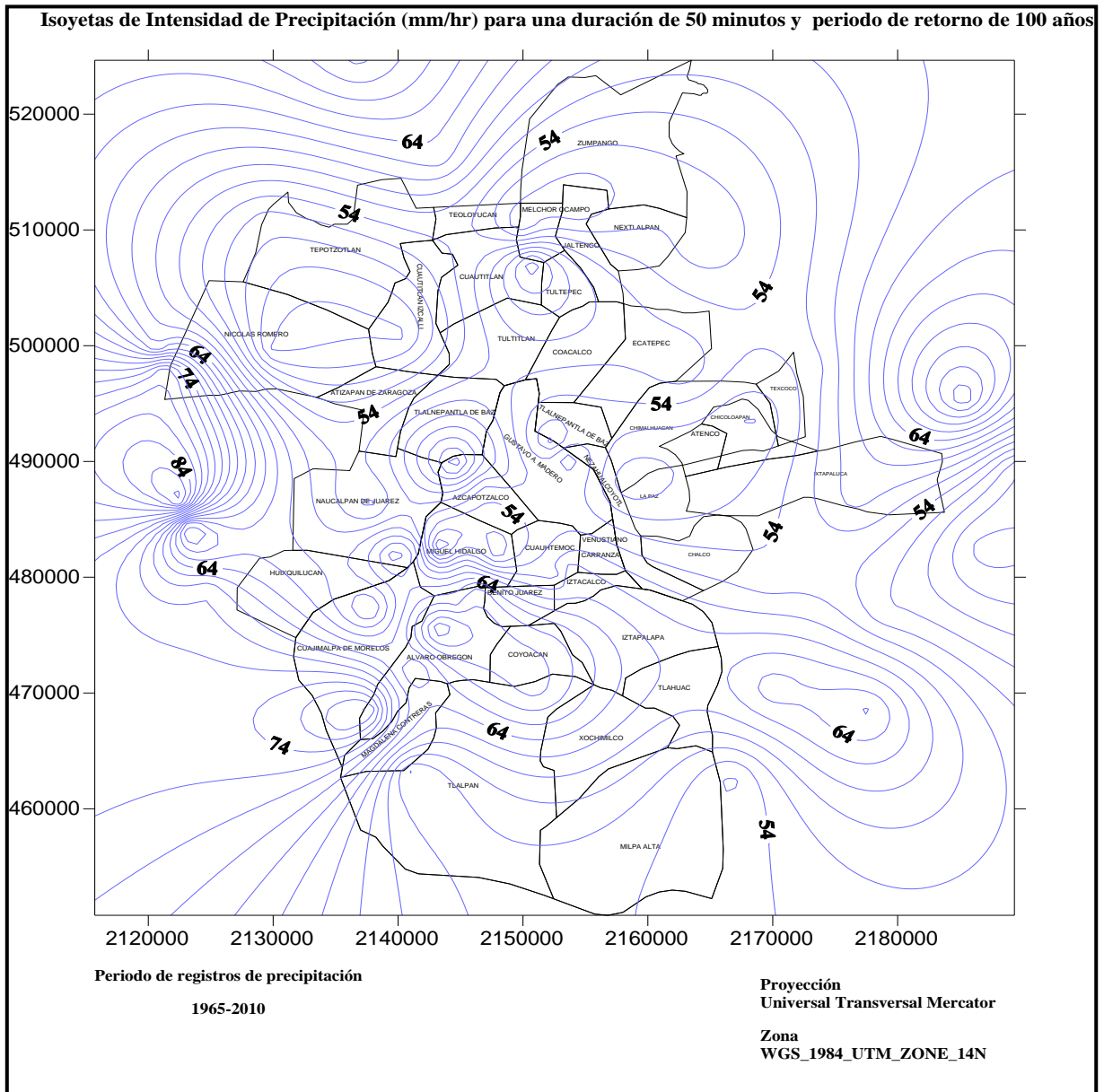


Figura 71. Isoyetas de precipitación para una duración de 50 minutos y periodo de retorno de 100 años elaborada para el área de estudio.

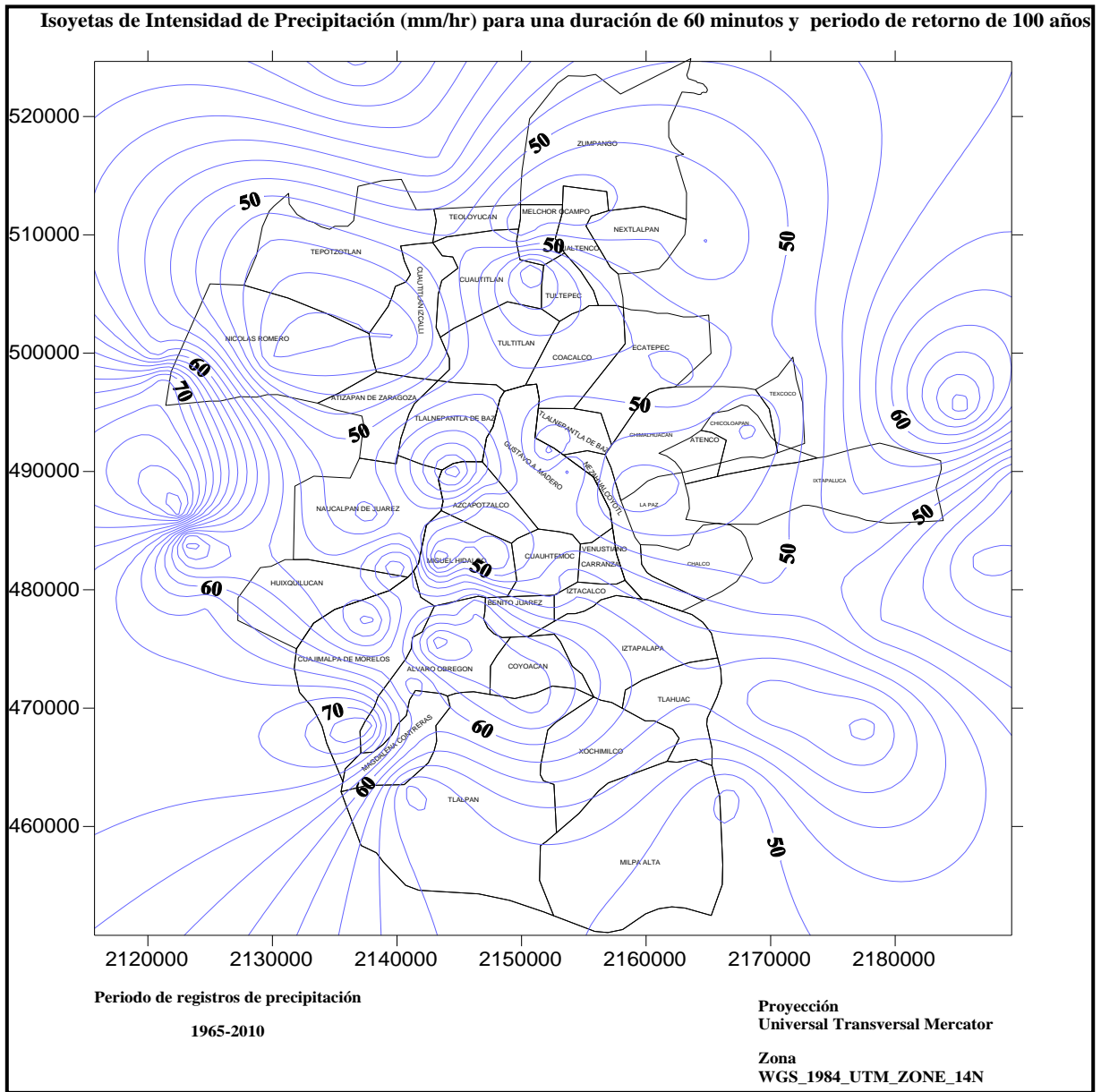


Figura 72. Isoyetas de precipitación para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 100 años elaborada para el área de estudio.

## **CAPÍTULO VI**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Se presenta el análisis de los resultados obtenidos en este trabajo, se hace la aclaración que los mismos son resultado del análisis de registros de precipitación con una longitud menor a la que se recomienda utilizar ( 46 años de 60 años). Por lo cual los resultados aquí presentados solo corresponden a al periodo de 1965- 2010.

En este trabajo se analizaron y completaron, con el método de Interpolación Inversa, los registros de precipitación de 58 estaciones climatológicas pertenecientes a 36 entidades ubicadas dentro del Valle de México: 20 municipios del estado de México y las 16 delegaciones del Distrito Federal. Se trabajó con un periodo común de registros de lluvia de 46 años (1965-2010) del cual se obtuvo la lluvia media de cada entidad.

De acuerdo al objetivo de este trabajo se calcularon los Índices de Cambio Climático para precipitación propuestos por la CONAGUA, para los 58 registros además de que también se calcularon los Índices para las 36 localidades estudiadas, partiendo del registro de lluvia media diaria obtenido para cada municipio y delegación analizadas.

De acuerdo al análisis de los resultados presentados en este trabajo se observan tendencias hacia el incremento o disminución de la cantidad anual de lluvia acumulada en varias de las entidades en estudio, así mismo se presentan entidades donde no existe tendencia observada en este patrón.

En lo que respecta a los resultados de los índices  $R_{nn}$  propuestos por la CONAGUA se observan posibles cambios en estos, bajo la reserva de la longitud de registros disponible . En la mayoría de las entidades estudiadas han aumentado o disminuido los días con lluvia al año, las lluvias ligeras, lluvias fuertes y lluvias intensas, en el caso de las lluvias torrenciales en el registro se tiene solo un evento en la delegación Xochimilco, comportándose en las demás entidades sin eventos registrados.

Como se puede analizar de los resultados obtenidos se presentan tres casos de interés en el comportamiento del patrón de precipitación en el Valle de México.

1. *La cantidad de lluvia anual acumulada presenta tendencia al aumento.* En este caso se observan incrementos en las tendencias del número de días con lluvia, sean precipitaciones ligeras, fuertes o intensas. En este caso también se pueden presentar disminuciones en los días con lluvia ligera, fuerte e intensa. Esto significa que la cantidad de lluvia acumulada anualmente esta incrementándose por efecto del aumento en alguno o varios de los índices mencionados anteriormente, aunque también se da el caso de que disminuya la tendencia de algún índice aumentando la cantidad de lluvia anual precipitada. Un claro ejemplo de este caso es la delegación Gustavo A. Madero en la cual se presenta tendencia al aumento de la cantidad de lluvia anual, manteniendo sin tendencia apreciable el número de días con lluvia al año. En lo que respecta a los días con lluvia ligera están disminuyendo mientras que el número de días con lluvia moderada y fuerte están incrementándose. Los días con lluvia intensa y torrencial no presentan tendencia alguna.

En la tabla 13, se presenta el análisis de los índices climáticos en las entidades donde la cantidad anual de lluvia acumulada está aumentando.

Tabla 13. Entidades con tendencia al incremento de la cantidad de lluvia anual acumulada.

TENDENCIAS DE LOS INDICES DE CAMBIO CLIMATICO								Conclusiones
Municipio/ Delegación	HP acumulada	R <sub>00</sub>	R <sub>05</sub>	R <sub>520</sub>	R <sub>2070</sub>	R <sub>20150</sub>	R <sub>m150</sub>	
Villa Nicolas Romero	+	+	-	+	+	nula	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual, sin embargo están disminuyendo el número de días con lluvia. El número de días con lluvia ligera están disminuyendo y los eventos de lluvia <i>media y fuerte están aumentando.</i>
Nextlalpan	+	-	+	-	+	nula	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual así como el número de días con lluvia. El número de días con lluvia media está disminuyendo. El número de eventos de lluvia <i>ligera y fuerte están aumentando.</i>
Cuautitlán Izcalli	+	nula	-	+	+	-	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual mientras que el número de días con lluvia se mantiene sin tendencia. El número de días con lluvia ligera e intensa están disminuyendo. El número de eventos con <i>lluvia media y fuerte están en aumento.</i>
Atizapán	+	nula	nula	nula	+	+	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual mientras que el número de días con lluvia apreciable, ligera y media se mantiene sin tendencia. El número de días con lluvia fuerte e intensa están aumentando.
Naucalpan	+	nula	nula	+	-	+	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual mientras que el número de días con lluvia apreciable y ligera se mantiene sin tendencia. Los días con lluvia fuerte están disminuyendo mientras que el número de días con <i>lluvia media e intensa están aumentando.</i>
Gustavo A. Madero	+	nula	-	+	+	nula	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual mientras que el número de días con lluvia apreciable e intensa se mantiene sin tendencia. Los días con lluvia ligera están disminuyendo mientras que el número de días con <i>lluvia media e intensa están aumentando.</i>
Azcapotzalco	+	-	+	+	nula	+	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual y el número de días con lluvia apreciable. Los días con lluvia <i>ligera, media e intensa están aumentando</i> mientras que el número de días con lluvia fuerte se mantienen sin tendencia.

Tabla 13. Continuación

TENDENCIAS DE LOS INDICES DE CAMBIO CLIMATICO								
Municipio/ Delegación	HP acumulada	R <sub>00</sub>	R <sub>05</sub>	R <sub>520</sub>	R <sub>2070</sub>	R <sub>20150</sub>	R <sub>m150</sub>	Conclusiones
Miguel Hidalgo	+	-	+	+	-	nula	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual y el número de días con lluvia apreciable . Los días con lluvia ligera y media están aumentando mientras que el número de días con lluvia fuerte disminuyen. Los eventos con lluvia intensa no presentan cambios.
Venustiano Carranza	+	-	+	+	nula	nula	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual y el número de días con lluvia apreciable . Los días con <i>lluvia ligera y media están aumentando</i> mientras que el número de días con lluvia fuerte e intensa no presentan cambios.
Iztacalco	+	+	-	+	+	+	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual mientras que el número de días con lluvia apreciable disminuye. Los días con <i>lluvia ligera y media, fuerte e intensa están aumentando</i> . Los días con lluvia media presentan una disminución.
Coyoacán	+	-	+	+	+	nula	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual y el número de días con lluvia apreciable. Los días con <i>lluvia ligera, media y fuerte están aumentando</i> . Los días con lluvia intensa se mantienen sin tendencia.
Iztapalapa	+	-	+	+	+	+	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual y el número de días con lluvia apreciable . <i>Los días con lluvia ligera, media, fuerte e intensa están aumentando</i> .
Tlalpan	+	+	-	+	+	+	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual, mientras que el número de días con lluvia apreciable presenta una disminución junto con los días con lluvia ligera. <i>Los días con lluvia media, fuerte e intensa están aumentando</i> .
Xochimilco	+	-	+	-	+	+	+	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual y el número de días con lluvia apreciable. <i>Los días con lluvia ligera, fuerte e intensa están aumentando</i> . Los días con lluvia ligera presentan una disminución.
La Paz	+	-	+	+	-	nula	nula	Está aumentando la cantidad de lluvia acumulada anual y el número de días con lluvia apreciable. <i>Los días con lluvia ligera y media están aumentando</i> . Los días con lluvia fuerte presentan una disminución, mientras que los días con lluvia intensa no presentan tendencia.



2. *La cantidad de lluvia anual acumulada presenta tendencia a disminuir.* Se observan tendencias en varias localidades, hacia la disminución de la cantidad de lluvia anual acumulada. En este caso se puede presentar disminución en cualquiera de los índices ( $R_{00}, R_{05}, R_{020}, R_{2070}, R_{70150}, R_{m150}$ ). Sin embargo también pueden presentarse el caso de que aumente el número de días de algún índice de los mencionados anteriormente. Un ejemplo del caso anterior es la delegación Cuajimalpa donde se nota un decremento en la tendencia a la lluvia anual acumulada y un incremento en el número de días con lluvia y lluvia ligera. Los días con lluvia moderada y fuerte también presentan una disminución en la tendencia, mientras que los días con lluvia intensa se han incrementado, en lo que se refiere a la lluvia torrencial no existen eventos de esta magnitud en el registro analizado. Lo anterior significa, para este caso particular, que en la delegación Cuajimalpa presenta una disminución de la magnitud anual de lluvia acumulada, sin embargo están lloviendo mas días al año con lluvia ligera y se han incrementado el número de eventos de lluvia intensa. En la tabla 14, se presenta el análisis de los índices climáticos en las entidades donde la cantidad anual de lluvia acumulada presenta una tendencia a la disminución de la misma.

Tabla 14. Entidades con tendencia a la disminución de la cantidad de lluvia anual acumulada

TENDENCIAS DE LOS INDICES DE CAMBIO CLIMATICO								
Municipio/ Delegación	Hp acumulada	R <sub>00</sub>	R <sub>05</sub>	R <sub>520</sub>	R <sub>2070</sub>	R <sub>20150</sub>	R <sub>m150</sub>	Conclusiones
Tecámac	-	+	-	-	nula	nula	nula	Disminuye la cantidad de lluvia anual acumulada, así como los días con lluvia apreciable al año. El número de días con lluvia ligera y media disminuyen, mientras que los eventos con lluvia fuerte e intensa no presentan cambios.
Tultitlan	-	+	-	-	+	-	nula	Disminuye la cantidad de lluvia anual acumulada, así como los días con lluvia apreciable al año. El número de días con lluvia ligera, media e intensa disminuyen, mientras que los <i>eventos con lluvia fuerte aumentan</i>
Ecatepec	-	+	-	-	+	nula	nula	Disminuye la cantidad de lluvia anual acumulada, así como los días con lluvia apreciable al año. El número de días con lluvia ligera, media e intensa disminuyen, mientras que los <i>eventos con lluvia fuerte aumentan</i> . Los eventos con lluvia intensa no presentan tendencia.
Atenco	-	+	-	-	-	nula	nula	Disminuye la cantidad de lluvia anual acumulada, así como los días con lluvia apreciable al año. El número de días con lluvia ligera, media y fuerte disminuyen, mientras que los eventos con lluvia intensa no presentan tendencia.
Huixquilucan	-	-	+	-	-	+	nula	Disminuye la cantidad de lluvia anual acumulada, los días con lluvia apreciable aumentan. Los días con lluvia media y fuerte disminuyen, mientras que los eventos con lluvia ligera e intensa aumentan.
Cuajimalpa	-	-	+	-	-	+	nula	Disminuye la cantidad de lluvia anual acumulada, los días con lluvia apreciable aumentan. Los días con lluvia media y fuerte disminuyen, mientras que los <i>eventos con lluvia ligera e intensa aumentan</i> .
Cuauhtémoc	-	-	+	nula	-	nula	nula	Disminuye la cantidad de lluvia anual acumulada, los días con lluvia apreciable aumentan. El número de días con lluvia ligera aumentan. Los días con lluvia media e intensa se mantienen sin tendencia apreciable, mientras que los eventos con lluvia fuerte disminuyen.
Tlahuac	-	nula	+	-	+	nula	nula	Disminuye la cantidad de lluvia anual acumulada, los días con lluvia apreciable no tienen tendencia apreciable. Los días con lluvia media disminuyen, mientras que los <i>eventos con lluvia ligera y fuerte aumentan</i> . Los eventos con lluvia intensa no presentan tendencia.
Chalco	-	nula	+	-	-	-	nula	Disminuye la cantidad de lluvia anual acumulada, los días con lluvia apreciable no tienen tendencia apreciable. <i>El número de días con lluvia ligera aumentan</i> . Los días con lluvia media, fuerte e intensa disminuyen.

3. *La cantidad de lluvia anual acumulada presenta tendencia nula.* En este caso no se observa que haya tendencia alguna en la magnitud anual de lluvia acumulada. Sin embargo en todos los casos con tendencia nula en la cantidad de lluvia anual acumulada se presentan variaciones en uno o varios de los otros índices estudiados. Un ejemplo de lo anterior es la Delegación Milpa Alta donde según los resultados obtenidos no se observa tendencia hacia el aumento o disminución de la cantidad lluvia anual acumulada, sin embargo sí presenta un aumento del número de días sin lluvia al año, un decremento en el número de días con lluvia ligera y media, así como un incremento en el número de días anuales con lluvia fuerte e intensa. No se tienen eventos con lluvia torrencial en el registro estudiado. Lo anterior significa que en la delegación Milpa Alta la cantidad de lluvia anual no se ha modificado, pero se observa un decremento en el número de días al año con lluvia y un incremento en los eventos con lluvia fuerte e intensa.

En la tabla 15, se presenta el análisis de los índices climáticos en las entidades donde la cantidad anual de lluvia acumulada se observa que no presenta tendencia alguna.

Tabla 15. Entidades que no presentan tendencia en la cantidad de lluvia anual acumulada

TENDENCIAS DE LOS INDICES DE CAMBIO CLIMATICO								
Municipio/ Delegación	Hp acumulada	R <sub>00</sub>	R <sub>05</sub>	R <sub>520</sub>	R <sub>2070</sub>	R <sub>20150</sub>	R <sub>m150</sub>	Conclusiones
Álvaro Obregón	nula	-	+	-	+	+	nula	No presenta tendencia la cantidad de lluvia anual acumulada, el número de días con lluvia apreciable aumenta. Los días con lluvia media disminuyen mientras que el número de días con <i>lluvia ligera, fuerte e intensa aumentan</i> .
Benito Juárez	nula	-	+	-	-	nula	nula	No presenta tendencia la cantidad de lluvia anual acumulada, el número de días con lluvia apreciable aumenta. Los días con lluvia media e intensa disminuyen mientras que el número de días con <i>lluvia ligera aumentan</i> . Los eventos con lluvia intensa no presentan tendencia.
Ixtapaluca	nula	+	-	-	nula	+	nula	No presenta tendencia la cantidad de lluvia anual acumulada, el número de días con lluvia apreciable disminuye. Los días con lluvia ligera y media disminuyen mientras que el número de días con lluvia fuerte no presentan tendencia. <i>El número de eventos con lluvia intensa aumentan</i> .
Milpa Alta	nula	+	-	-	+	+	nula	No presenta tendencia la cantidad de lluvia anual acumulada, el número de días con lluvia apreciable disminuye. Los días con lluvia ligera y media disminuyen <i>mientras que el número de días con lluvia fuerte e intensa aumentan</i> .
Texcoco	nula	nula	+	-	-	nula	nula	No presenta tendencia la cantidad de lluvia anual acumulada ni el número de días con lluvia apreciable. <i>Los días con lluvia ligera aumentan</i> , mientras que el número de días con lluvia media y fuerte disminuyen. No presenta tendencia el número de días con eventos intensos.
Magdalena Contreras	nula	-	+	+	-	nula	nula	No presenta tendencia la cantidad de lluvia anual acumulada, aumentan los días con lluvia apreciable. Los días <i>con lluvia ligera y media aumentan</i> , mientras que el número de días con lluvia fuerte disminuyen. No presenta tendencia el número de días con eventos intensos.

Tabla 15. Continuación

TENDENCIAS DE LOS INDICES DE CAMBIO CLIMATICO								
Municipio/ Delegación	Hp acumulada	R <sub>00</sub>	R <sub>05</sub>	R <sub>520</sub>	R <sub>2070</sub>	R <sub>20150</sub>	R <sub>m150</sub>	Conclusiones
Tlalnepantla	nula	+	-	-	+	nula	nula	No presenta tendencia la cantidad de lluvia anual acumulada, disminuyen los días con lluvia apreciable. Los días con lluvia ligera y media disminuyen, <i>mientras que el número de días con lluvia fuerte aumentan</i> . No presenta tendencia el número de días con eventos intensos.
Tultepec	nula	-	+	+	-	+	nula	No presenta tendencia la cantidad de lluvia anual acumulada, aumentan los días con lluvia apreciable. <i>Los días con lluvia ligera, media e intensa aumentan</i> , mientras que el número de días con lluvia fuerte disminuyen.
Teoloyucan	nula	+	-	nula	+	nula	nula	No presenta tendencia la cantidad de lluvia anual acumulada, disminuyen los días con lluvia apreciable. Los días con lluvia ligera, disminuyen, mientras que el número de <i>días con lluvia fuerte aumentan</i> . No presentan tendencia los días con lluvia media e intensa.
Tepotzotlan	nula	+	-	+	+	nula	nula	No presenta tendencia la cantidad de lluvia anual acumulada, disminuyen los días con lluvia apreciable. Los días con lluvia ligera, disminuyen, mientras que el número de <i>días con lluvia media y fuerte aumentan</i> . No presentan tendencia los días con lluvia intensa.
Zumpango	nula	-	+	+	-	nula	nula	No presenta tendencia la cantidad de lluvia anual acumulada, aumentan los días con lluvia apreciable. Los días con lluvia fuerte disminuyen, <i>mientras que el número de días con lluvia ligera y media aumentan</i> . No presentan tendencia los días con lluvia intensa.

Hasta aquí se ha hablado de las tendencias en el aumento y disminución del número de eventos de lluvia dentro de ciertos intervalos de magnitud. El aumento o disminución en la magnitud de los eventos extremos se estudió mediante el cálculo de los trenes de lluvia o días consecutivos con precipitación, que en este trabajo se calcularon de 1 a 10 días.

En lo que se refiere al análisis y resultados del índice *Rxday* propuesto por la CONAGUA se encontraron cambios importantes en el mismo, quizá el más significativo es que en la mayoría de las entidades estudiadas existe una cierta tendencia al incremento o decremento de la magnitud de los eventos extremos de lluvia de un día. En las tablas 16 a 18 se presenta el análisis de los resultados del índice *Rxday* para 1 a 10 días de duración como lo propone la CONAGUA.

Tabla 16. Entidades con tendencia al aumento en la magnitud de la lluvia máxima anual de un día.

TENDENCIAS DE LOS INDICES DE CAMBIO CLIMATICO INDICE $R_{xDAY}$											
Municipio/ Delegación	$R_{x1day}$	$R_{x2day}$	$R_{x3day}$	$R_{x4day}$	$R_{x5day}$	$R_{x6day}$	$R_{x7day}$	$R_{x8day}$	$R_{x9day}$	$R_{x10day}$	Conclusiones
Atizapán de Zaragoza	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Azcapotzalco	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Álvaro Obregón	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 7 días.
Gustavo A. Madero	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Coyoacán	+	+	+	+	+	+	+	Nula	Nula	Nula	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 7 días.
Miguel Hidalgo	+	Nula	Nula	-	Nula	-	-	-	-	-	Aumento en las lluvias máximas de un día.
Ecatepec	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Iztacalco	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Cuautitlán	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Milpa Alta	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.

Tabla 16. Continuación

TENDENCIAS DE LOS INDICES DE CAMBIO CLIMATICO INDICE $R_{xDAY}$											
Municipio/ Delegación	$R_{x1day}$	$R_{x2day}$	$R_{x3day}$	$R_{x4day}$	$R_{x5day}$	$R_{x6day}$	$R_{x7day}$	$R_{x8day}$	$R_{x9day}$	$R_{x10day}$	Conclusiones
Nicolás Romero	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Naucalpan	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Nula	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 9 días.
Tecámac	+	+	+	-	Nula	Nula	Nula	Nula	-	Nula	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 3 días.
Teoloyucan	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 3 días y de 6a 10 días.
Xochimilco	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Tlalpan	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Atenco	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Nula	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 9 días.
Texcoco	+	+	+	+	Nula	Nula	-	Nula	Nula	-	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 4 días.
Chimalhuacán	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Ixtapaluca	+	+	+	+	+	+	+	+	Nula	Nula	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 8 días.
Tlalnepantla	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Iztapalapa	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Aumento de la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.



Tabla 17. Entidades con tendencia a la disminución en la magnitud de la lluvia máxima anual de un día

TENDENCIAS DE LOS INDICES DE CAMBIO CLIMATICO INDICE $R_{xDAY}$											
Municipio/ Delegación	$R_{x1day}$	$R_{x2day}$	$R_{x3day}$	$R_{x4day}$	$R_{x5day}$	$R_{x6day}$	$R_{x7day}$	$R_{x8day}$	$R_{x9day}$	$R_{x10day}$	Conclusiones
Benito Juárez	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Disminución en la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Chalco	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Disminución en la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Cuajimalpa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Disminución en la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Cuauhtémoc	-	+	-	Nula	-	-	-	-	-	-	Disminución en la magnitud de los eventos máximos diarios, aumento en la magnitud de los trenes de lluvia de 2 días. Disminución de los trenes de lluvia de 5 a 10 días.
Huixquilucan	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Disminución en la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
La Paz	-	-	Nula	+	+	+	+	+	+	-	Disminución en la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 2 días. Aumento en los trenes de lluvia de 4 a 10 días.
Tlahuac	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Disminución en la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Tultepec	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Nula	Disminución en la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 9 días.
Tultitlan	-	-	-	Nula	+	+	+	+	+	+	Disminución en la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 3 días. Aumento en los trenes de lluvia de 5 a 10 días.
Zumpango	-	-	-	-	-	Nula	-	-	-	Nula	Disminución en la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.
Magdalena Contreras	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Disminución en la magnitud de los trenes de lluvia de 1 a 10 días.

Tabla 18. Entidades sin tendencia apreciable en la magnitud de la lluvia máxima anual de un día

TENDENCIAS DE LOS INDICES DE CAMBIO CLIMATICO INDICE $R_{xDAY}$											
Municipio/ Delegación	$R_{x1day}$	$R_{x2day}$	$R_{x3day}$	$R_{x4day}$	$R_{x5day}$	$R_{x6day}$	$R_{x7day}$	$R_{x8day}$	$R_{x9day}$	$R_{x10day}$	Conclusiones
Tepetzotlan	Nula	Nula	Nula	+	+	+	+	+	+	+	Aumento en la magnitud de los trenes de lluvia de 4 a 10 días.
Nextlalpan	Nula	Nula	+	+	Nula	-	-	-	-	-	Aumento en la magnitud de los trenes de lluvia de 3 y 4 días, Disminución de la magnitud de lluvia acumulada en los trenes de 6 a 10 días.

## **CAPÍTULO VII**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

De acuerdo en los objetivos bajo los cuales se desarrolló este trabajo se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas del análisis de los resultados. Se puede observar que se cumplió con los objetivos planteados, de los cuales se desprenden las siguientes conclusiones generales:

- En el periodo de análisis (1965-2010) se observa que los patrones de precipitación en el Valle de México han sufrido cambios. Estos presentan tanto la tendencia al aumento o disminución de la cantidad anual de lluvia acumulada, así como en los distintos índices de cambio climático calculados.
- Aún en las localidades donde no se observa tendencias en la cantidad de precipitación anual acumulada se observan cambios en las tendencias de los índices climáticos calculados.

- En la mayoría de las localidades en estudio se observa un aumento en el número de días con lluvia media ( $5 \text{ mm} < hp \leq 20 \text{ mm}$ ), fuerte ( $20 \text{ mm} < hp \leq 70 \text{ mm}$ ), y/o intensa ( $hp \geq 150 \text{ mm}$ ). Lo anterior se cumple tanto en localidades que presentan tendencia en la cantidad anual de lluvia acumulada como en las que no se observa tendencia en este rubro.
- En las localidades donde se observa un aumento en la magnitud de la lluvia máxima anual de un día, se nota que aumentan las magnitudes de los trenes de lluvia de 1 a 10 a excepción de Miguel Hidalgo, Coyoacán, Tecámac, Texcoco e Ixtapaluca.
- En las localidades donde se observa un incremento en la magnitud de la lluvia máxima anual de un día, se nota que disminuyen las magnitudes de los trenes de lluvia de 1 a 10 a excepción de La Paz y Tultitlan.

De acuerdo a lo anterior se tienen las siguientes recomendaciones:

- Debido a la importancia que tienen los datos instrumentales del clima para la determinación de los posibles cambios en los patrones atmosféricos, independientemente de sus causas, es necesario que se cuente con bases de datos continuas y confiables en todas las estaciones climatológicas del valle de México. Esto es de gran relevancia pues se debe tener en mente que las magnitudes de las obras hidráulicas son determinadas directamente del análisis y manejo de dichas bases de datos.
- Se debe empezar a considerar en el diseño de las obras hidráulicas del Valle de México los cambios en los patrones de precipitación específicamente el aumento de días con lluvia fuertes e intensas, las cuales son las que provocan la saturación de la red de drenaje trayendo consigo fuertes encharcamientos, que incluso podrían provocar el colapso de una parte del sistema hidráulico. Esto se podría solucionar revisando el periodo de retorno de las estructuras de protección, pues como se ha visto los eventos con lluvia fuerte e intensa cada vez son más

comunes en la mayoría de las localidades estudiadas. El aumento del periodo de retorno podría ayudar a proteger las obras de protección del Valle de México ante los cambios en los patrones de precipitación que están ocurriendo.

- En lo que se refiere a la magnitud de los trenes de lluvia en buena parte de las localidades estudiadas estos se hallan en aumento. Esto tiene particular importancia en el manejo de la infraestructura hidráulica puesto que si se presentaran trenes de lluvia por varios días en la mayor parte de la ciudad de México y su zona conurbada podría ocasionar el colapso del sistema produciendo una fuerte inundación en la Ciudad de México, con graves consecuencias materiales y posiblemente de pérdidas humanas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, Enric; Auer, Inge; *et all*, "*Guidelines on Climate Metadata and Homogenization*", Word Meteorological Organization, WMO/TD N. 1186, 2003.
- Aparicio Mijares, Francisco Javier, *Fundamentos de hidrología de superficie*, Limusa, México, 2008.
- Arqueología Mexicana, *Lagos del Valle de México*, Vol. XII., Núm. 68, México, julio-agosto, 2004.
- Arqueología Mexicana, *La Cuenca de México*, Vol. XV., Núm. 86, México, julio-agosto, 2007.
- Brian M. Reich, "Short-Duration rainfall-intensity estimates and other desing aids for regions of sparse data", *Journal of Hydrology*, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1963.
- Banco Interamericano de Desarrollo, "*Orientaciones Estratégicas Sectoriales de Manejo de Recursos Hídricos en México*", Nota técnica N.140, 2010.
- Campos Aranda, Daniel Francisco, *Procesos del ciclo hidrológico*, Universidad Autónoma de San Luís Potosí, Facultad de Ingeniería, México, 1998.
- Campos Aranda, Daniel Francisco, *Estimaciones y aprovechamiento del escurrimiento*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 2007.
- CONAGUA, *Semblanza Histórica del Agua en México*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 2009.
- CONAGUA, *Inventario Nacional de Protección contra Inundaciones en Cauces Naturales*, México, 2008.
- Chow, Ven Te; Maidments, David R.; Mays, Larry W., *Hidrología Aplicada*, Mac Graw-Hill Interamericana S.A, Colombia, 1994.
- Díaz Padilla, Gabriel; Sánchez Cohen, Ignacio, *et all*, "Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de Barlovento y Sotavento del Golfo de México", en *Agricultura Técnica en México*, Vol. 34, Núm. 3, julio-septiembre, 2008, Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Texcoco, México.
- Escalante Sandoval, Carlos Agustín y Lilia Reyes Chávez, *Técnicas Estadísticas en Hidrología*, 2a. ed. Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2005.

- Helsel, D.R.; Hirsch, R.M, *Statistical Methods in Water Resources*, Chapter A3, USGS, United States, September 2002.
- IDAG,T. Barnett, F. Zwiers, G.Hegel, M. Allen, T.Crowley,N Gillet, K. Hasselmann, P.Jones, B.Santer, S.Tett,and Int.Ad Hoc Detection, 2005. Detecting and attributing external influences on the climate system: a review of recent advances. *Journal of Climate*, 18,1291-1314.
- Jáuregui, Ernesto, "*La variabilidad Climática en los registros instrumentales de México*" Instituto Nacional de Ecología, México, 2007.
- Khambhammettu, Prashanth, *Mann-Kendall Analysis for the Fort Ord Site*, HydroGeoLogic, Inc.- OU-1 Annual Groundwater Monitoring Report- Former Fort Ord, U.S Army Corps of Engineers, California, 2005.
- Linsley, Ray K. JR; Kohler, Max; Pauhus, Joseph L. H., *Hidrología para ingenieros*, McGraw-Hill Book Company, España, 1967.
- L. V. Alexander, X. Zhang, T. C. Peterson, *et all* "*Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation*", *Journal of geophysical research*, vol III, 2006.
- Luege Tamargo, José Luis, *El cambio climático y las inundaciones en el Valle de México*, Seminario: Diálogos por el agua y el cambio climático, AMH, Gobierno Federal, SEMARNAT, CONAGUA, México, Distrito Federal, 17 de agosto de 2011.
- Montgomery, Douglas C., Runger, George C., *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*, Segunda edición, LIMUSA WILEY, México, 2009.
- Organización Meteorológica Mundial, *Guía de Prácticas Hidrológicas*, 5a. ed. OMM, Boletín OMM-N.168,1994.
- Pachauri, R.K., Reisinger, A., (directores de la publicación), *IPCC, Cambio Climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Ginebra, Suiza, 2007.
- Perló Cohen, Manuel; González Reynoso, Arsenio Ernesto, *¿Guerra por el agua en el Valle de México? Estudios sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México*, Coordinación de Humanidades, Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad, Fundación Friedrich Ebert, UNAM, México, 2005.
- Peterson, Thomas C.; Folland, Christopher, *et all*, *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs, 1998-2001*, United States, 2001.

SEDESOL, CONAPO, INEGI, *Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México*, 1a.ed. México, Noviembre, 2004.

Salas, J.D, et al, (1980). Applied modeling of hydrologic time series, Water resources, Publication, USA.

Springal G., Rolando, *Hidrología*, Primera parte, II-UNAM, México, 1970.

Unites States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Design of Small Dams*, A Water Resources Technical Publication, United States, 1987.

US Army Corps Of Engineers, CAZALAC, UNESCO, Programa Hidrológico Internacional, "*Manual Breve de Preparación de Datos*"

Vázquez Aguirre, Jorge Luis, (Comp.), *Guía para el Cálculo y uso de Índices de Cambio Climático en México*, Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 2010.

World Meteorological Organization, Manual on Stream Gauging, Volume I-Field Work, WMO-No-1044, 2010.

World Meteorological Organization, "*Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions*", WMO-TD N.1500, 2009.

World Climate Research Programe, "*Report of the 33rd Session of WCRP Joint Scientific Committee*". WCRP Report No. 11/2012, August 2012.

### **Referencias electrónicas**

Climate Variability and Predictability.

<http://www.clivar.org/organization/etccdi>,

<http://www.clivar.org/organization/etccdi/resources/indices-data>

Climate Change Indices Definitions of the 27 core indices.

[http://ccema.seos.uvic.ca/ETCCDI/list\\_27\\_indices.shtml](http://ccema.seos.uvic.ca/ETCCDI/list_27_indices.shtml),

<http://www.clivar.org/organization/etccdi/resources/indices-data>

The International ad hoc Detection and Attribution Group (IDAG).

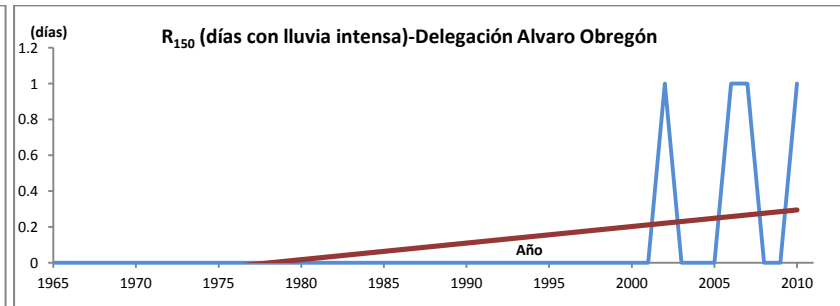
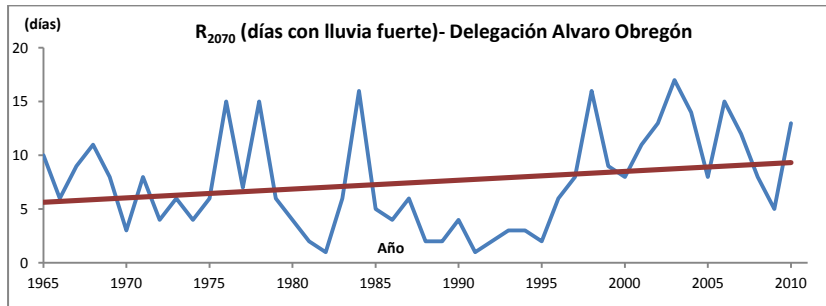
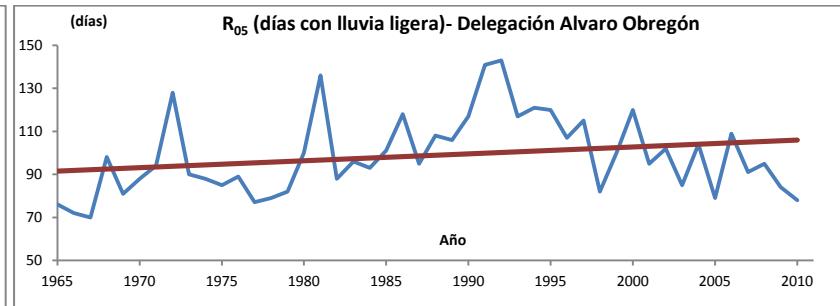
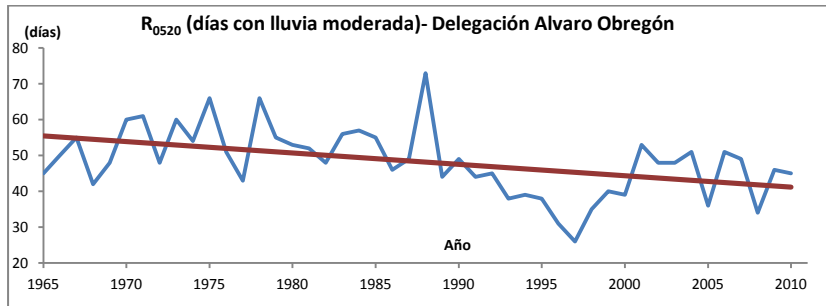
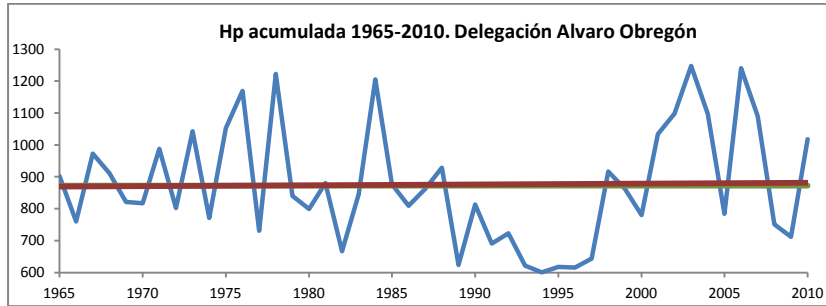
<http://www.image.ucar.edu/idag/>

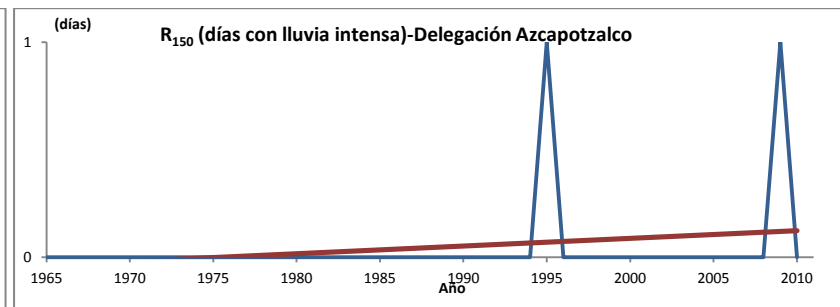
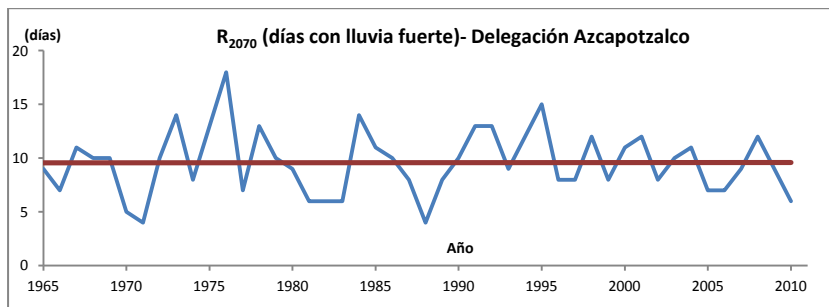
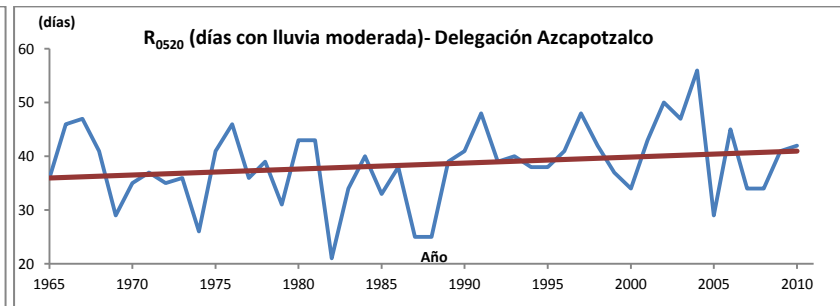
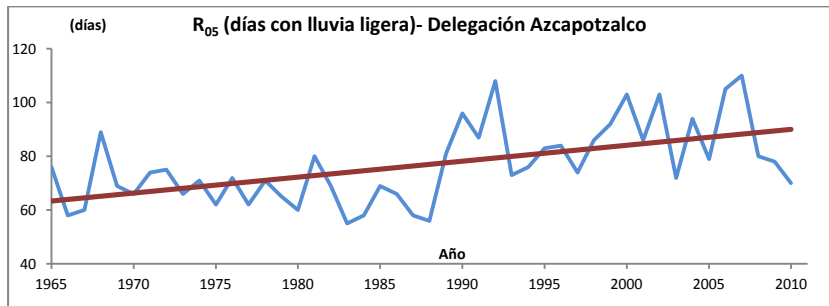
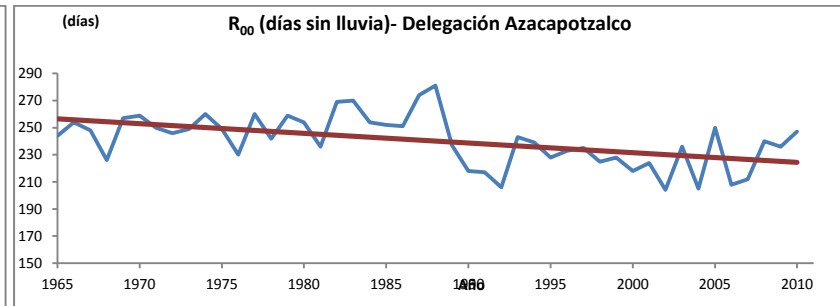
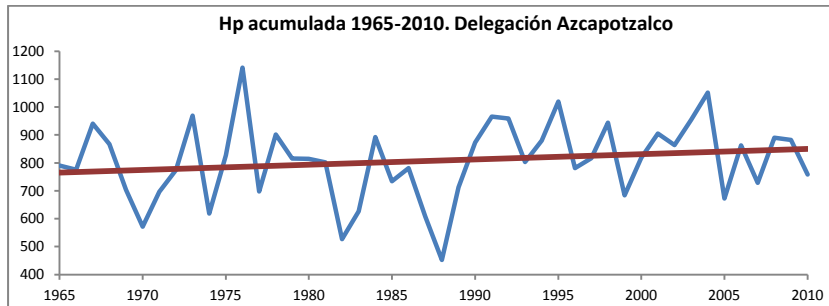


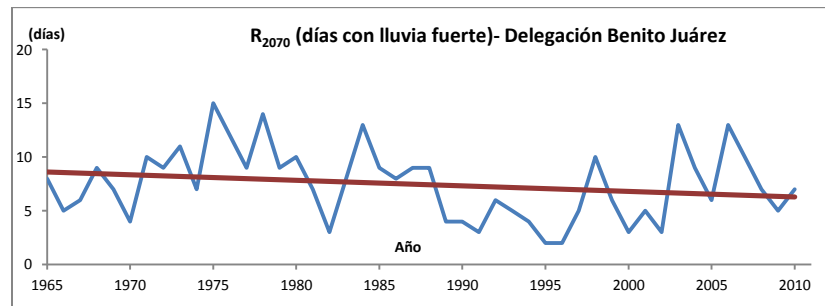
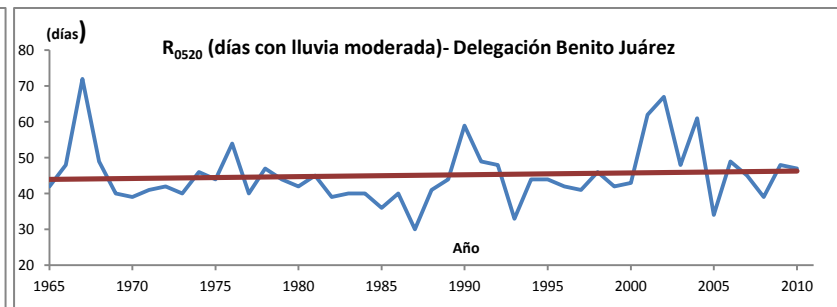
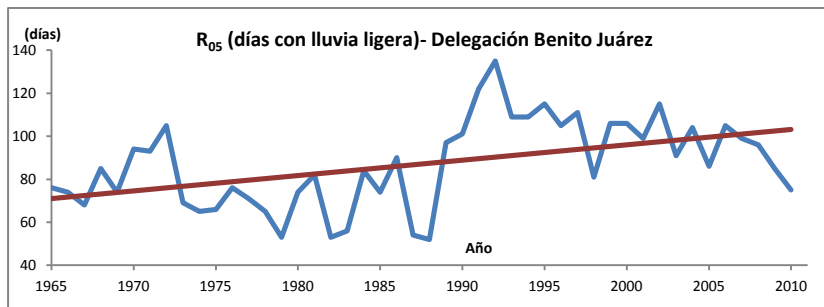
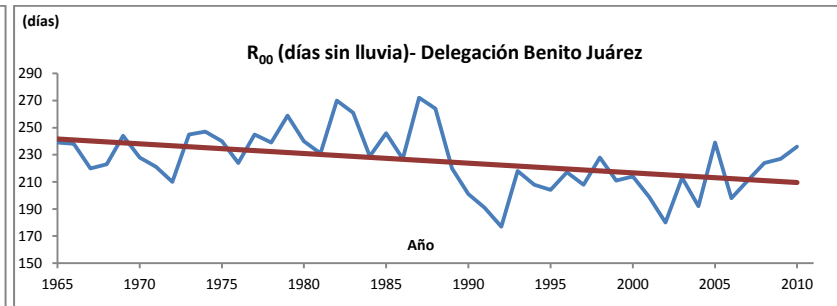
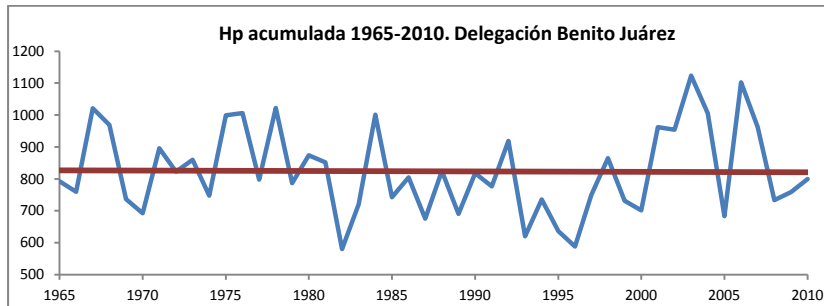
## **ANEXO A**

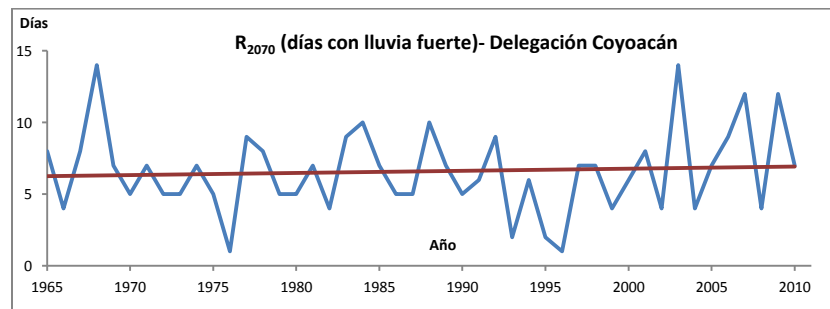
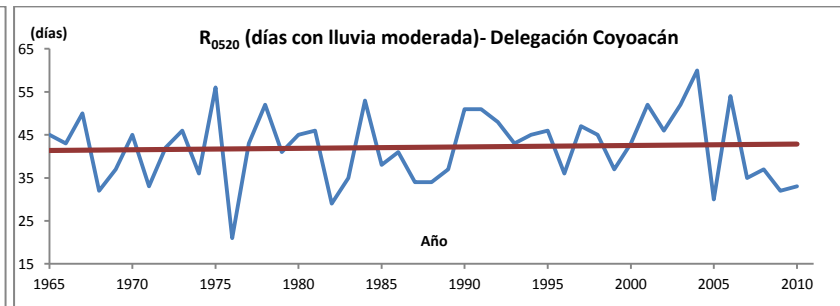
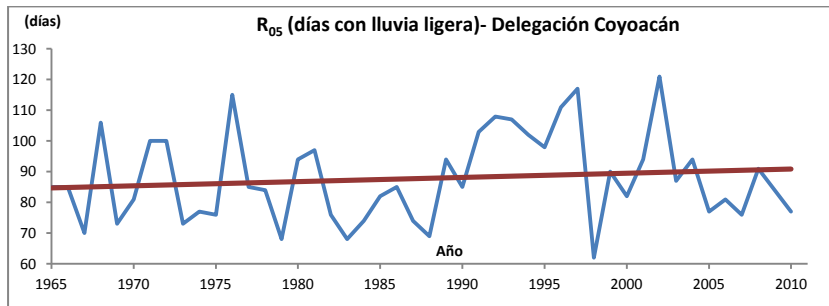
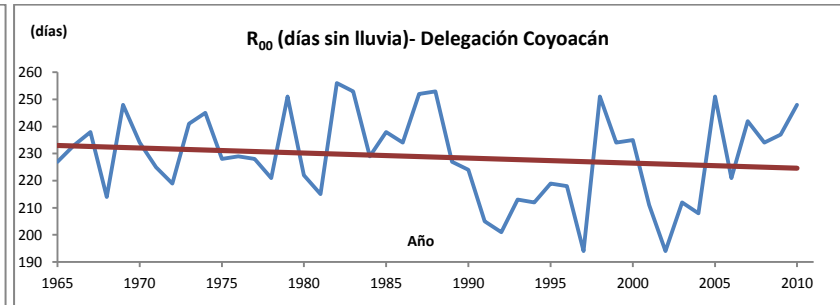
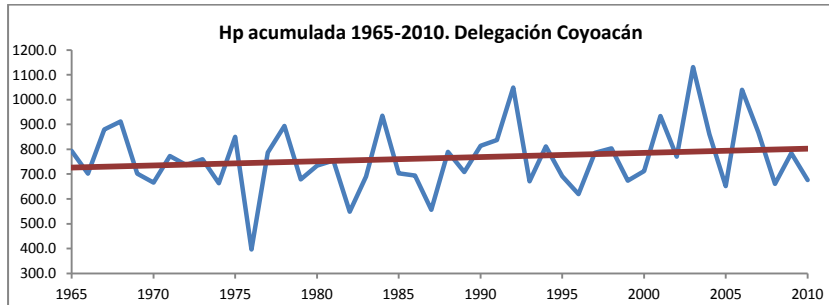
### **RESULTADOS DE LA INTERPOLACIÓN Y DEL CÁLCULO DE INDICES DE CAMBIO CLIMATICO**

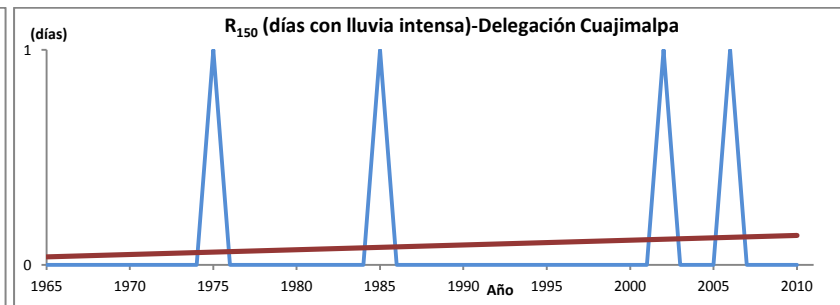
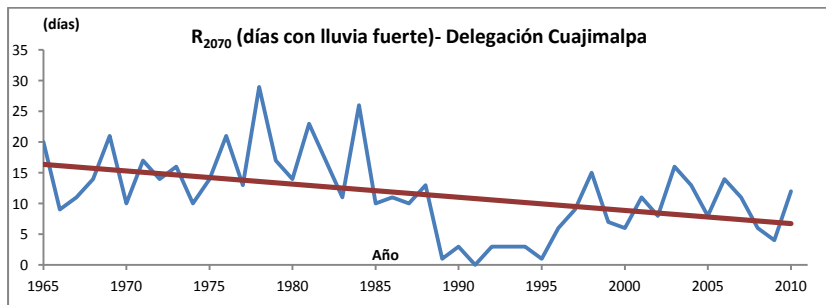
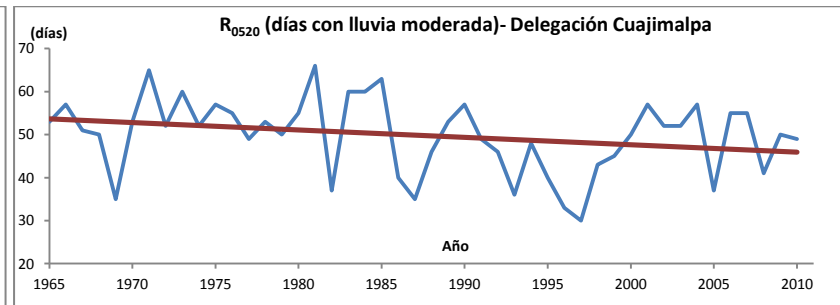
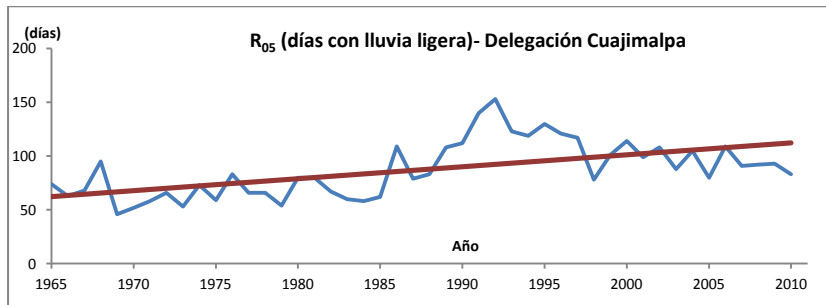
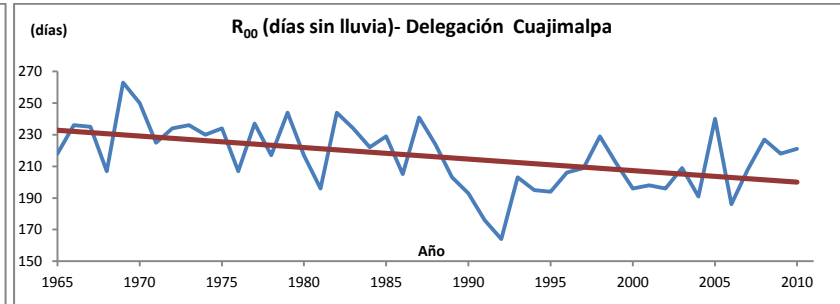
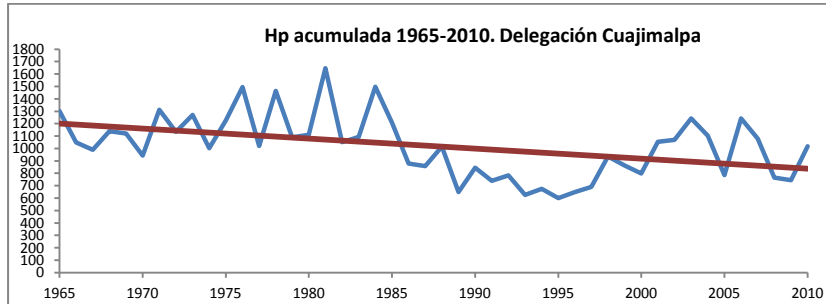
En este anexo se presentan los resultados de la estimación de información de precipitación diaria obtenida por medio de la técnica de interpolación inversa por cada entidad analizada. También se incluyen los resultados de los índices de cambio climático calculados en este trabajo.

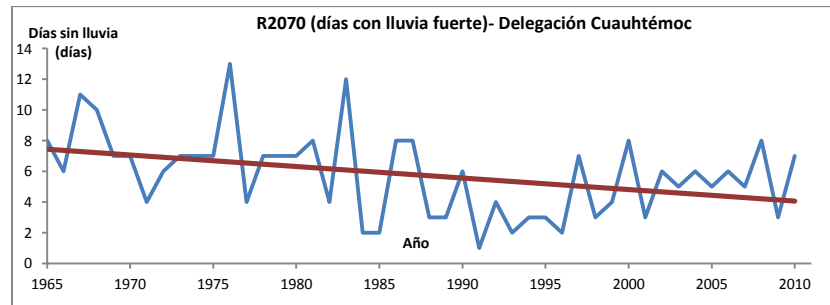
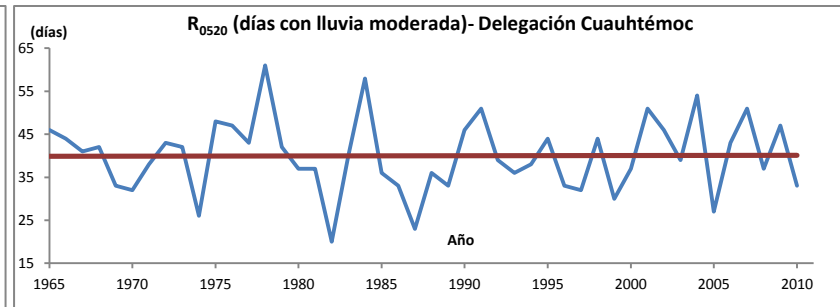
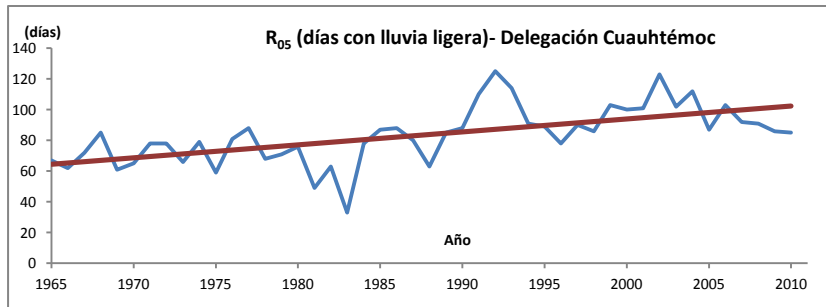
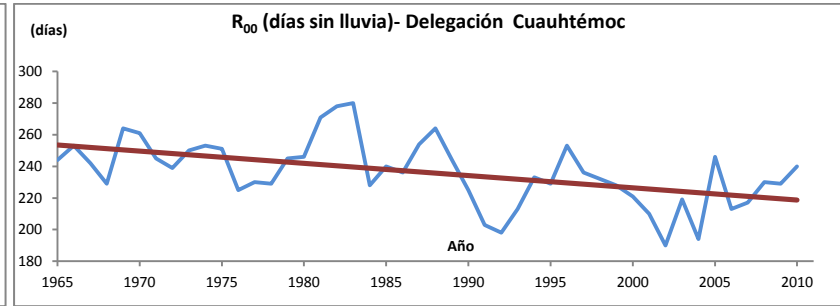
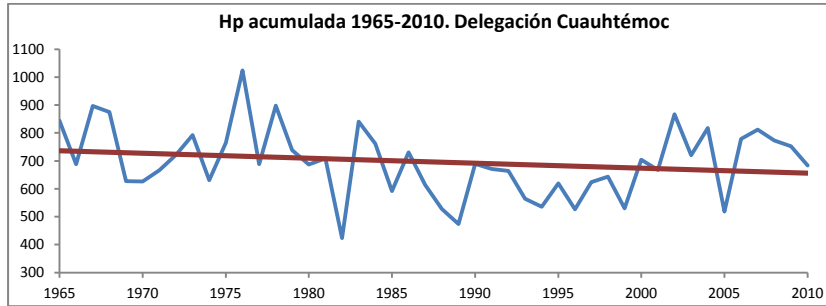


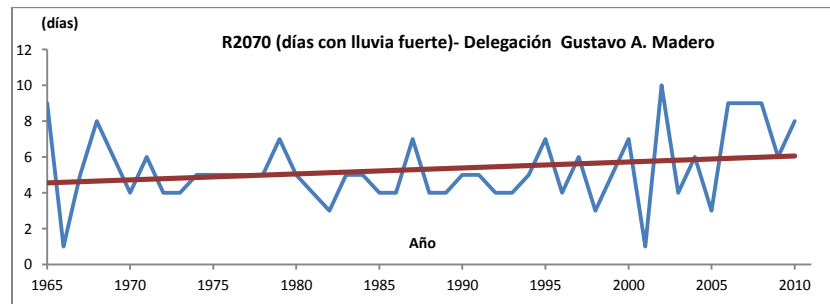
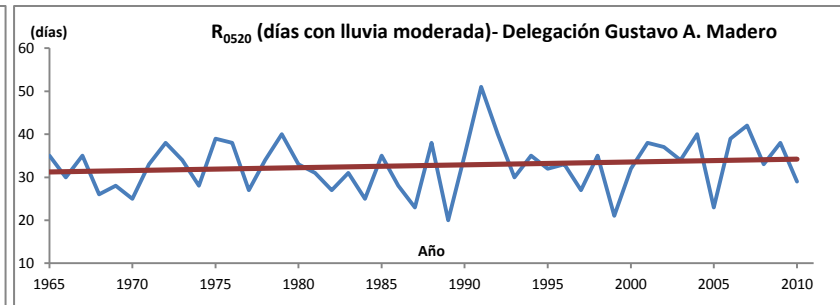
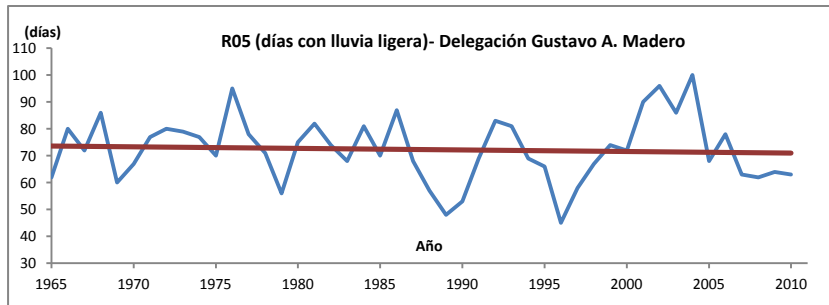
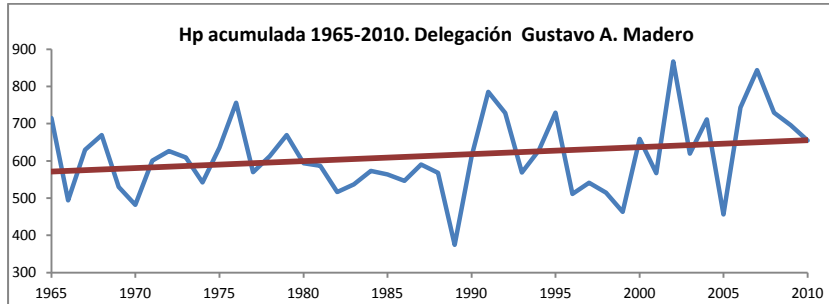




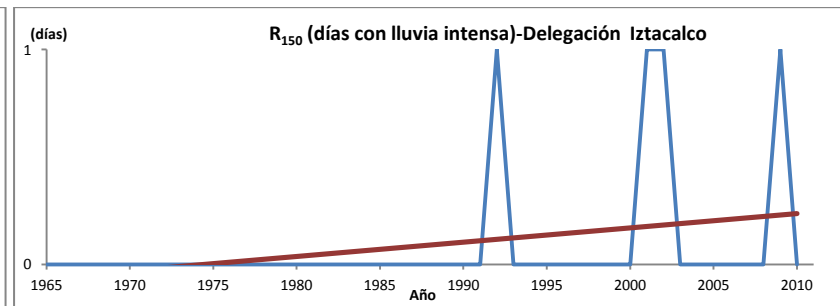
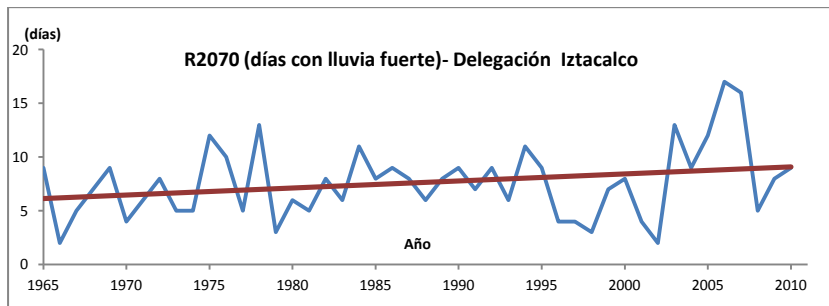
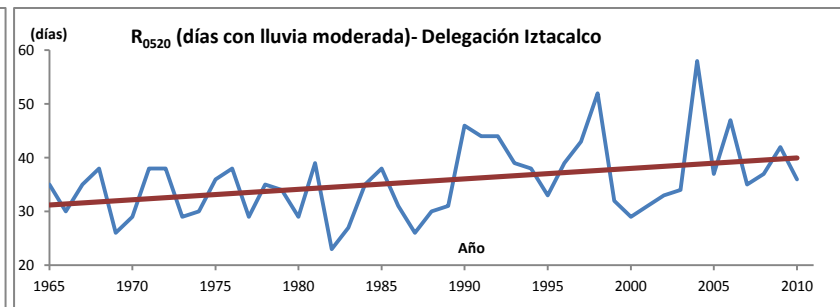
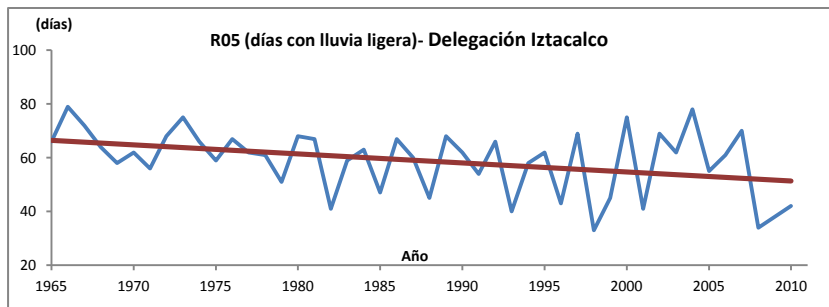
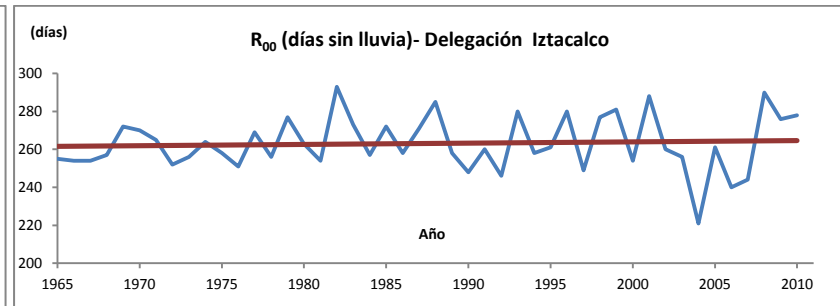
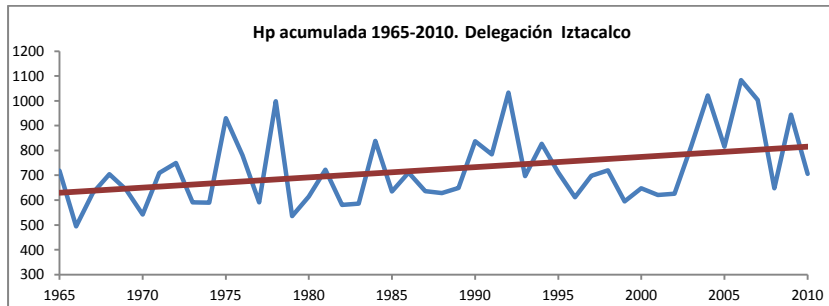


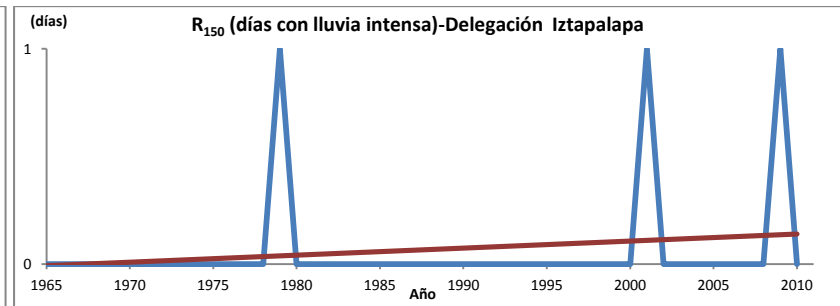
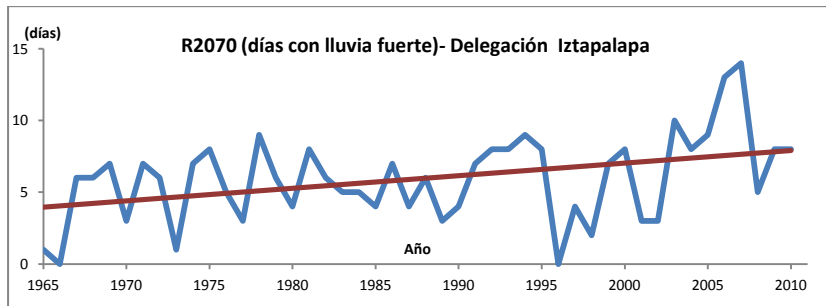
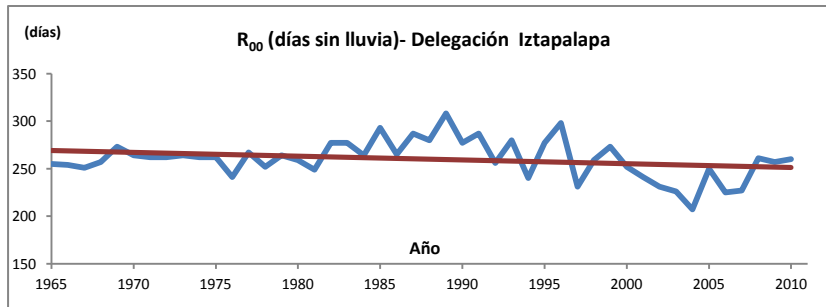
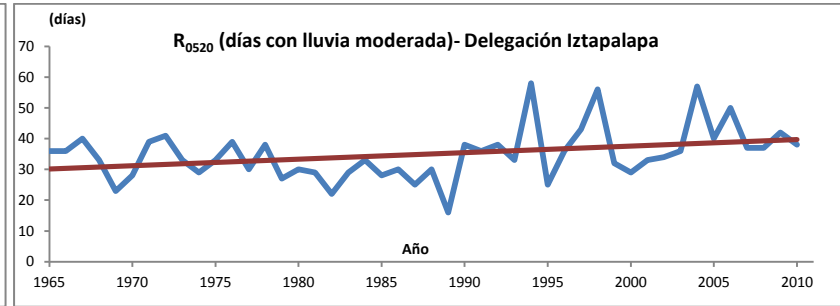
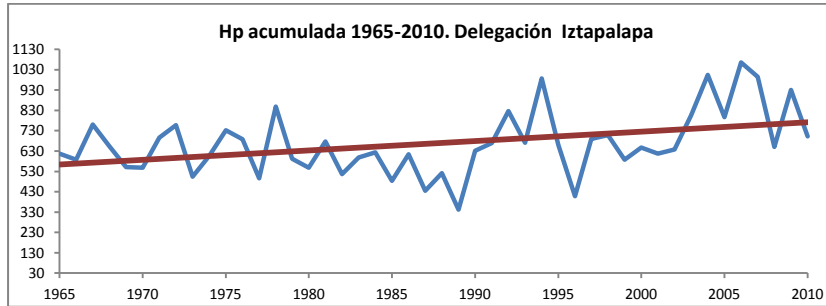


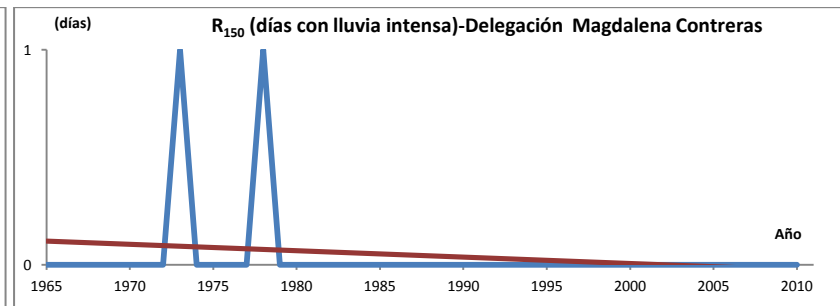
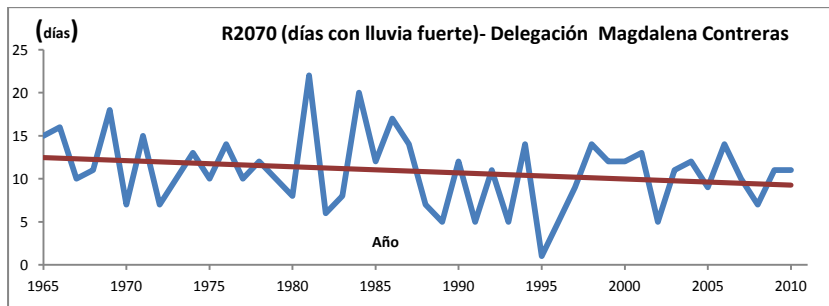
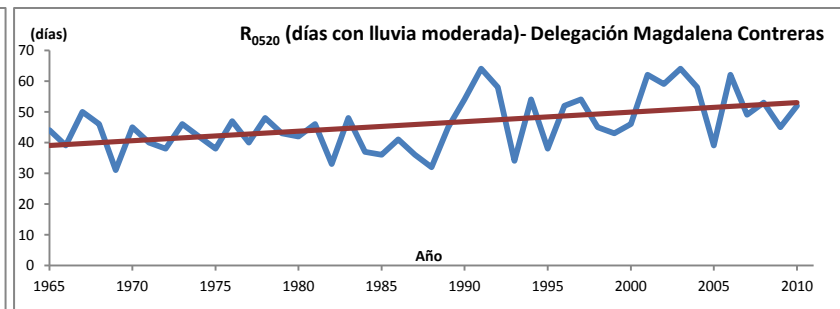
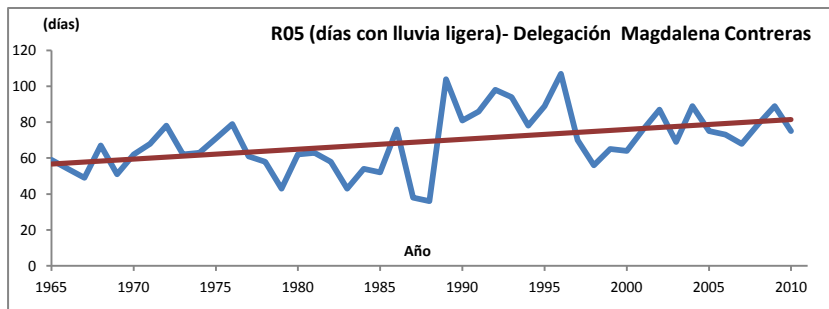
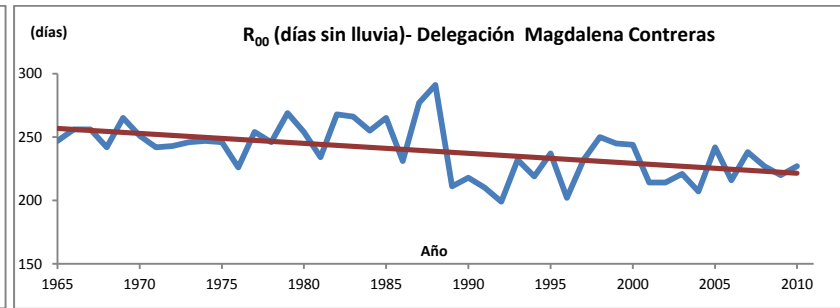
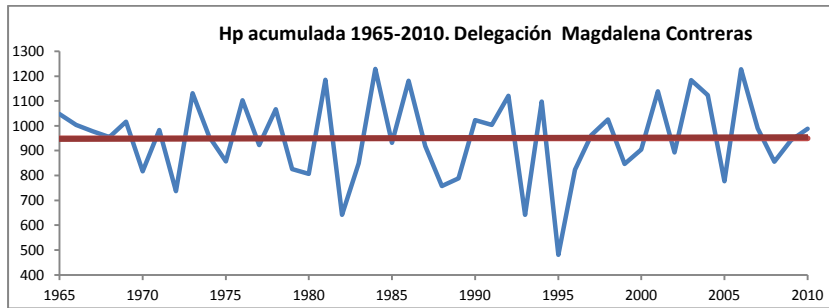


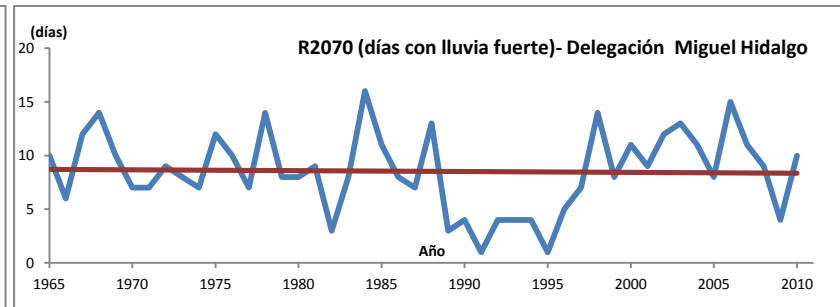
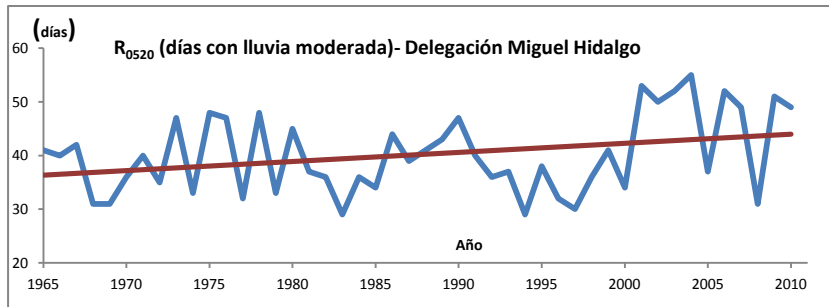
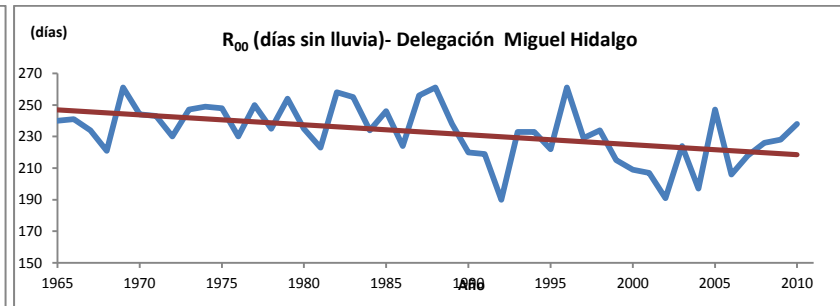
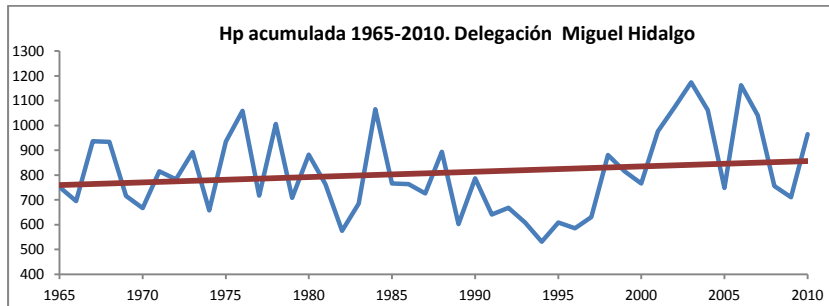


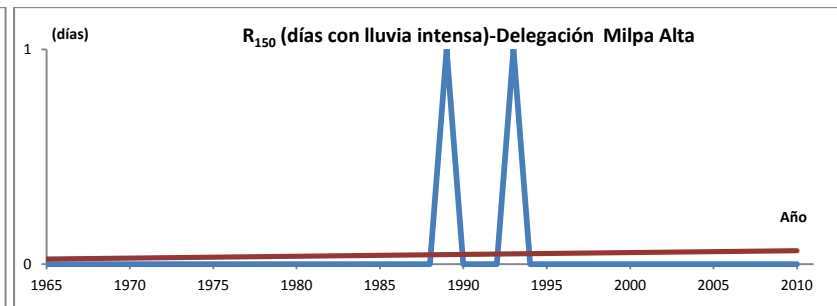
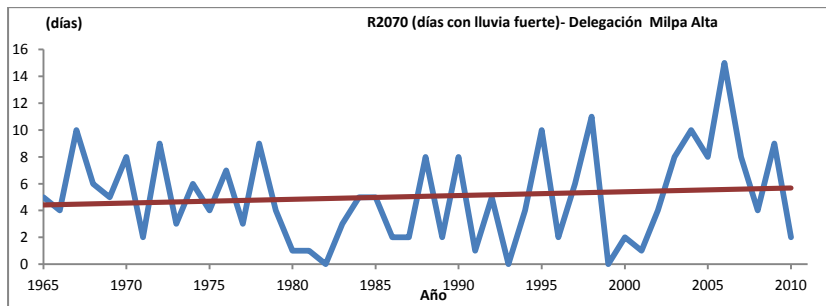
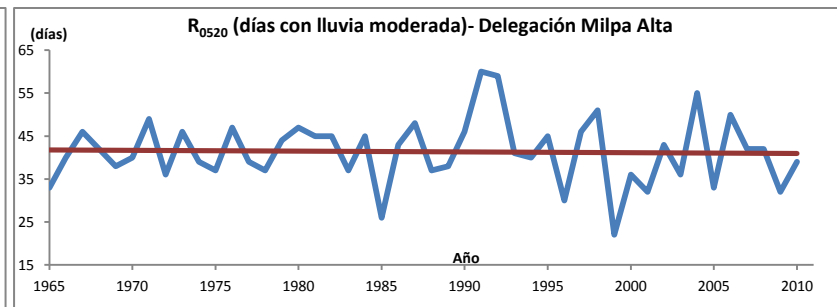
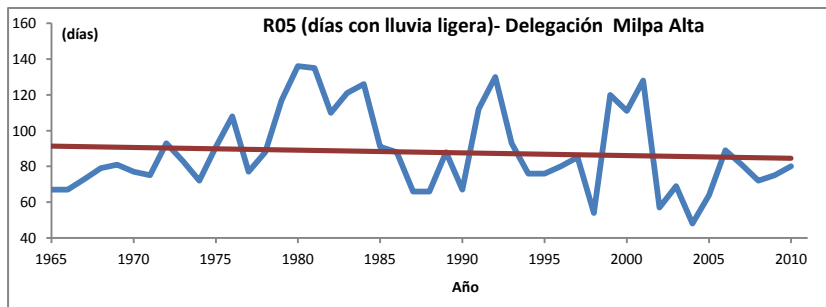
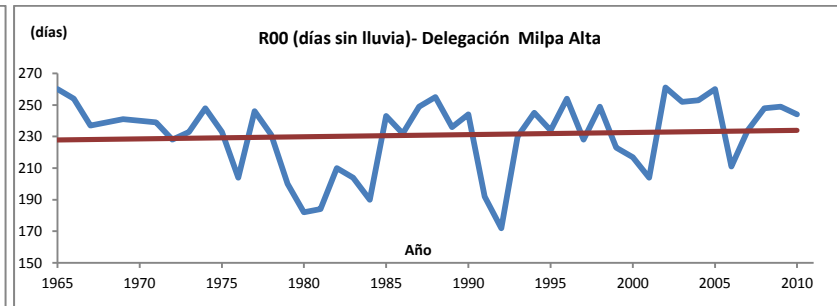
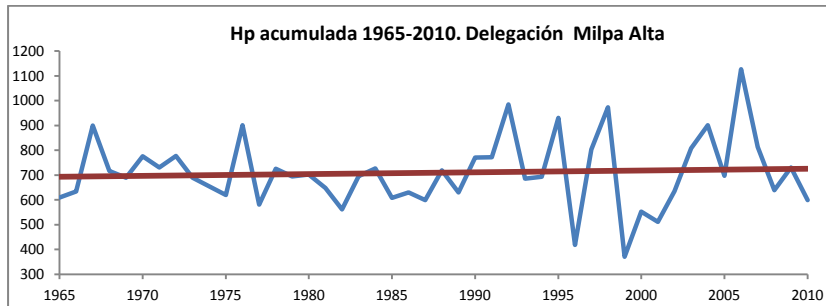


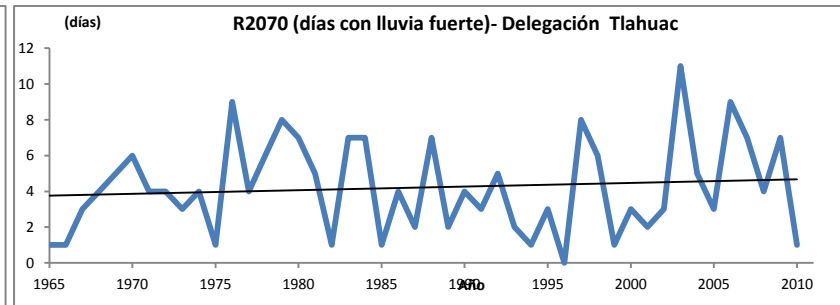
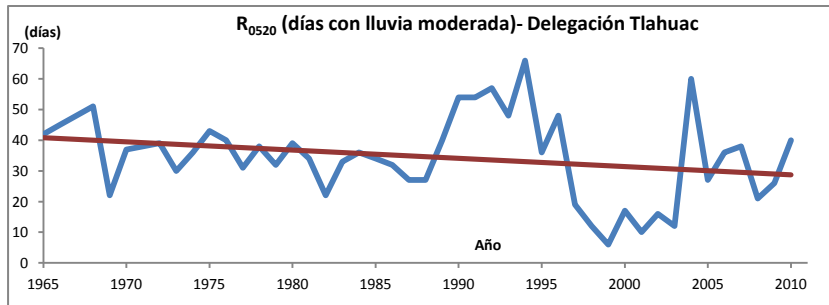
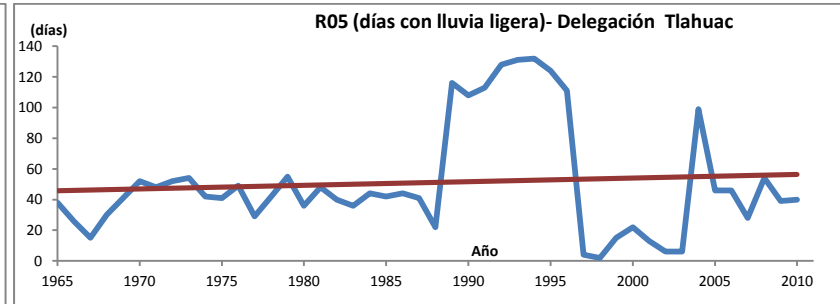
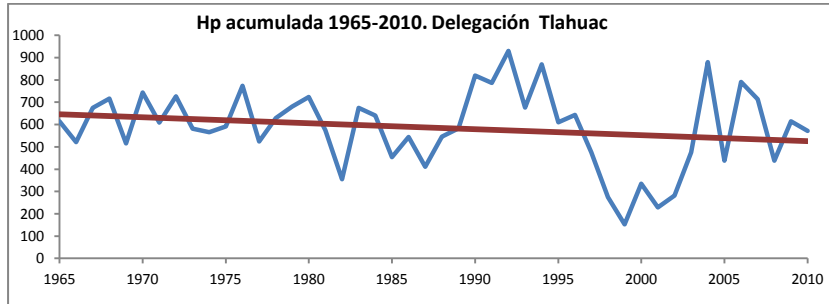


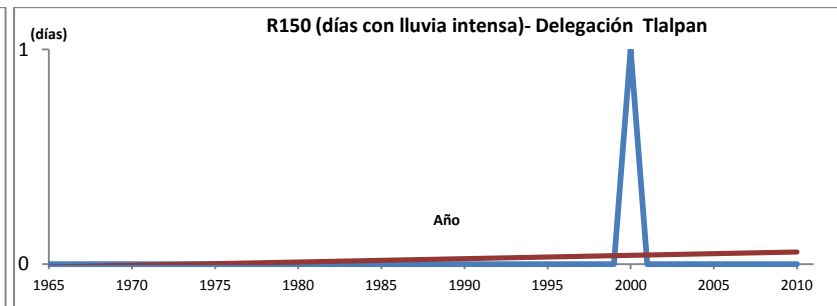
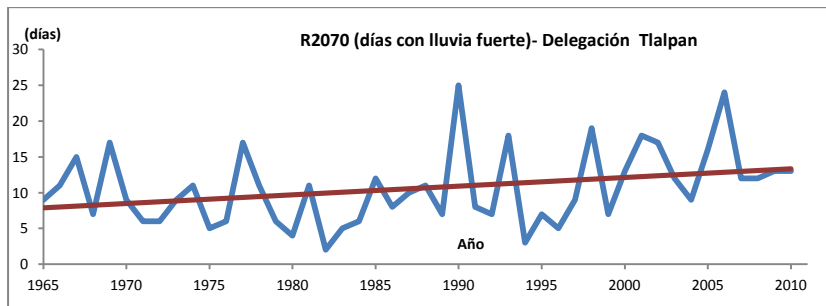
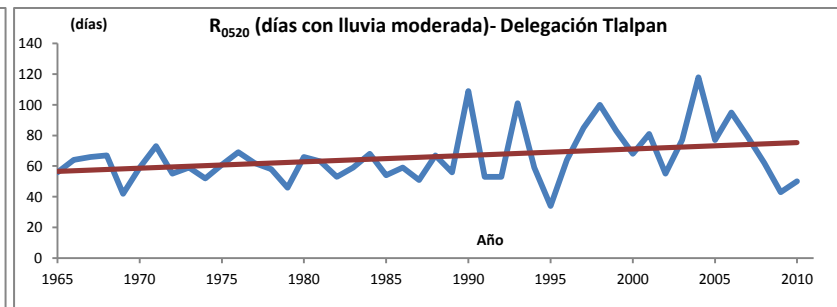
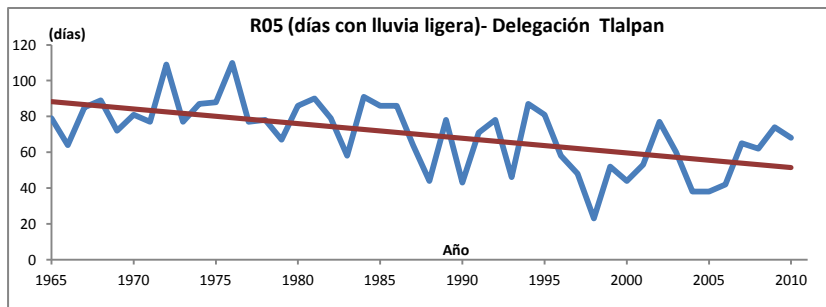
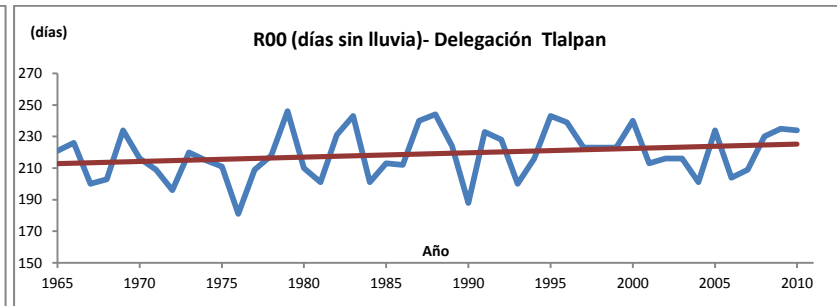
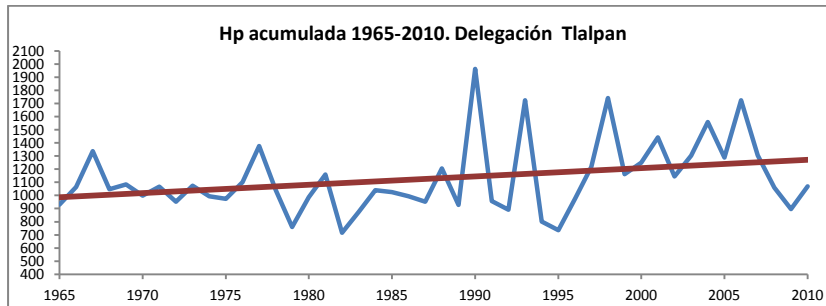


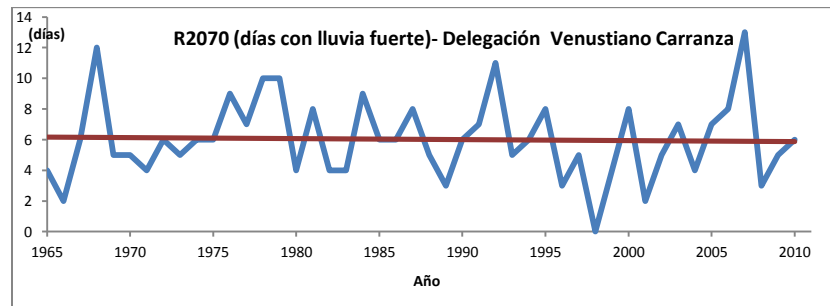
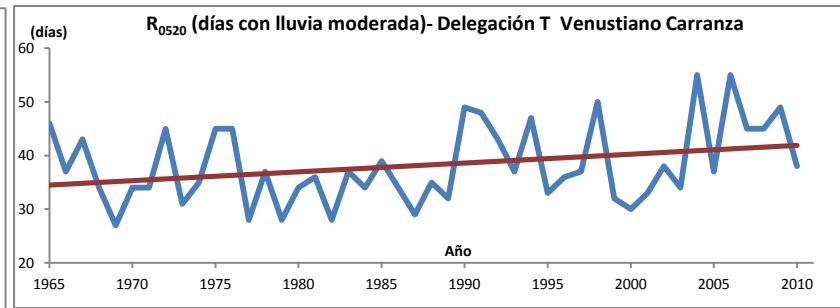
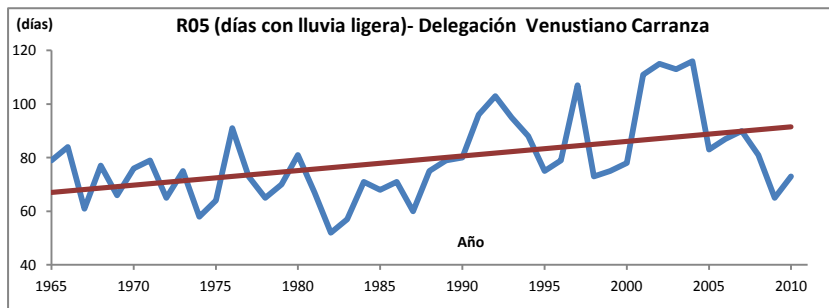
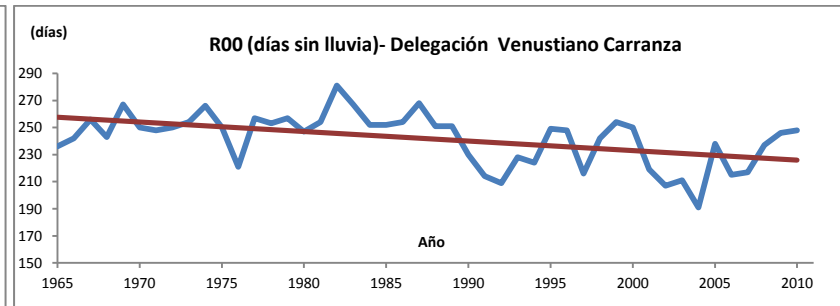
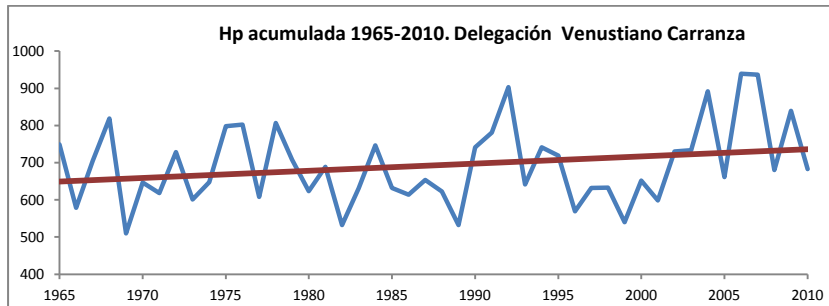




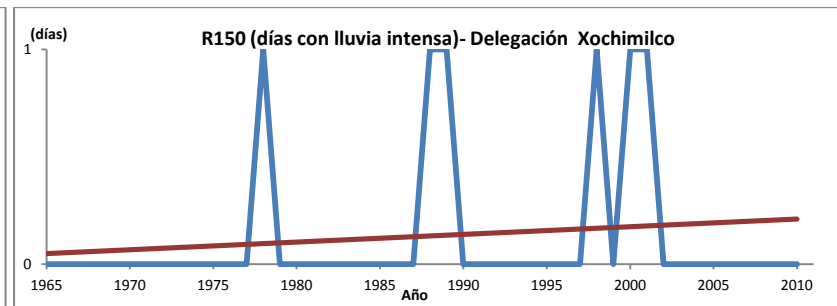
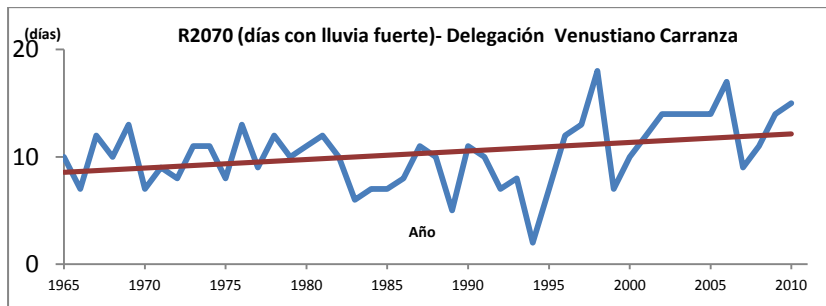
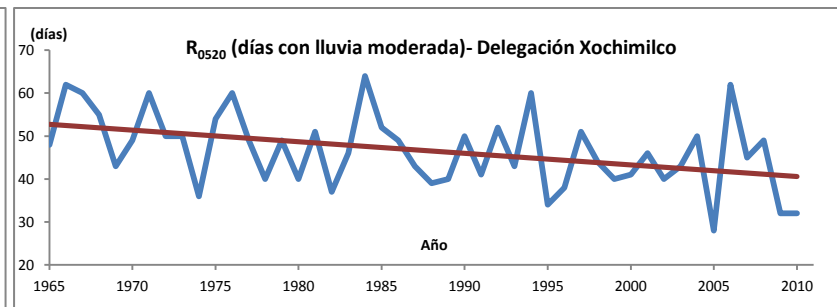
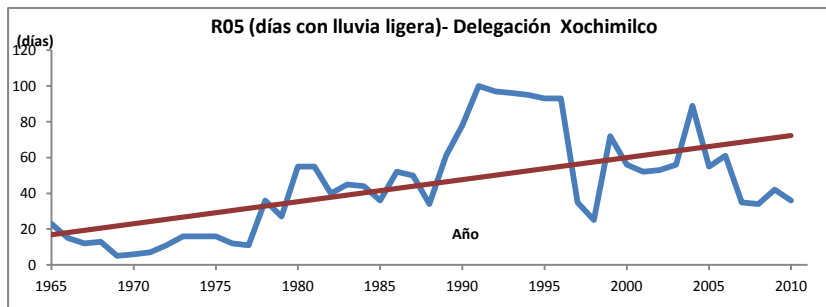
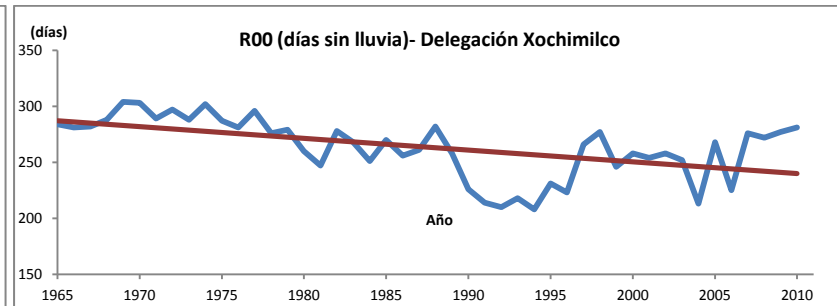
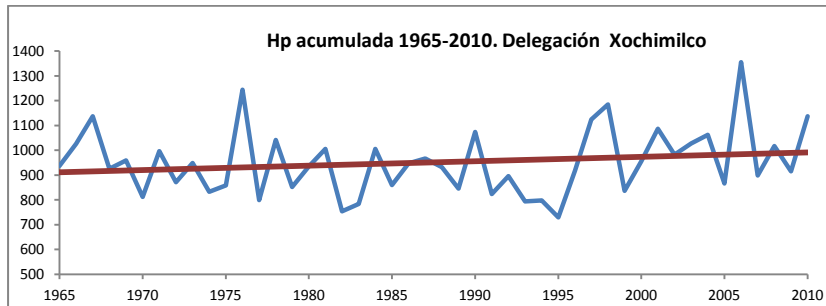


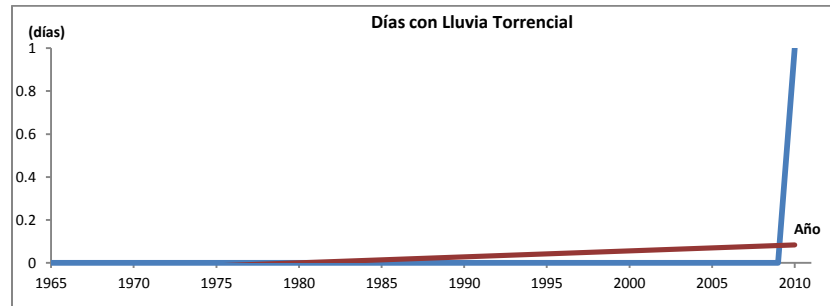


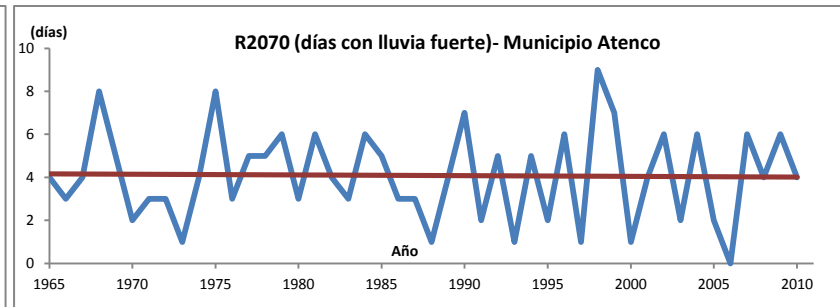
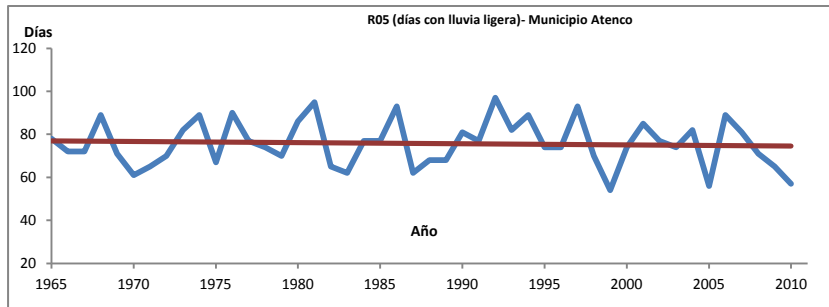
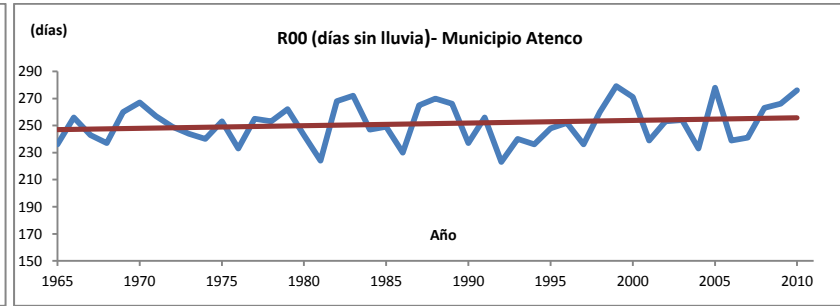
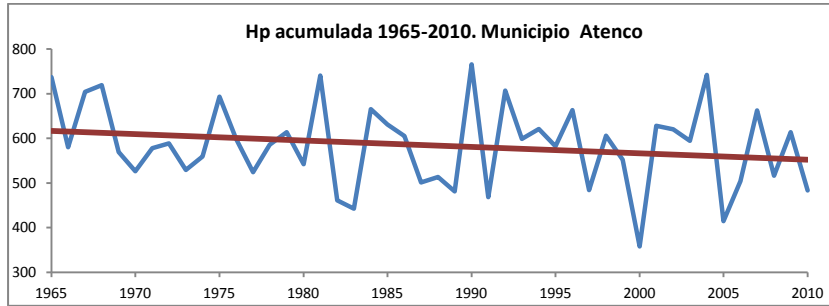


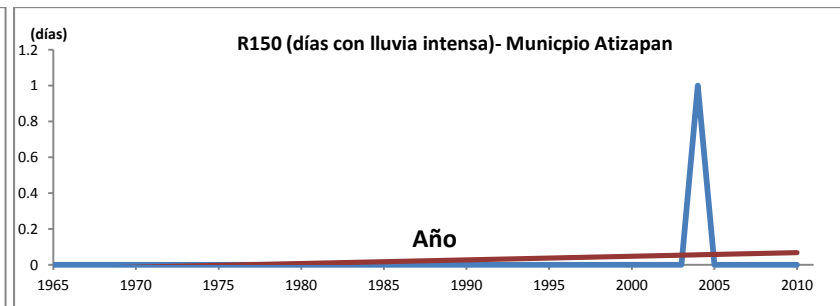
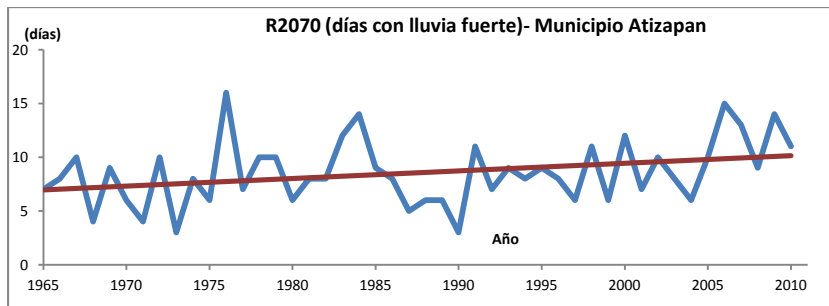
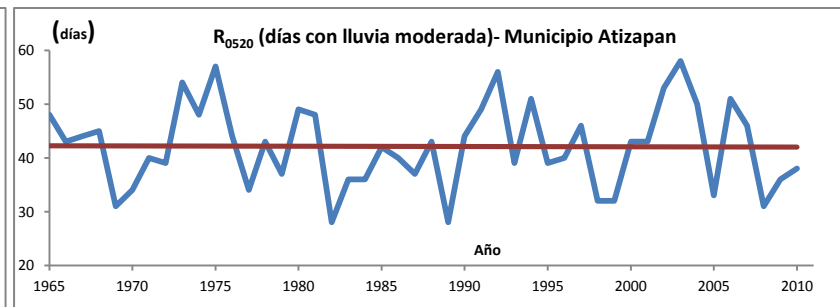
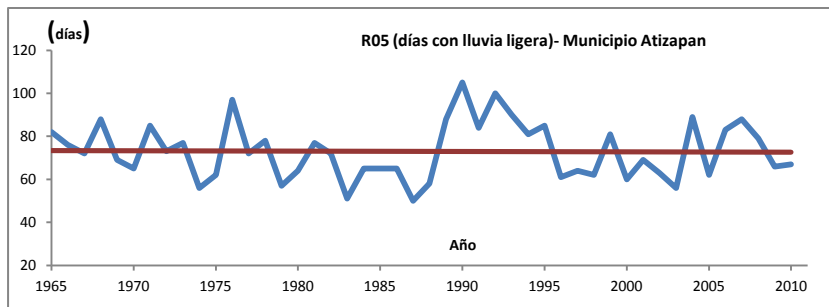
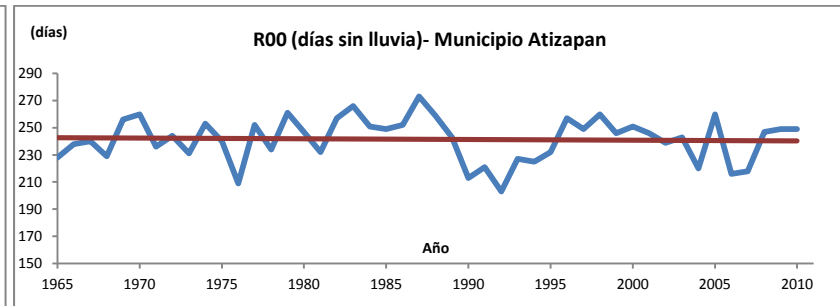
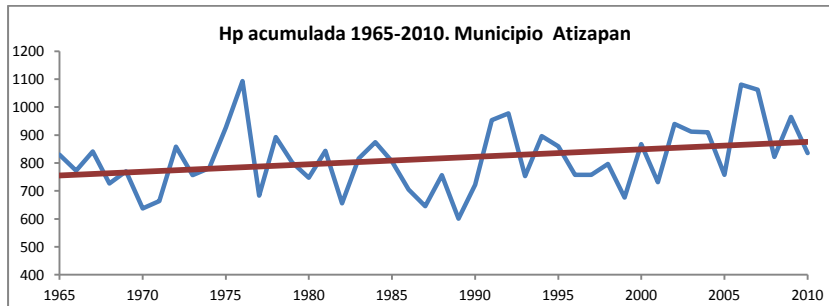


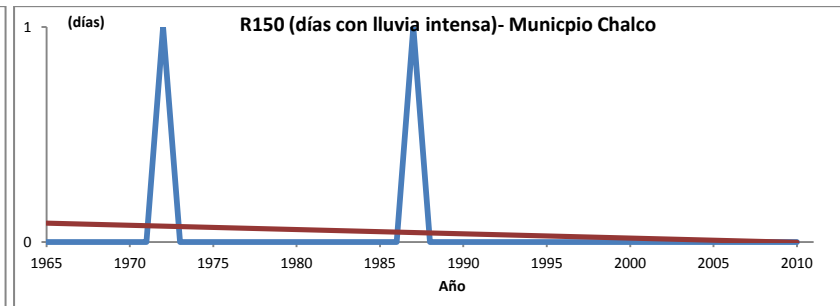
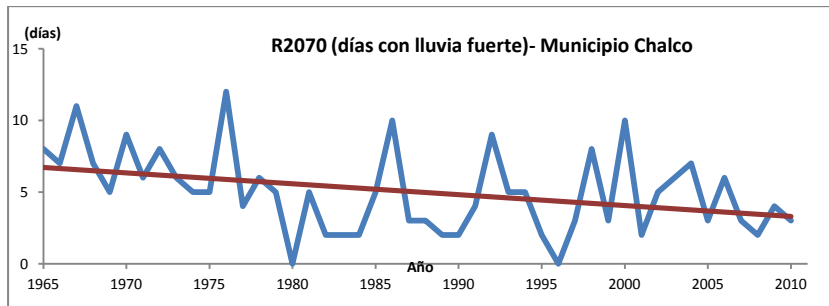
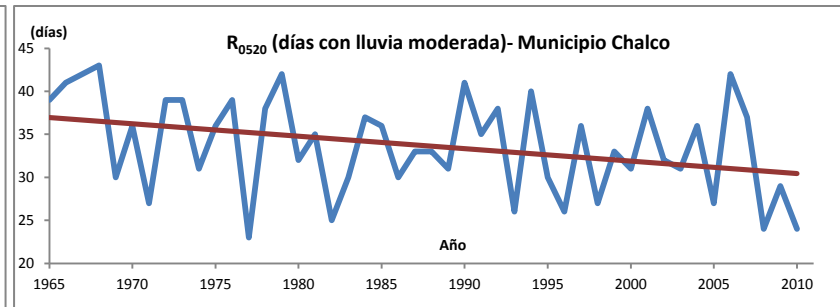
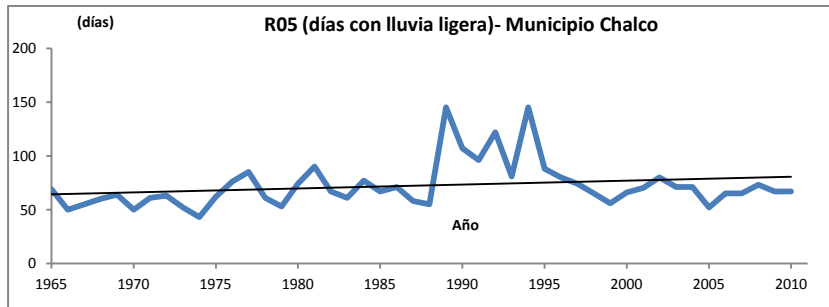
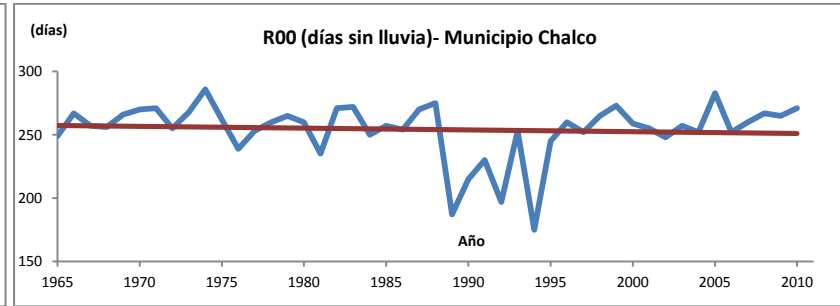
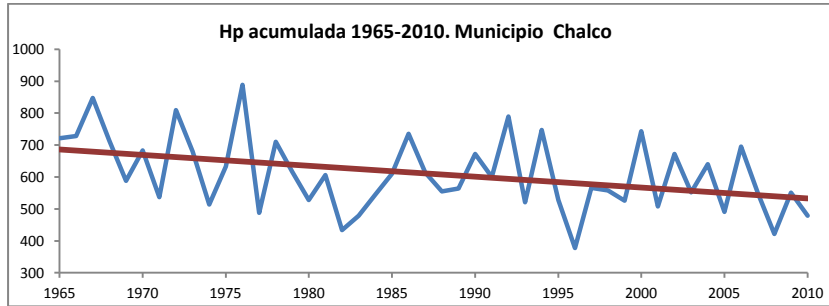


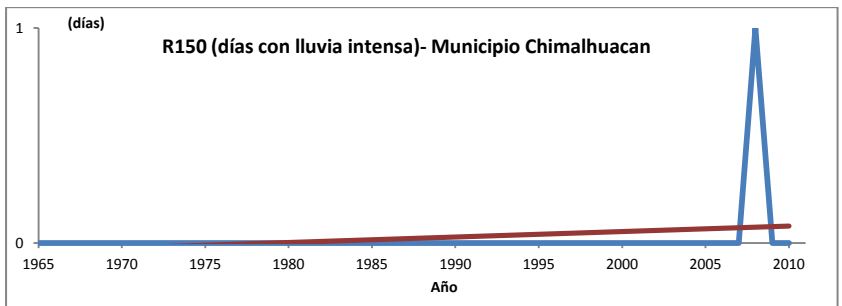
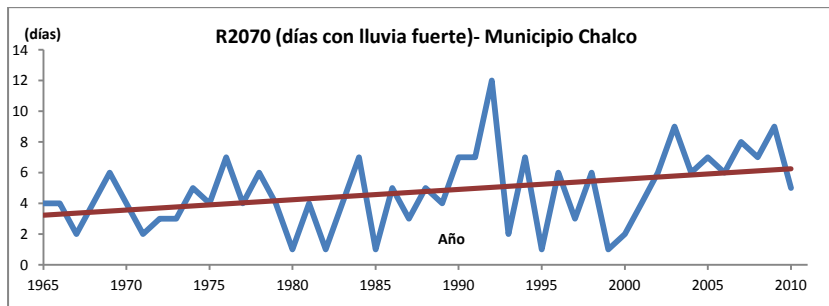
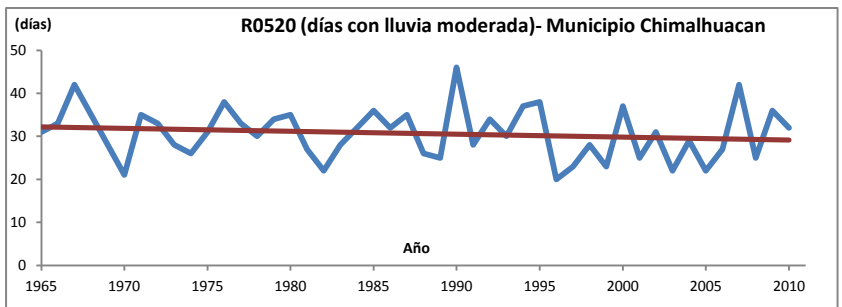
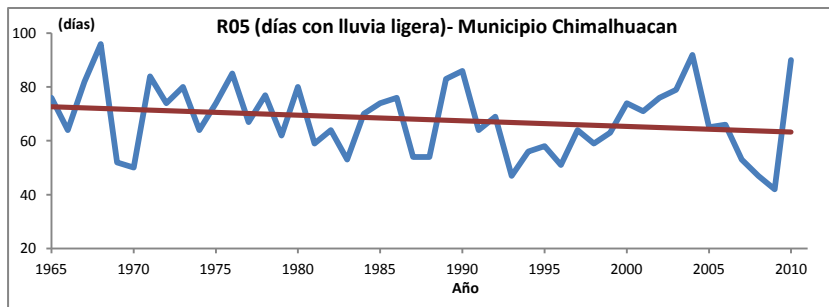
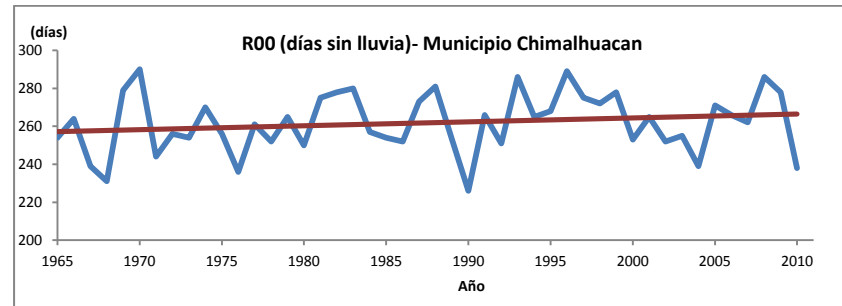
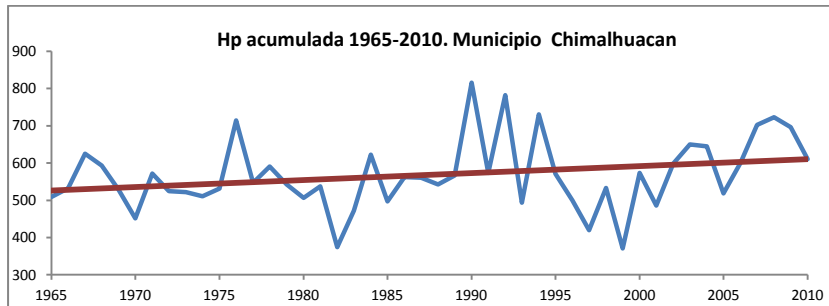


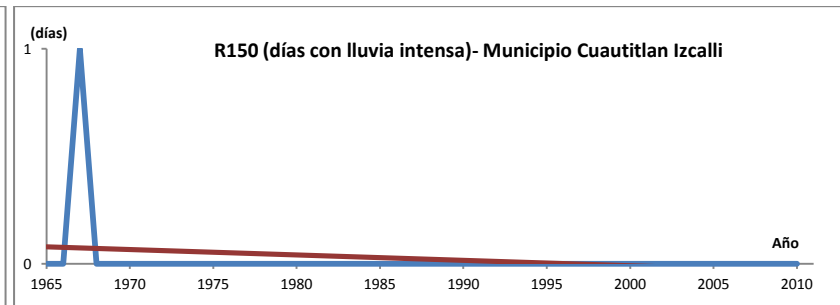
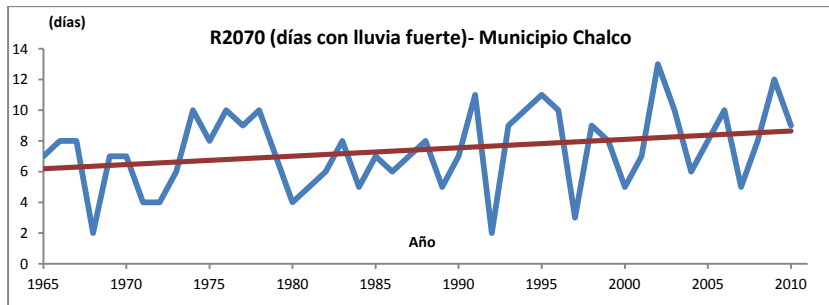
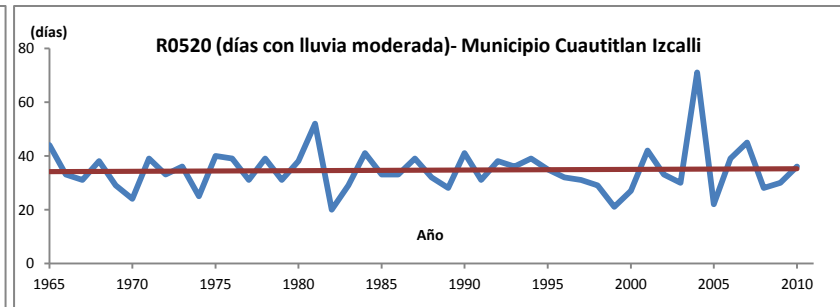
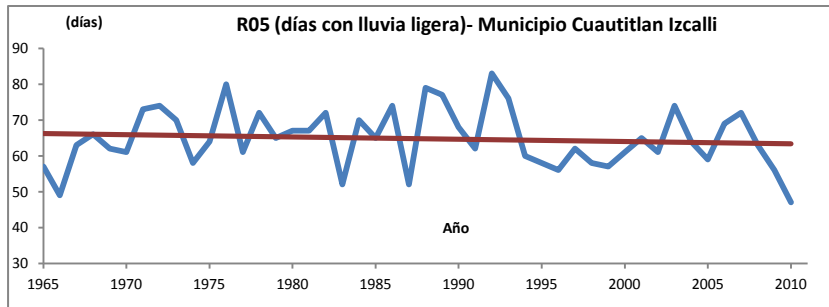
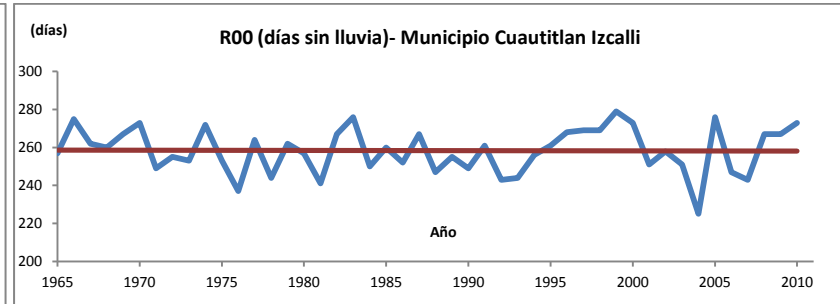
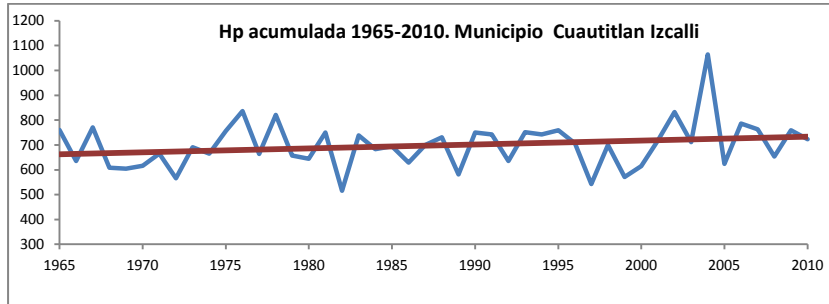


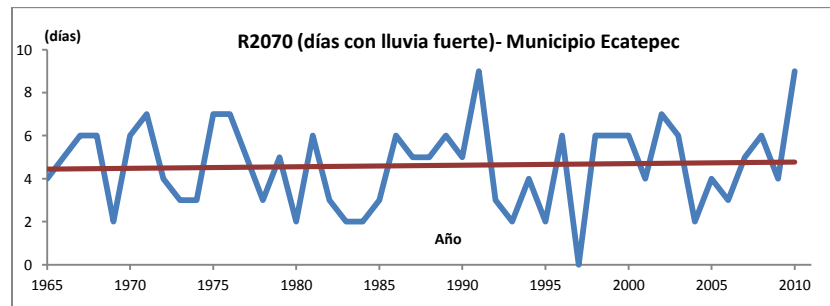
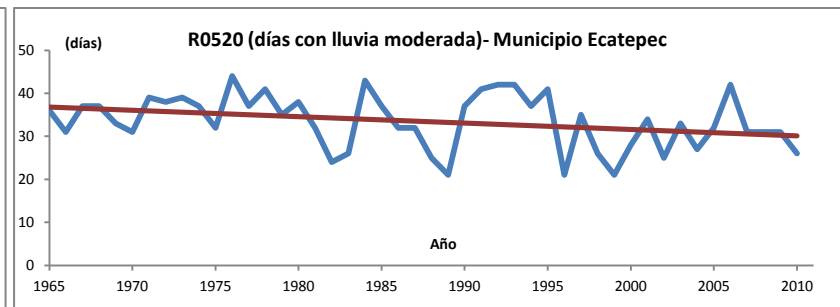
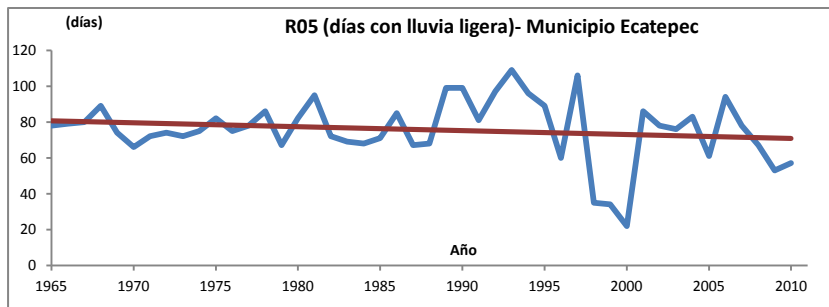
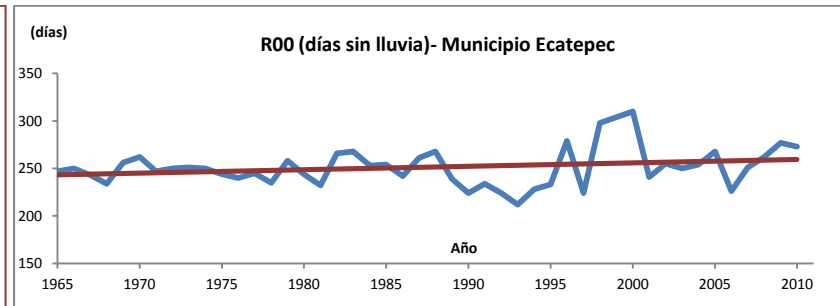
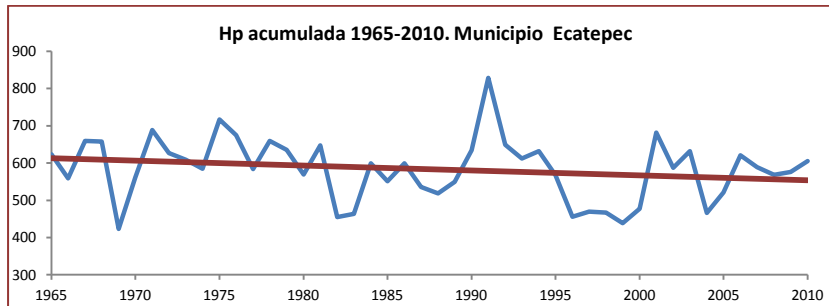




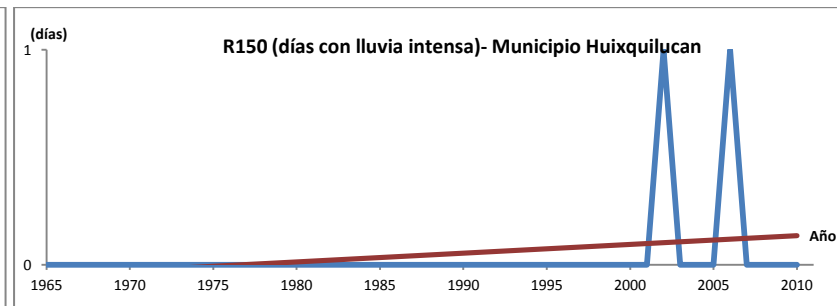
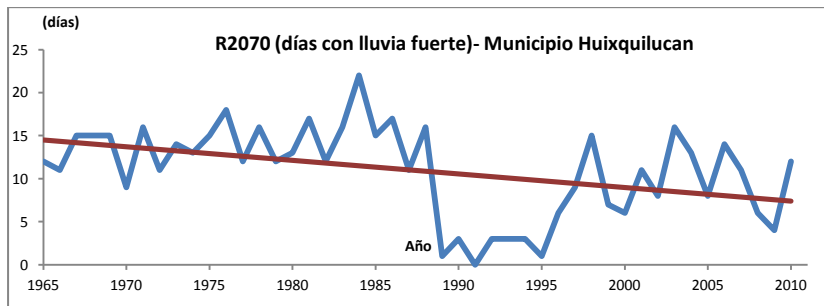
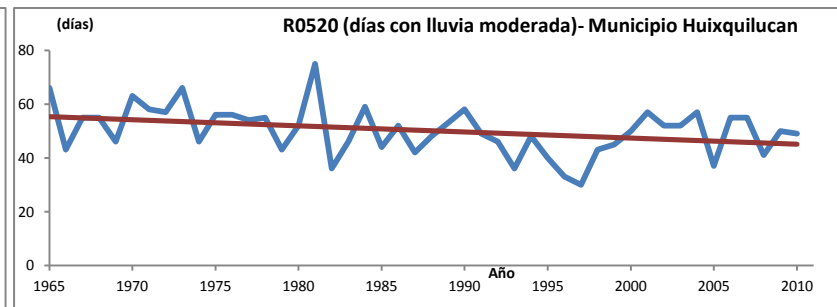
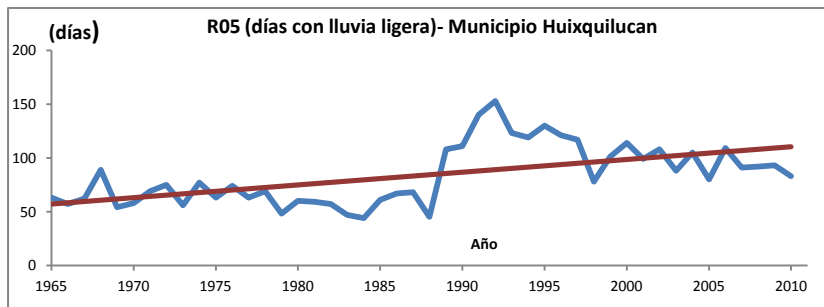
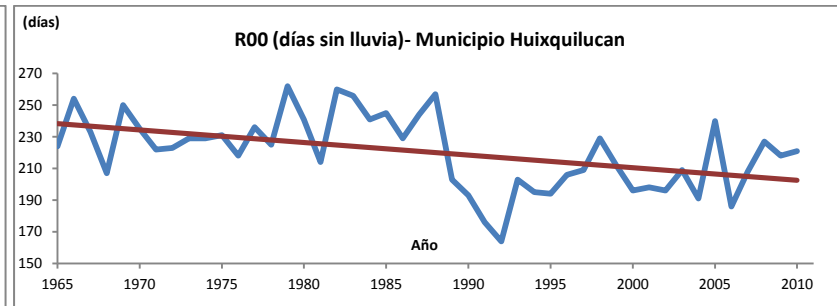
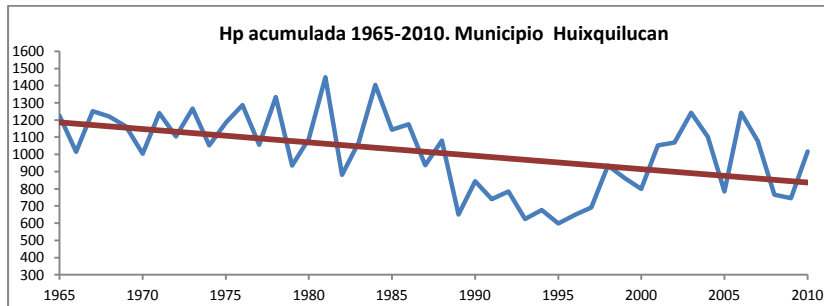


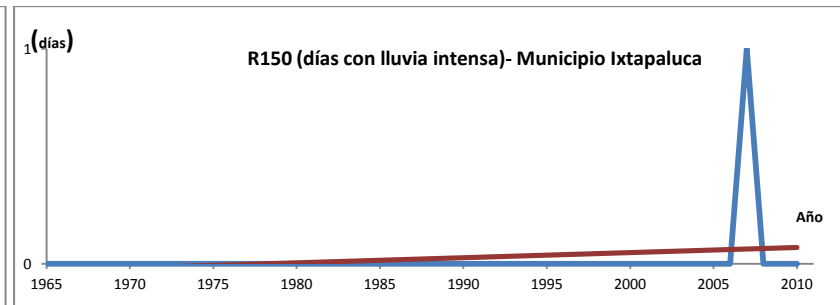
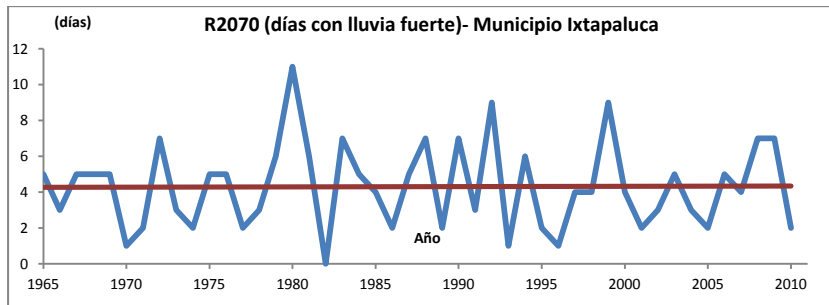
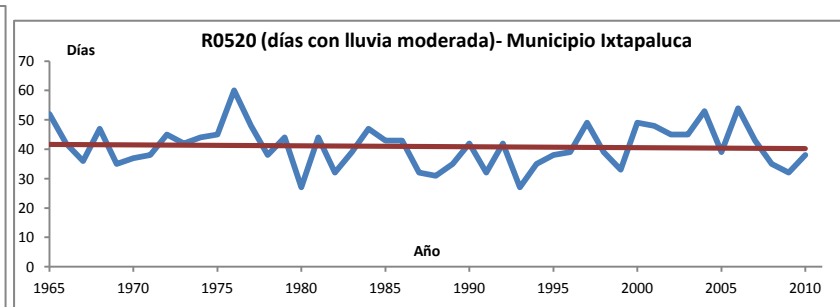
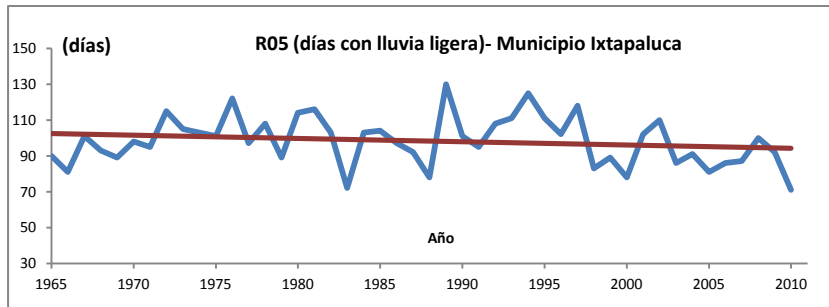
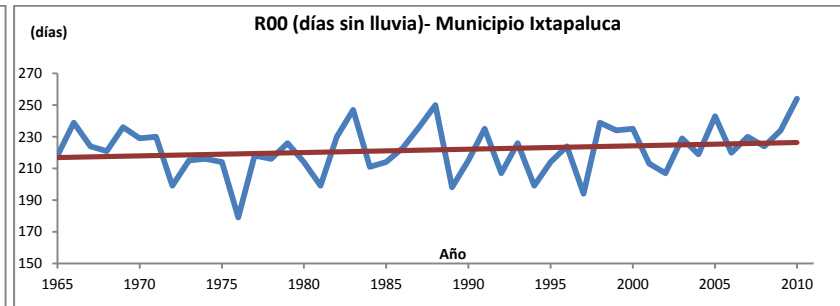
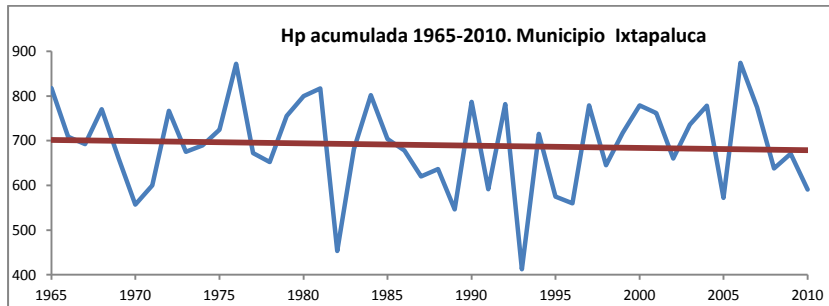


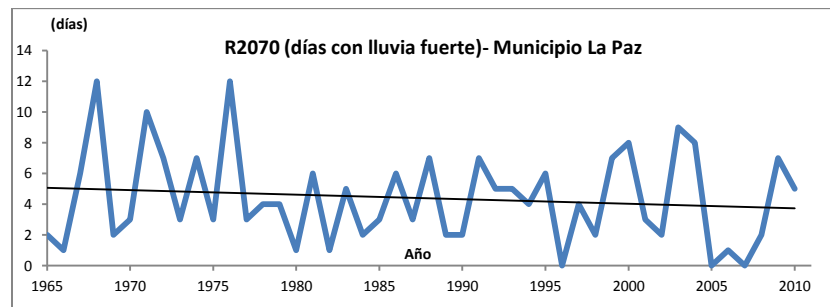
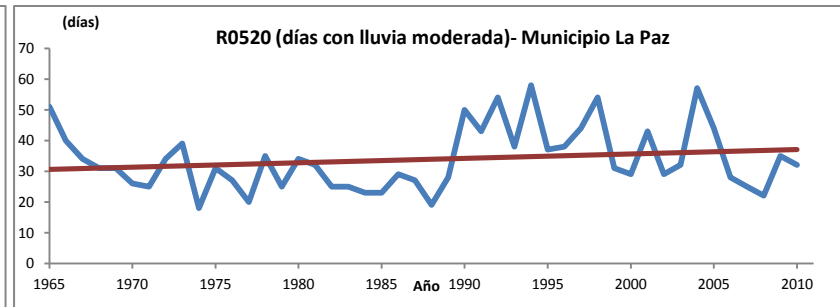
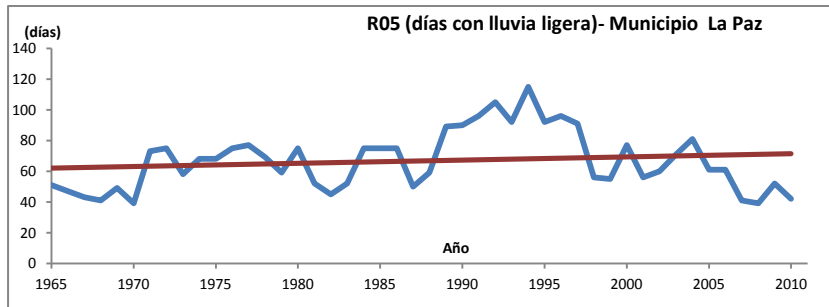
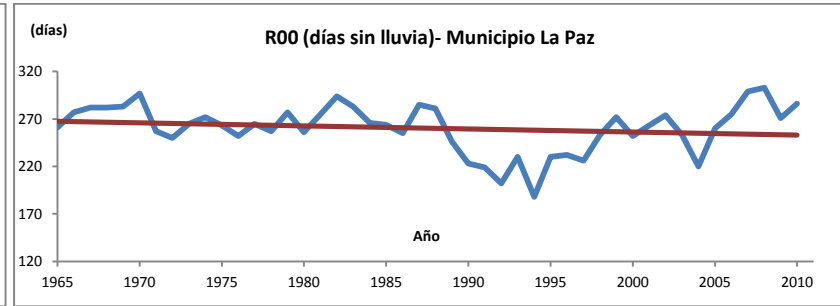
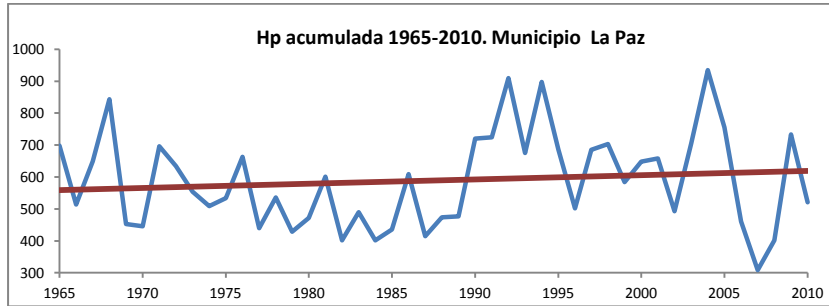


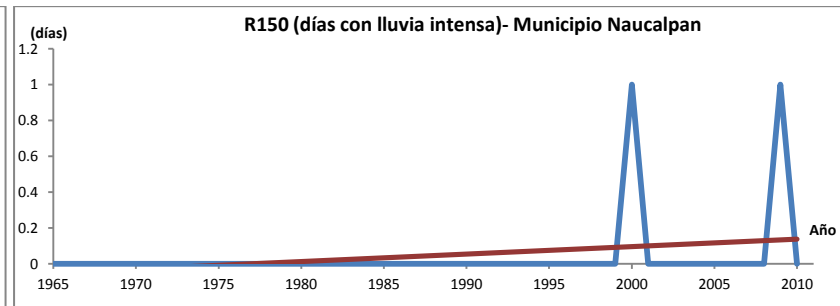
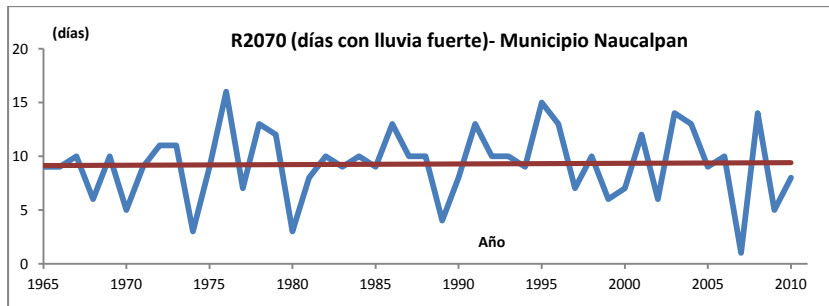
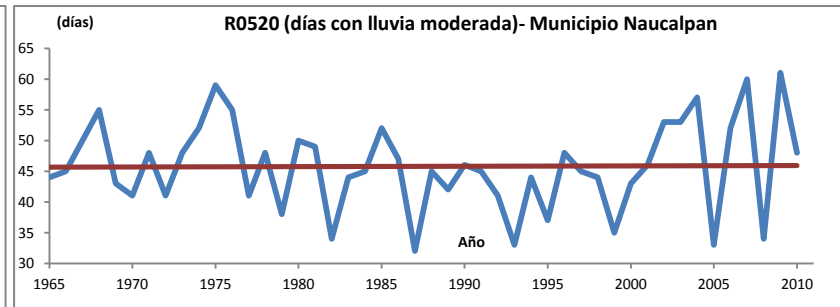
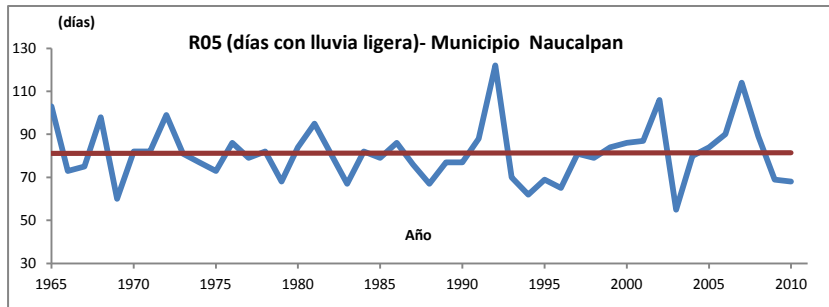
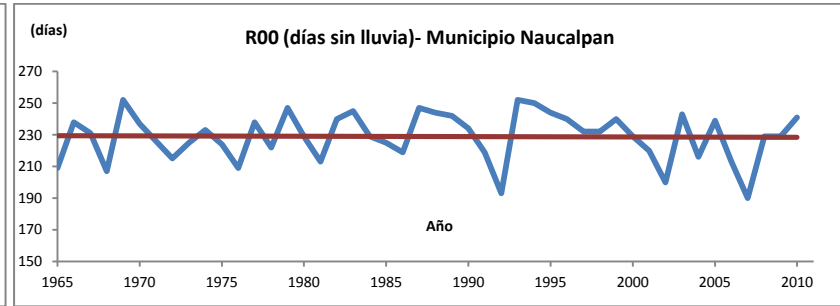
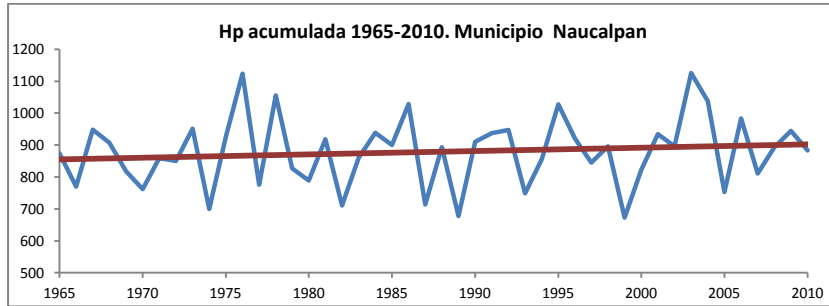


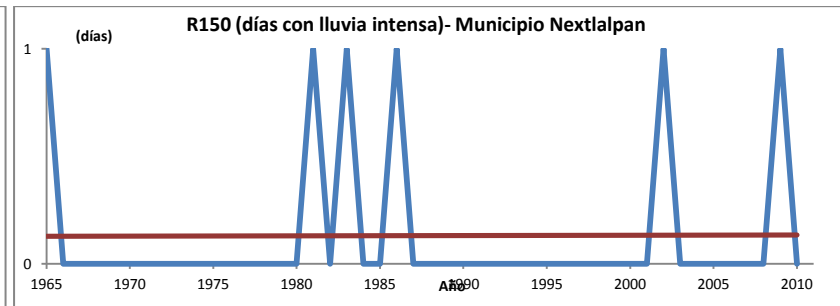
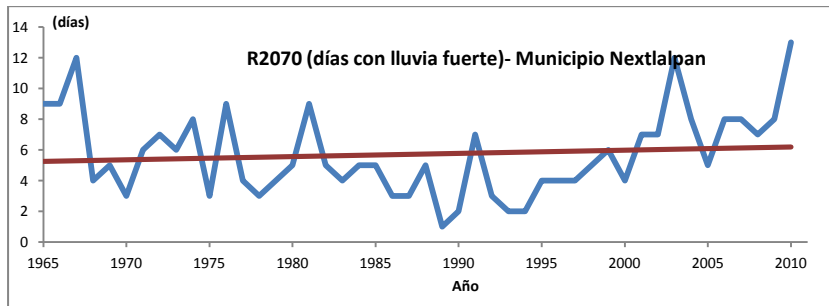
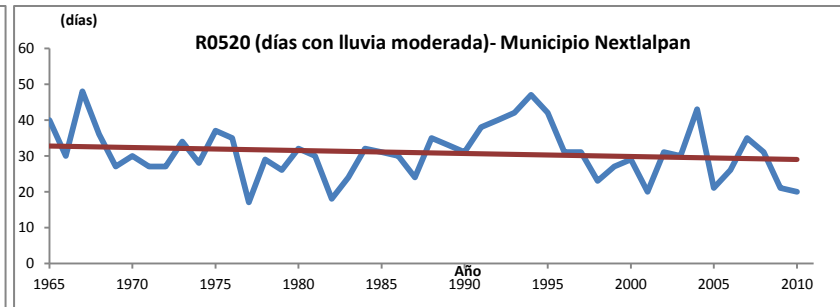
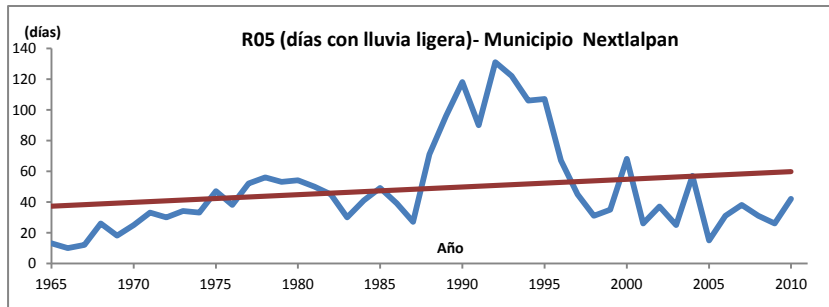
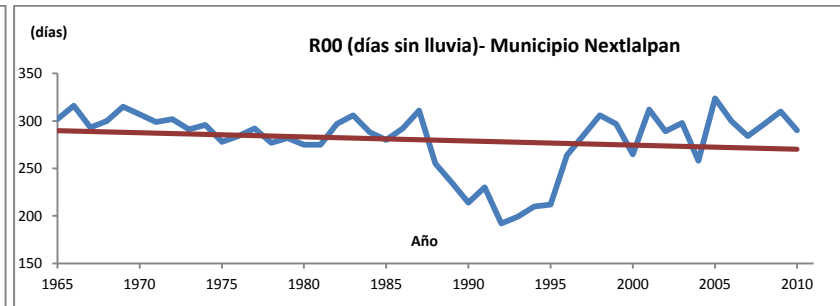
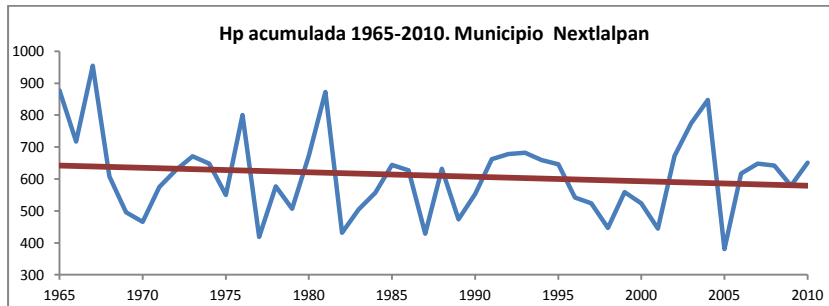


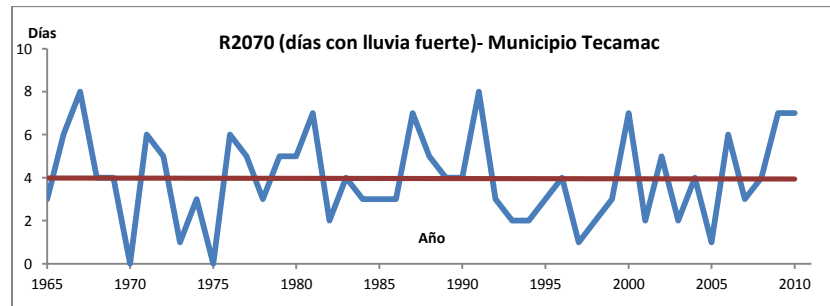
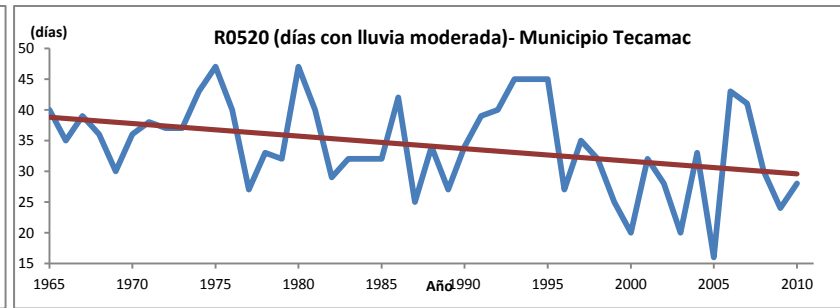
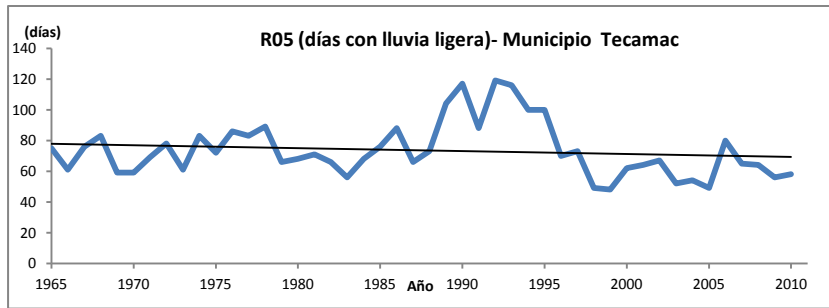
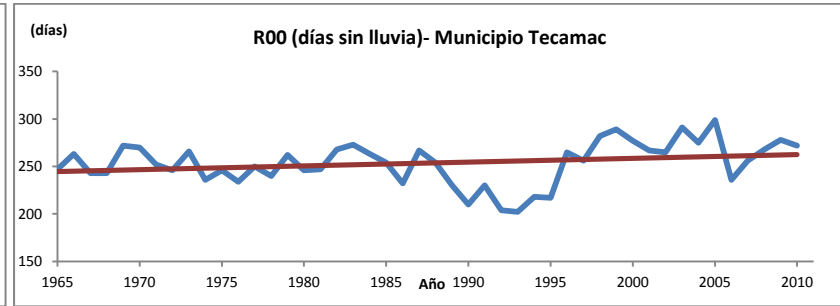
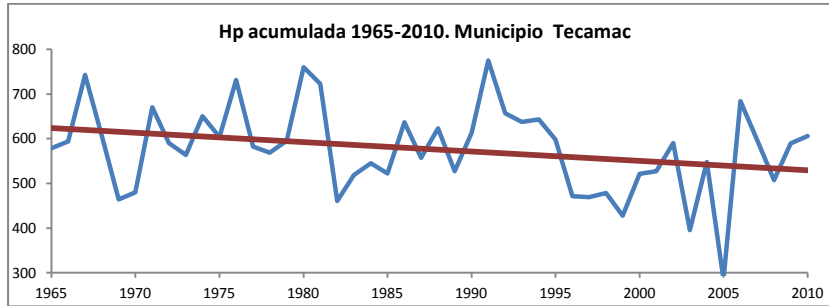


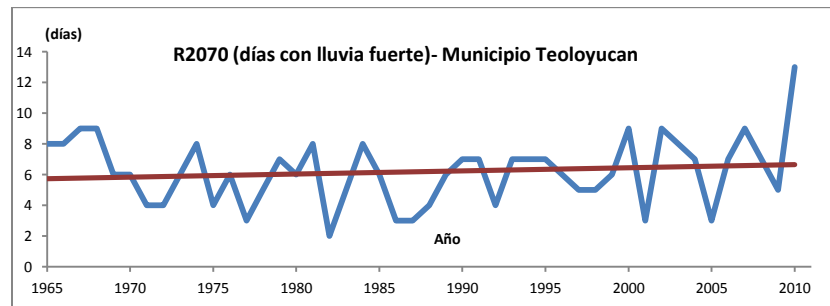
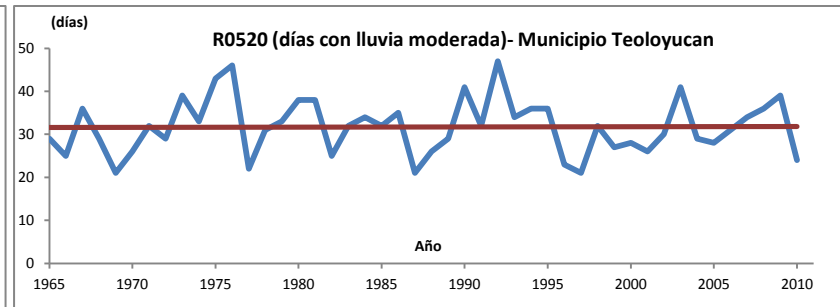
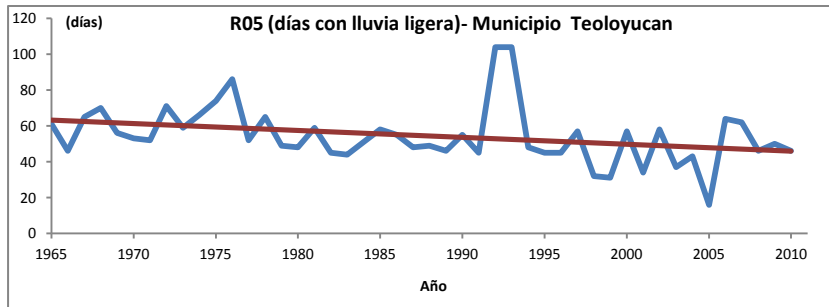
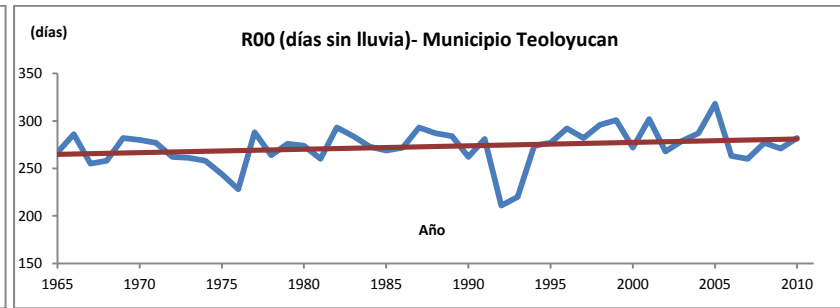
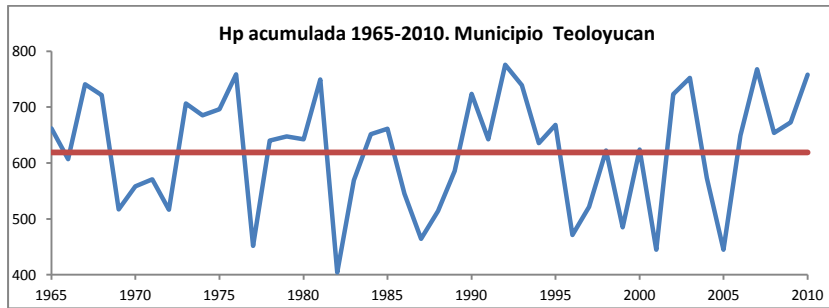


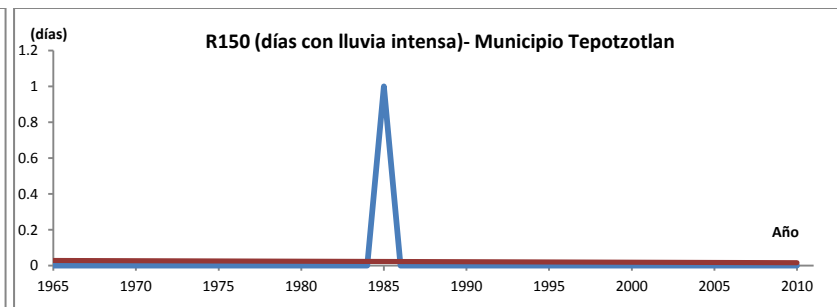
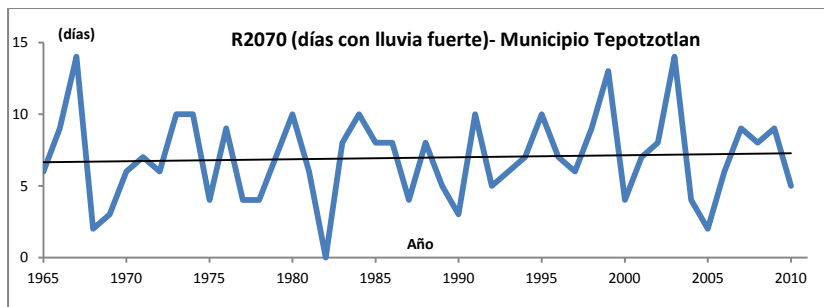
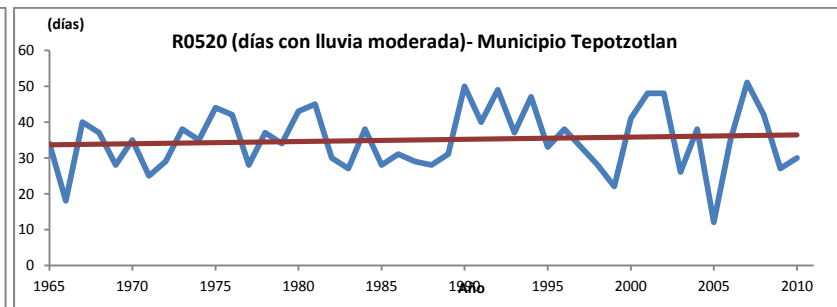
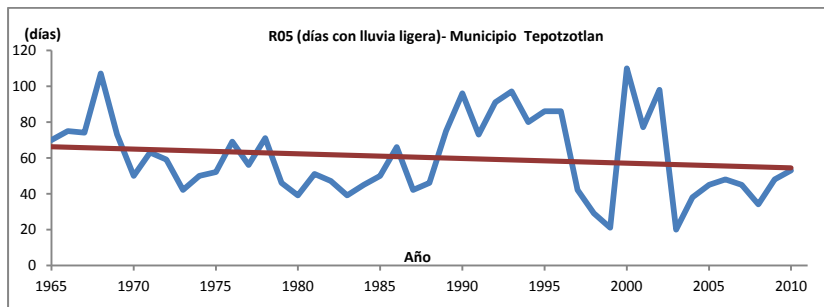
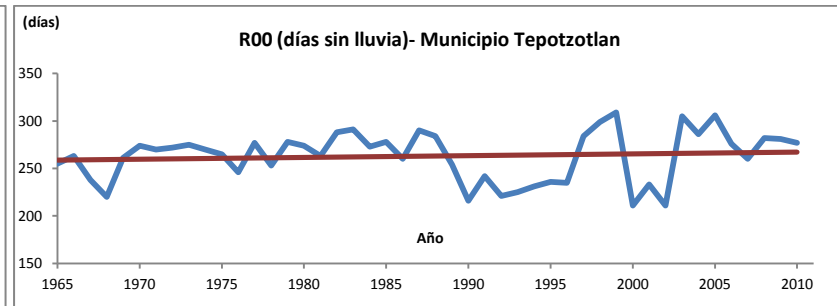
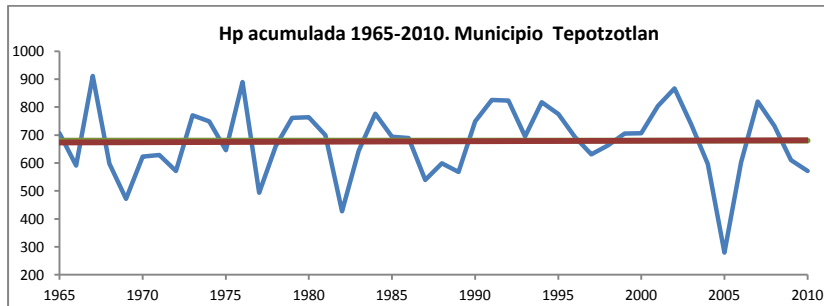




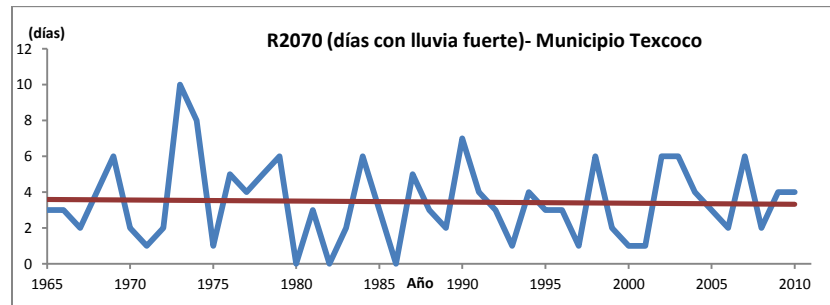
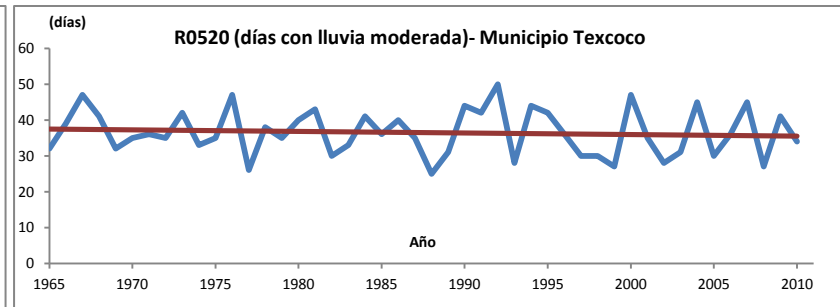
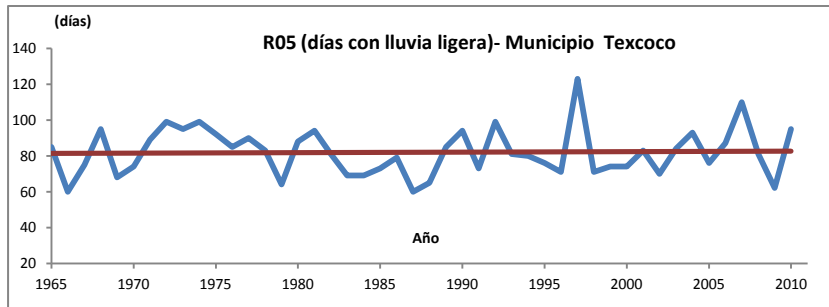
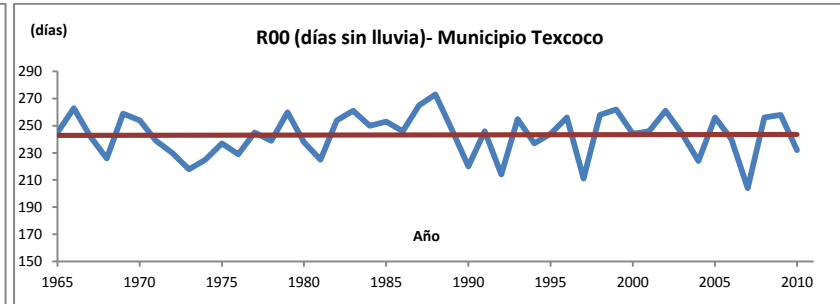
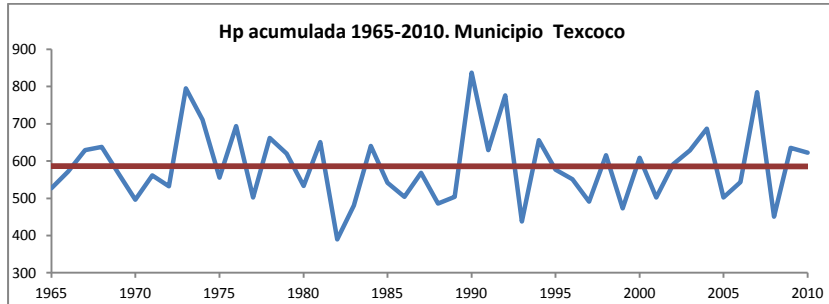


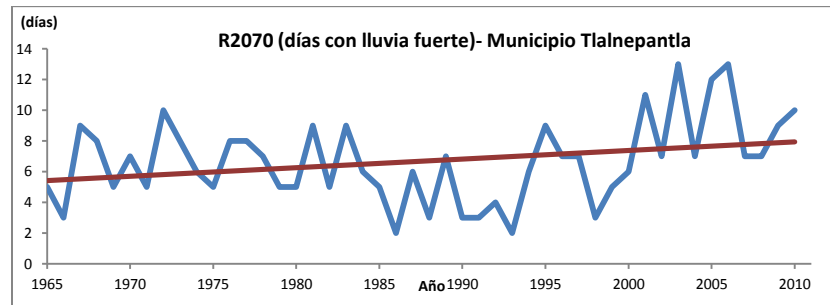
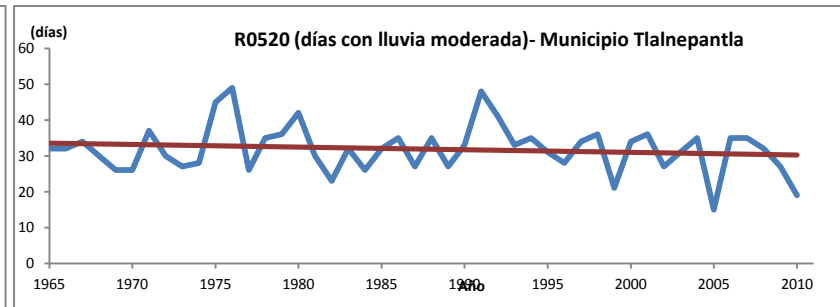
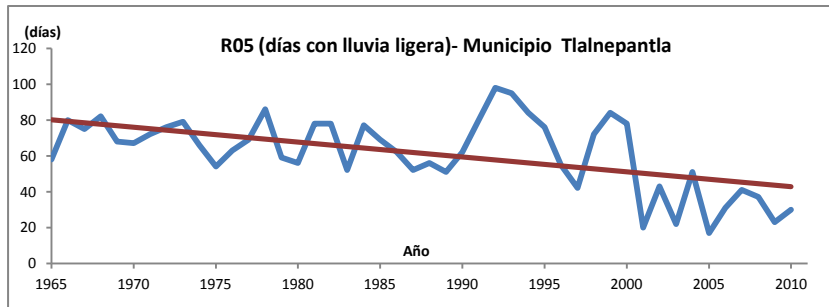
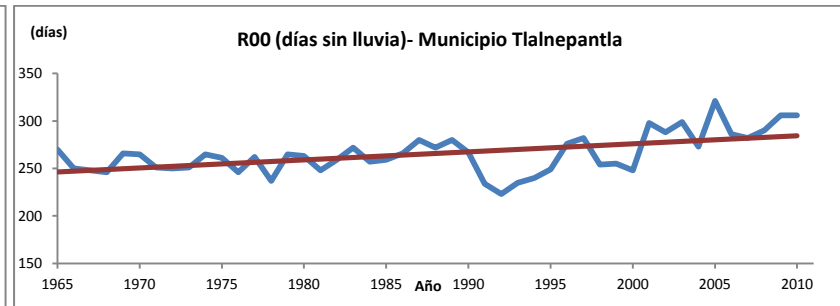
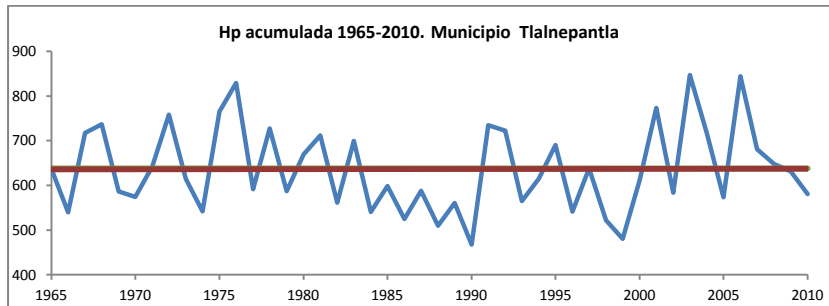


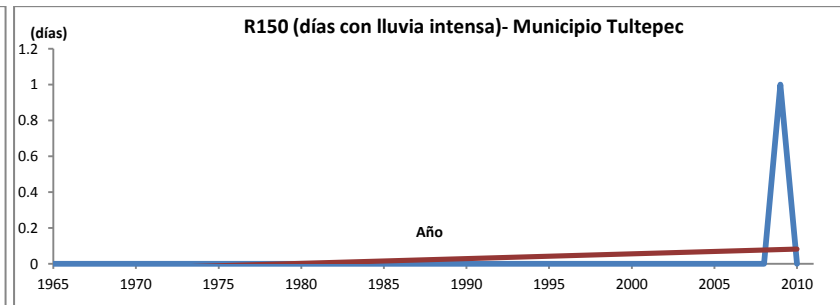
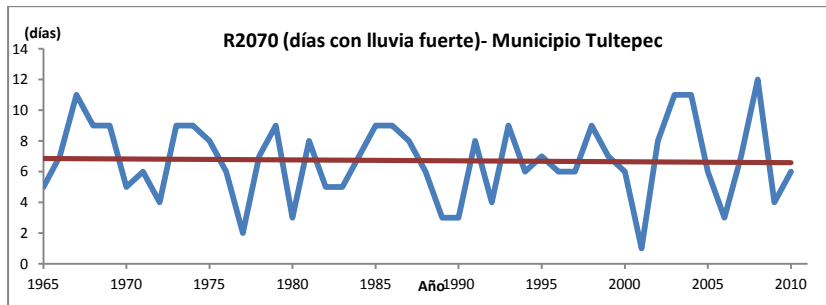
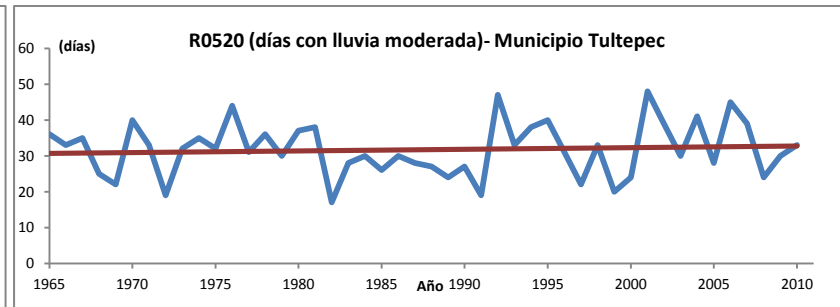
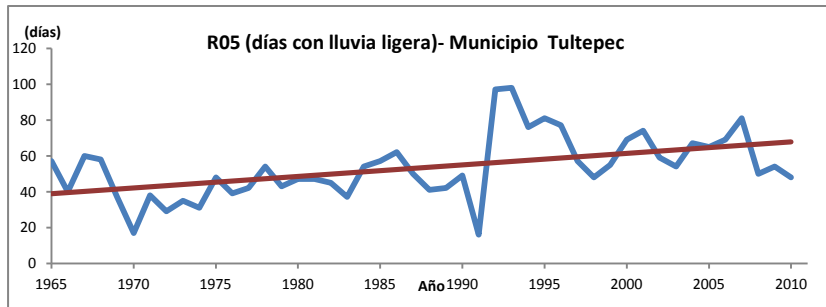
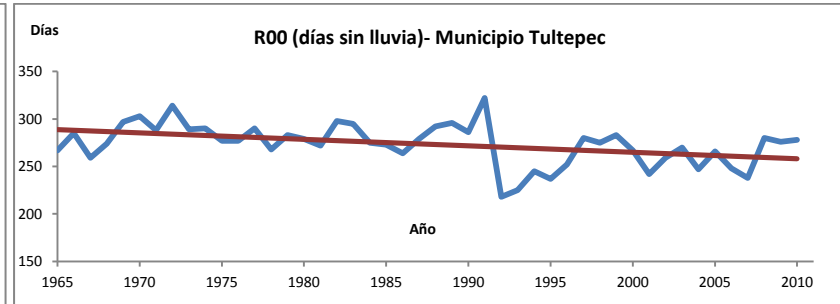
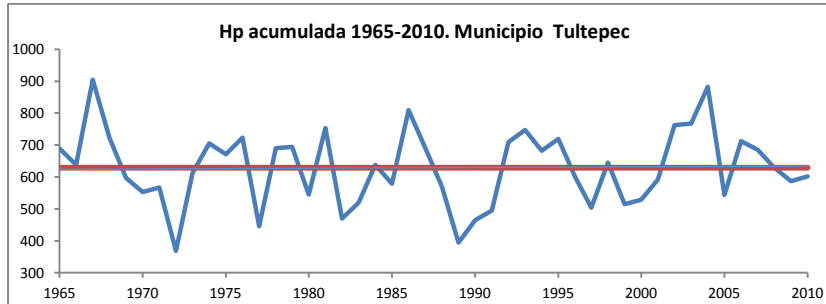


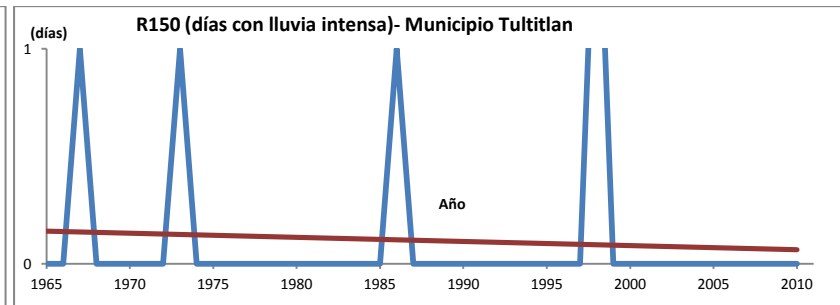
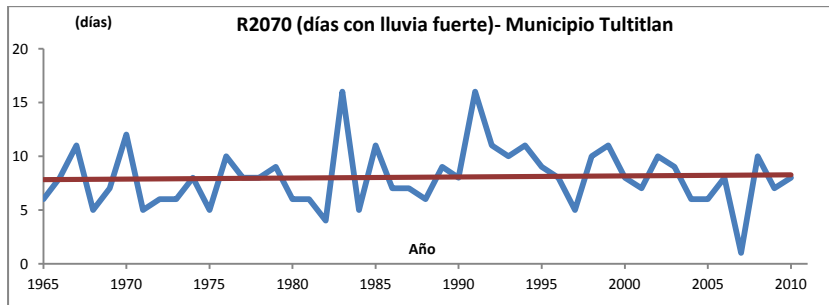
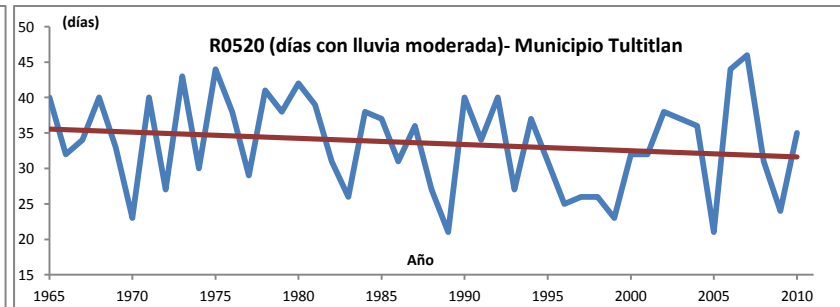
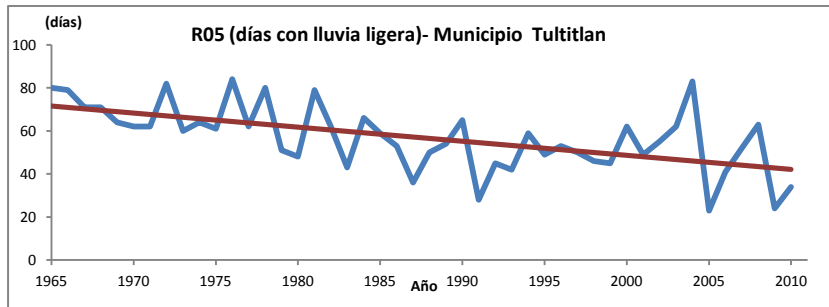
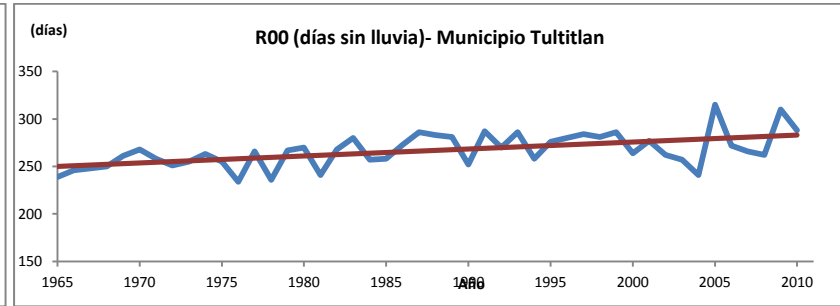
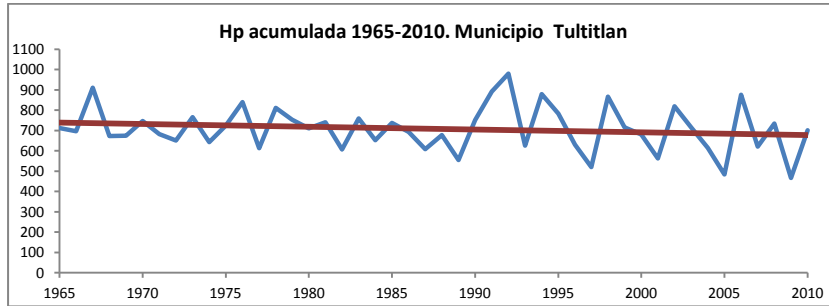


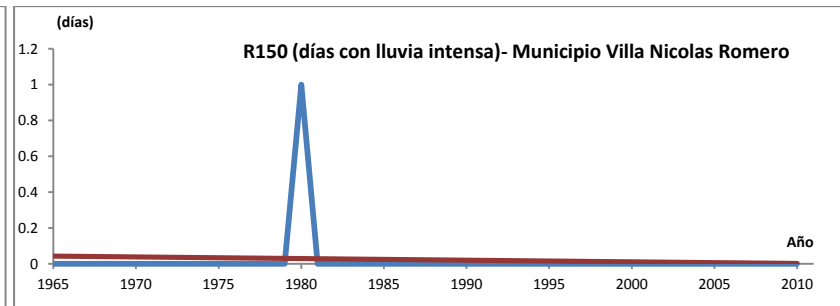
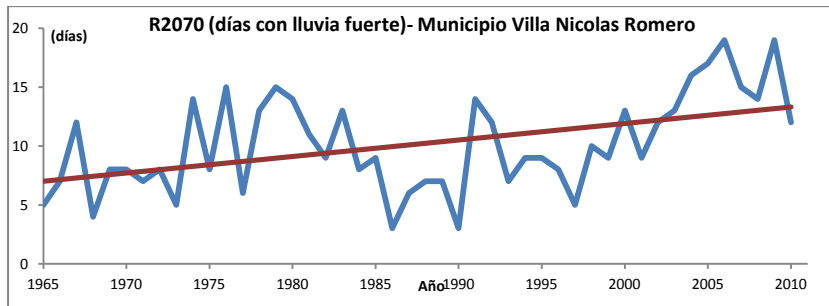
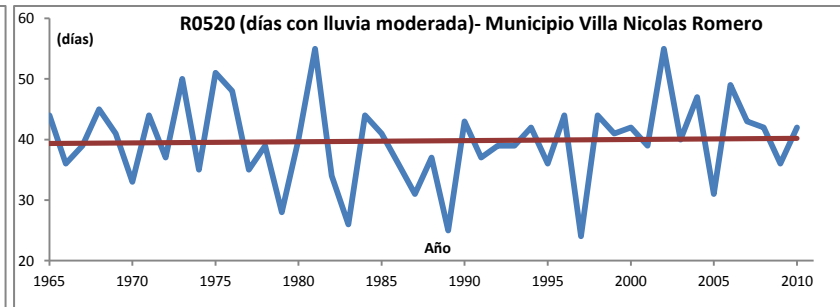
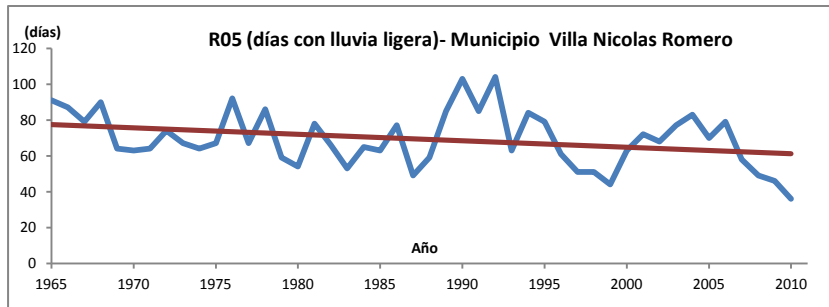
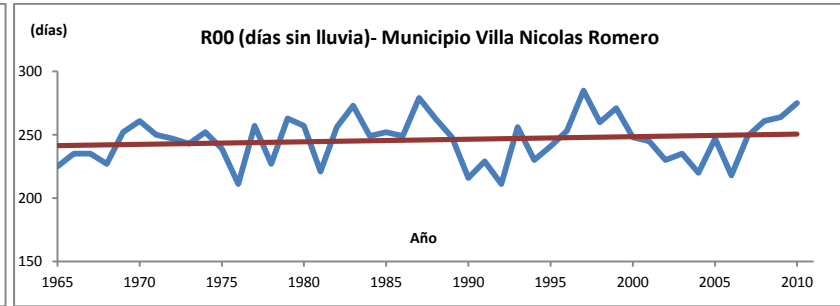
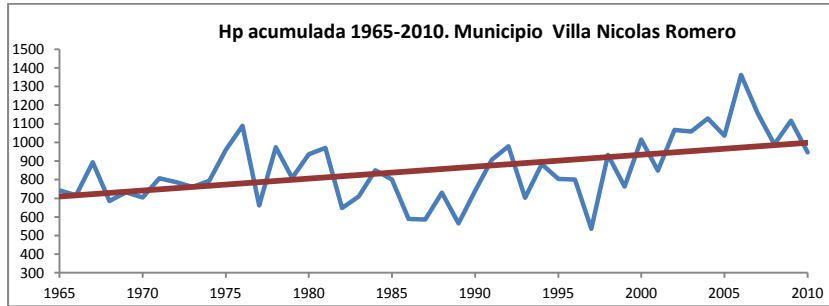


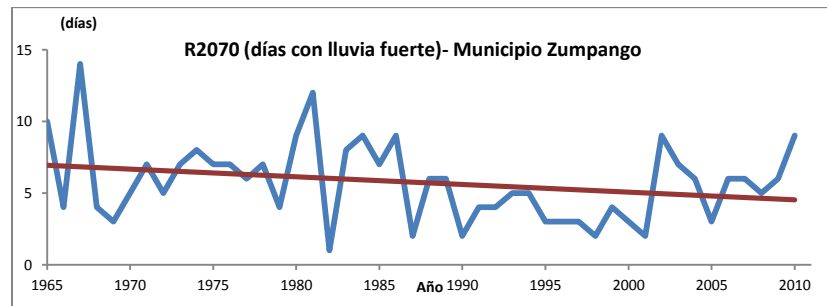
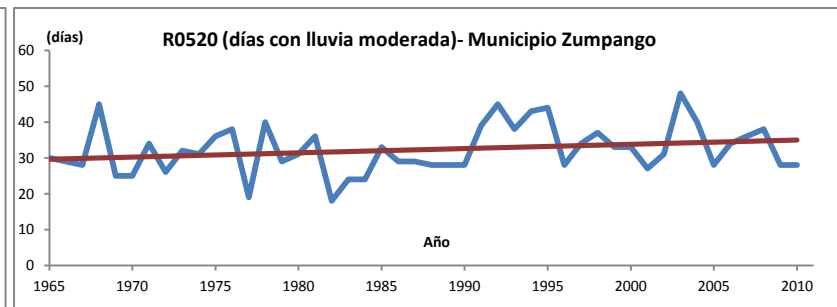
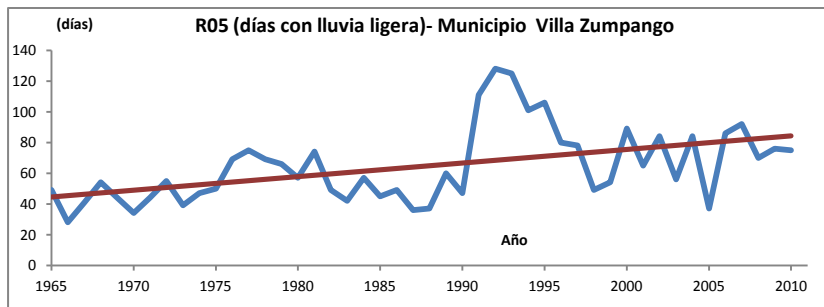
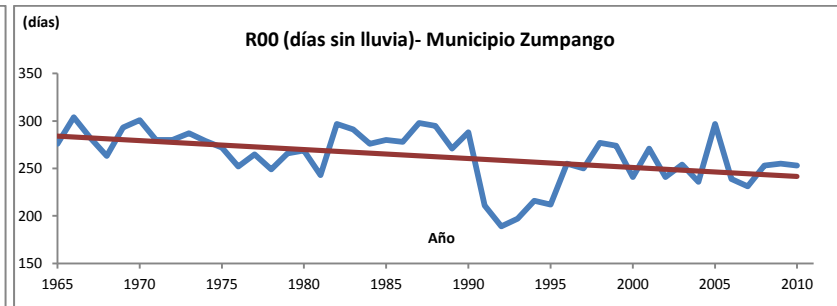
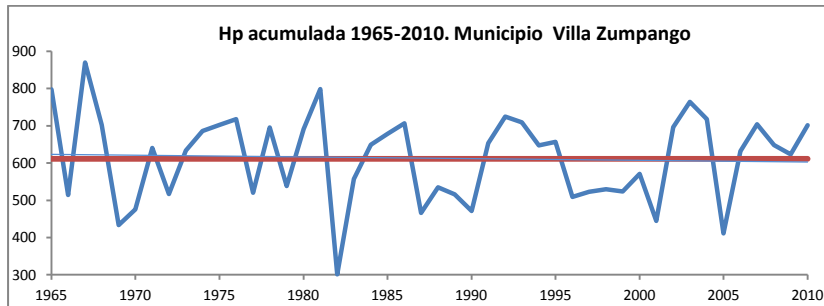








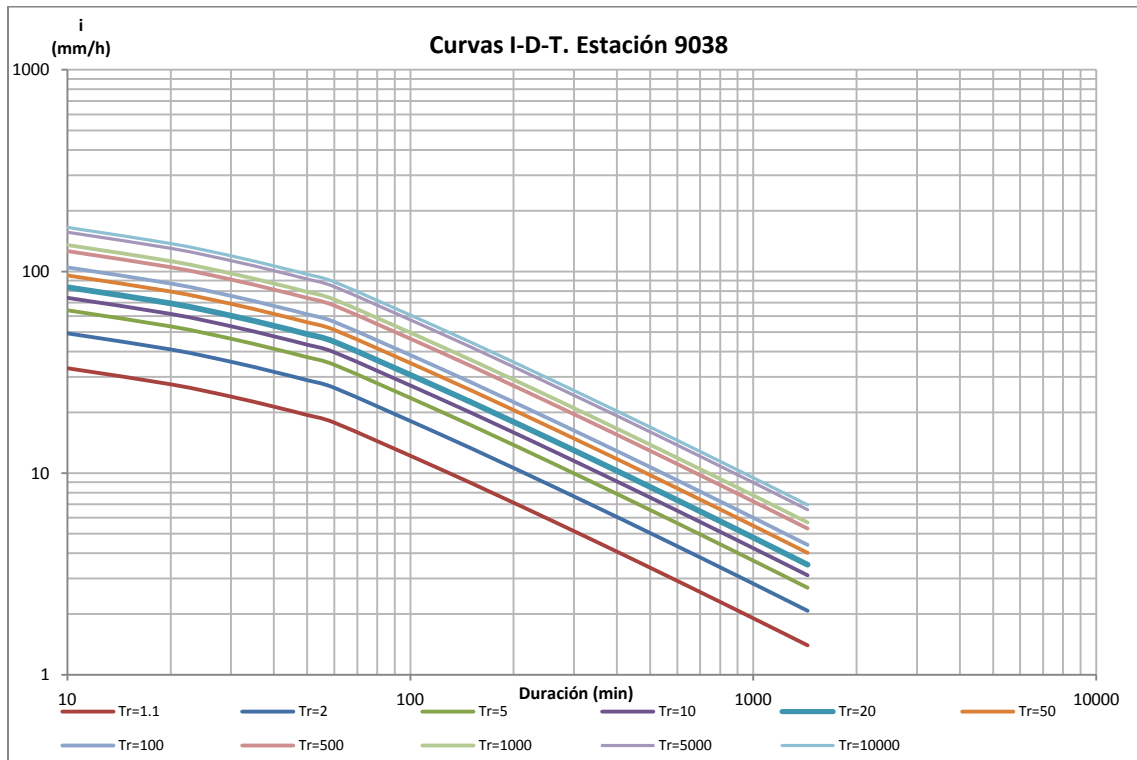
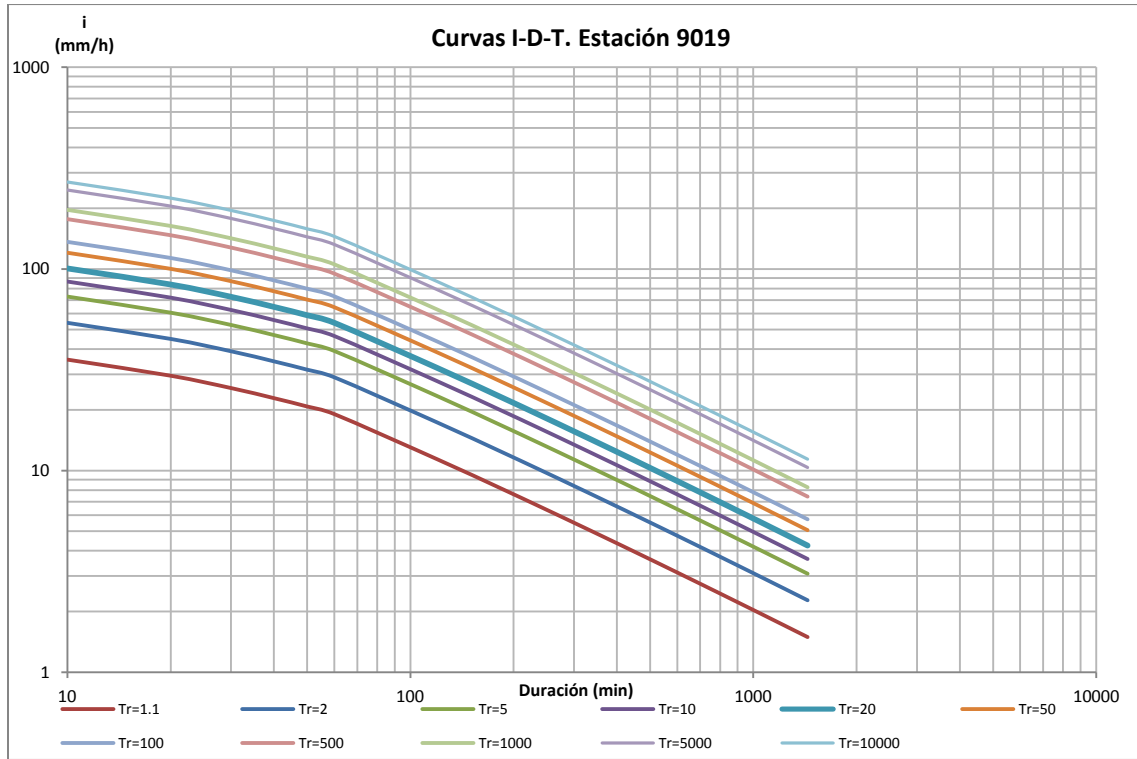




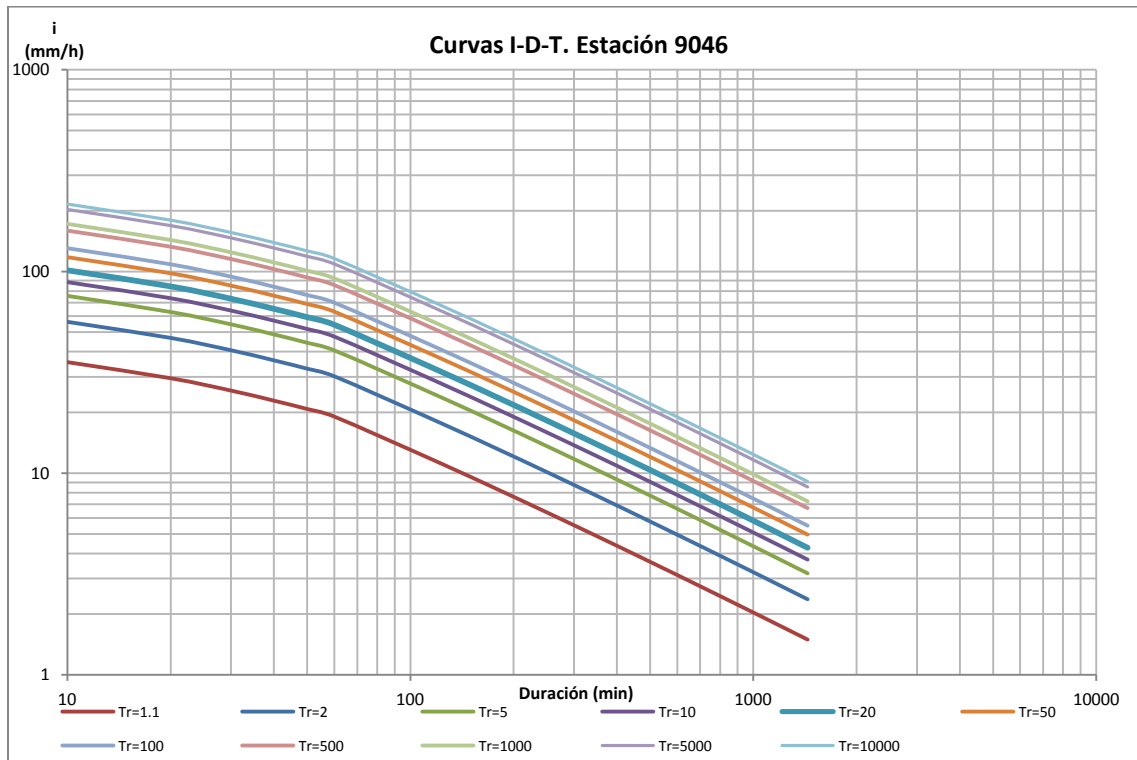
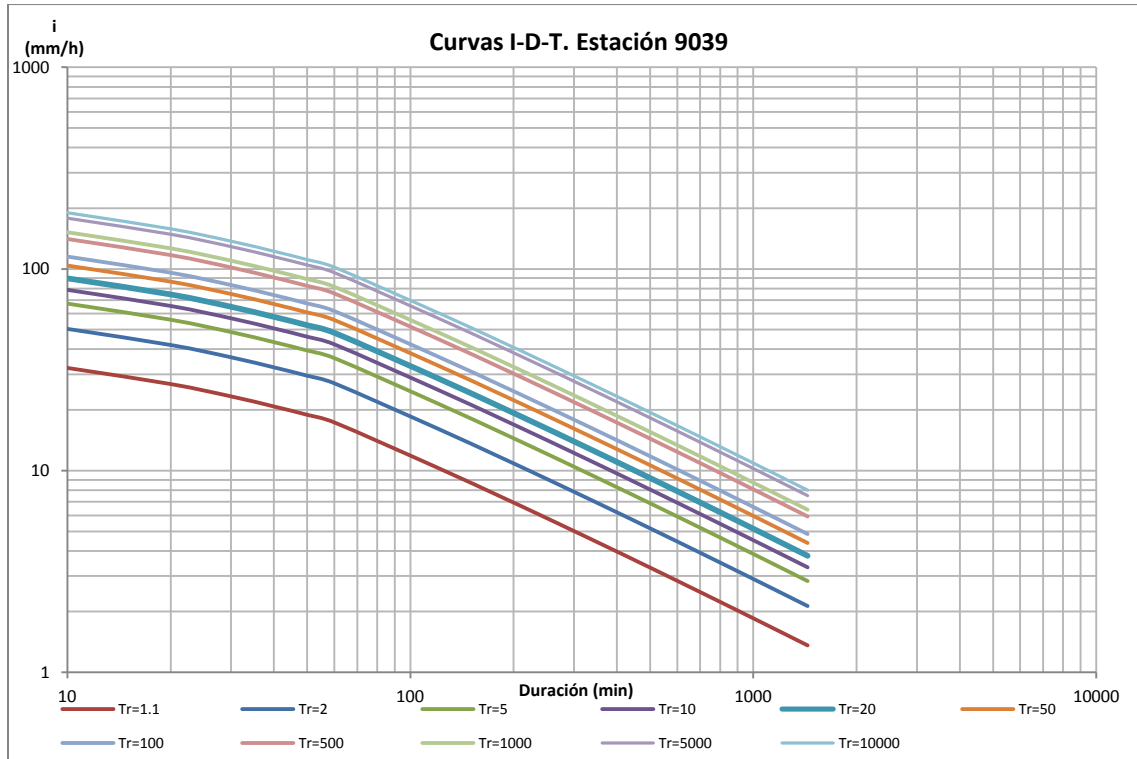
## **ANEXO B**

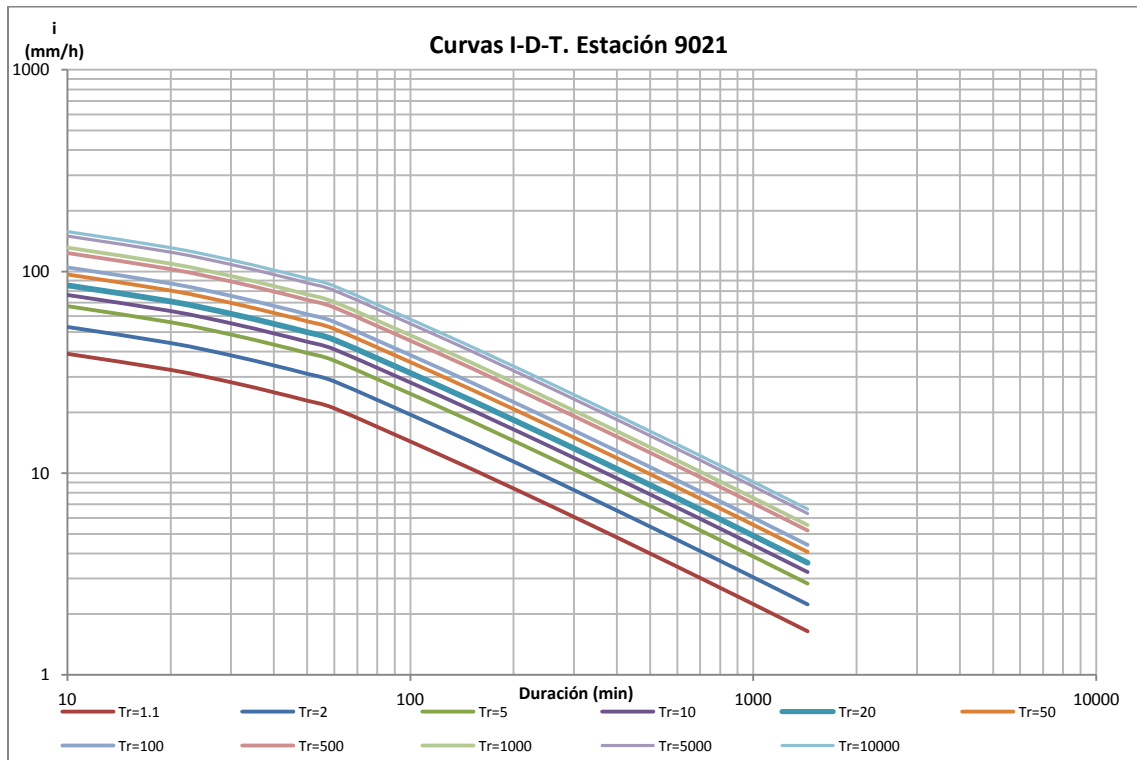
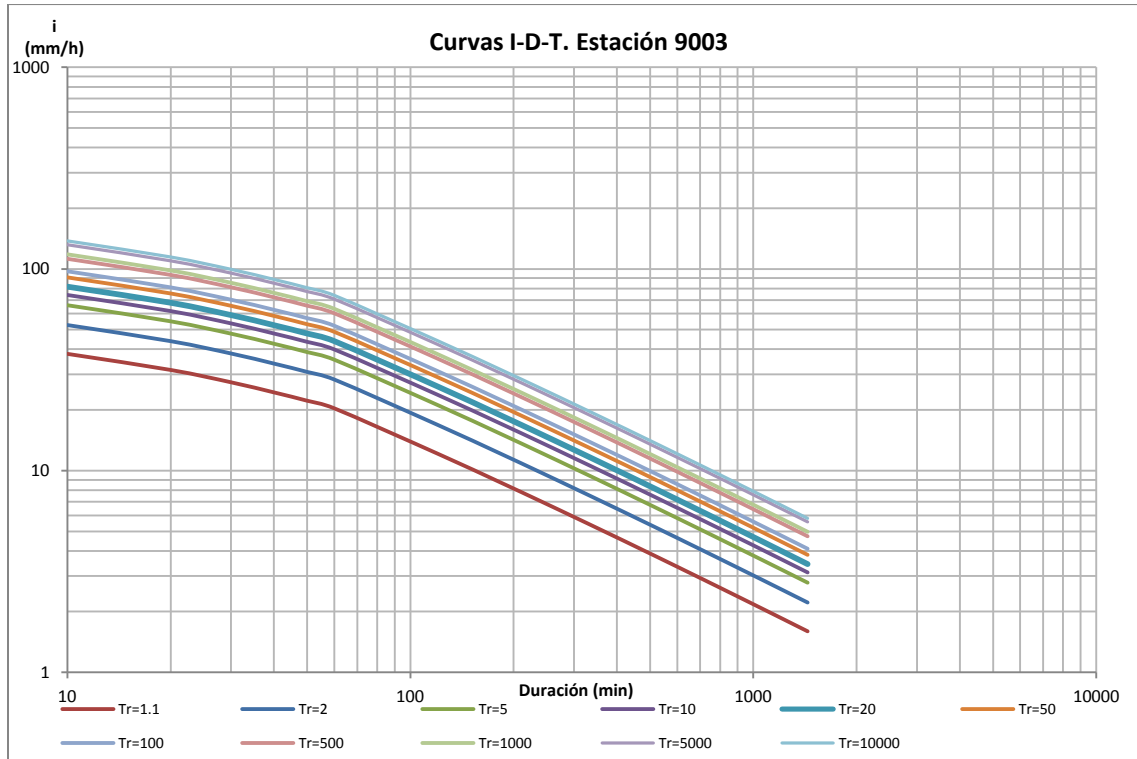
### **CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – PERIODO DE RETORNO**

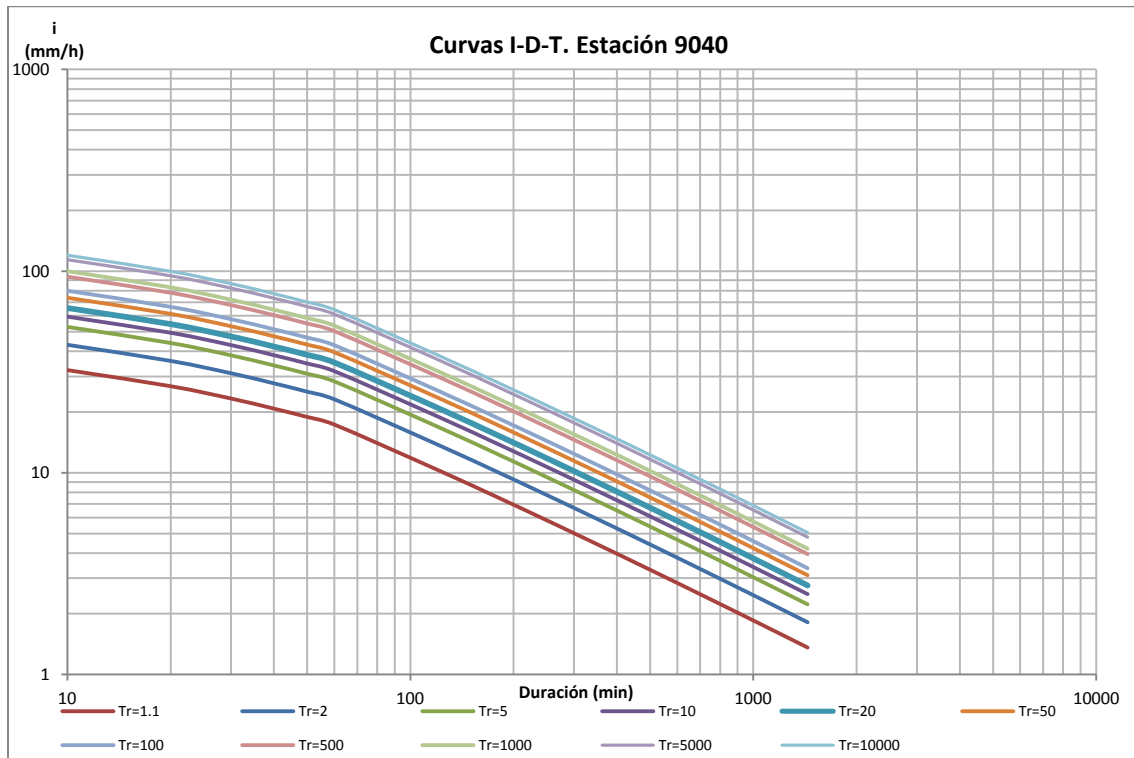
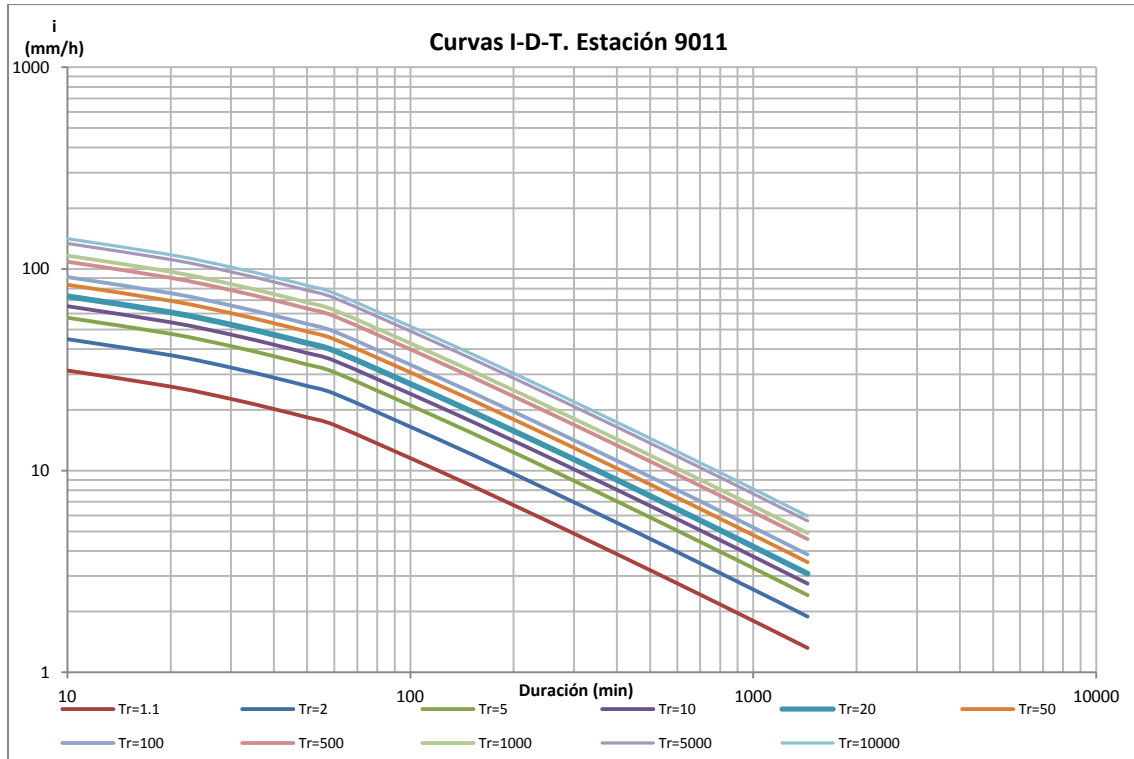
Este anexo incluye los resultados del cálculo de las curvas Intensidad – Duración- Periodo de Retorno para todas las estaciones en estudio.

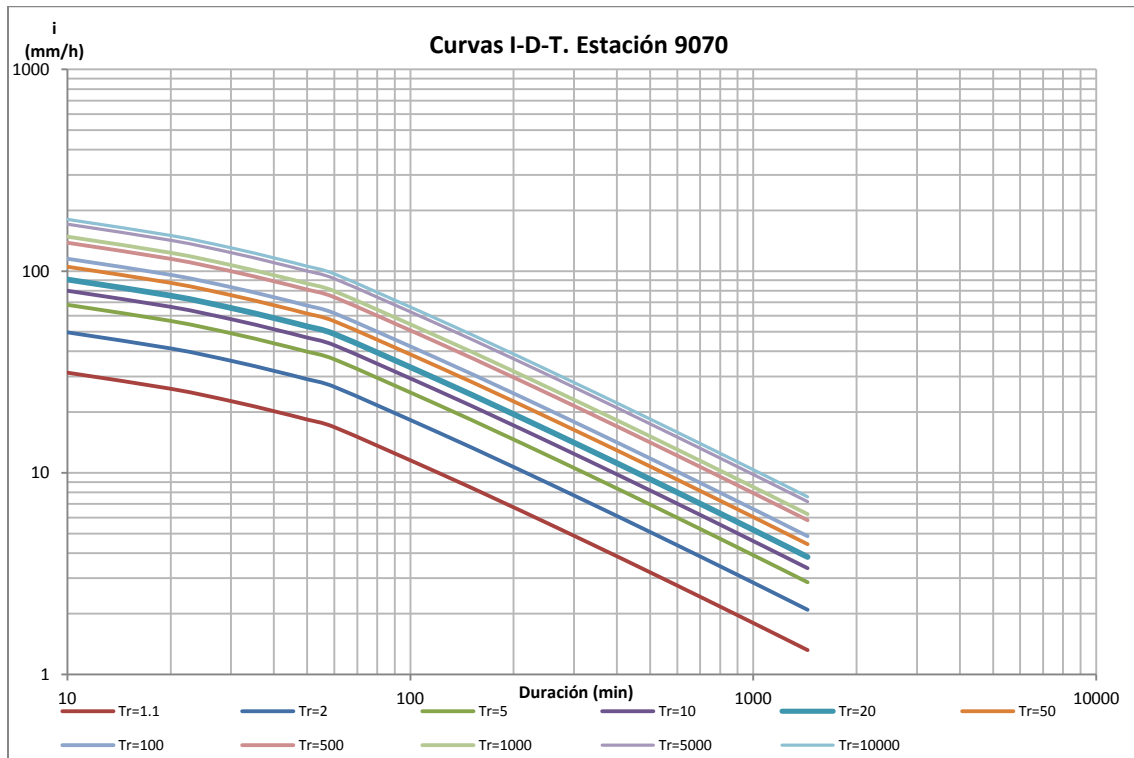
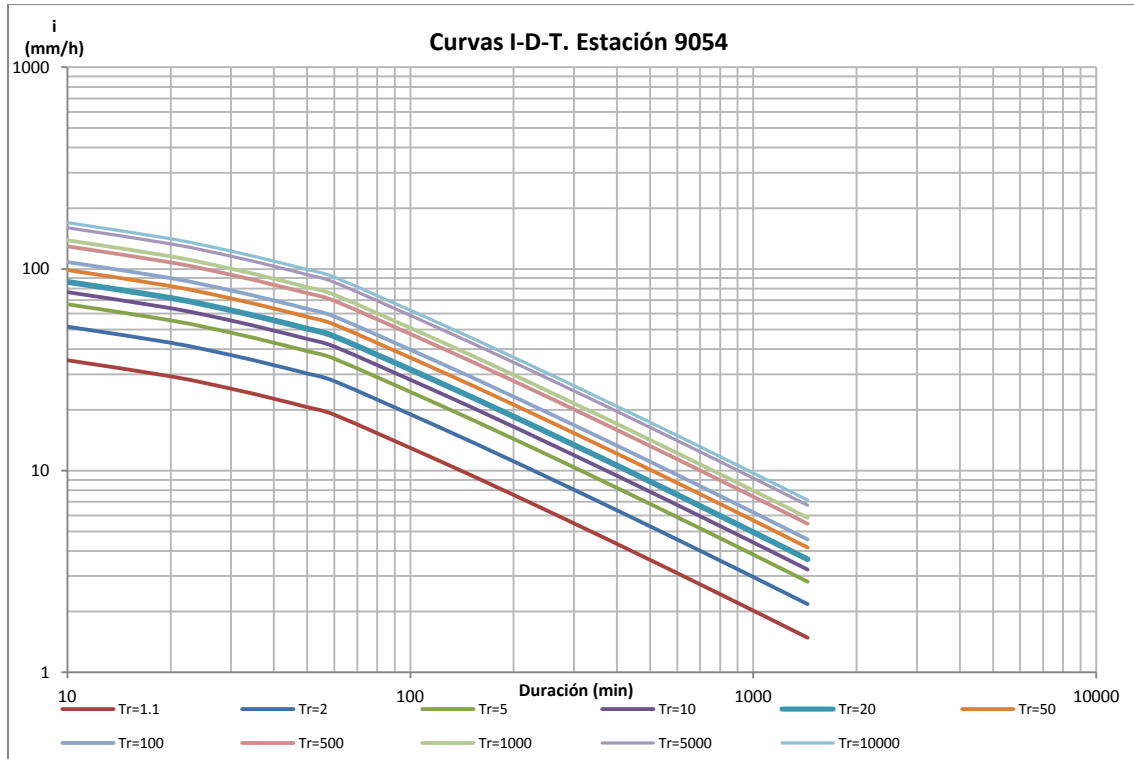


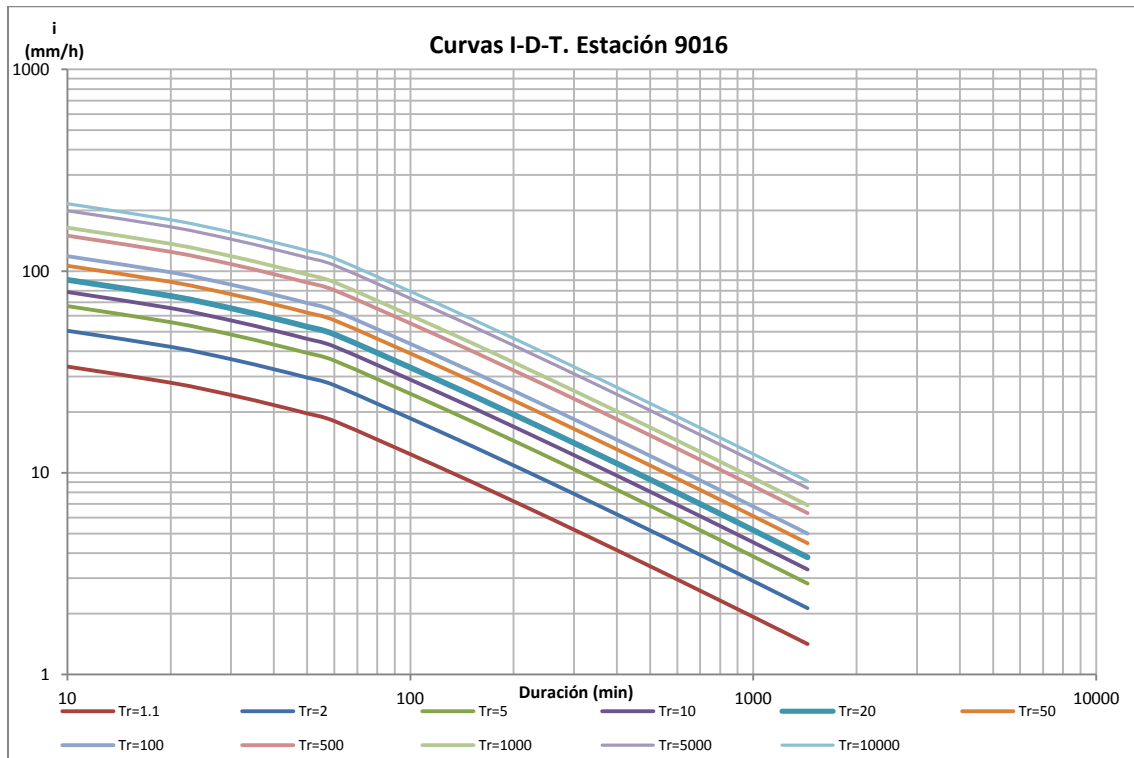
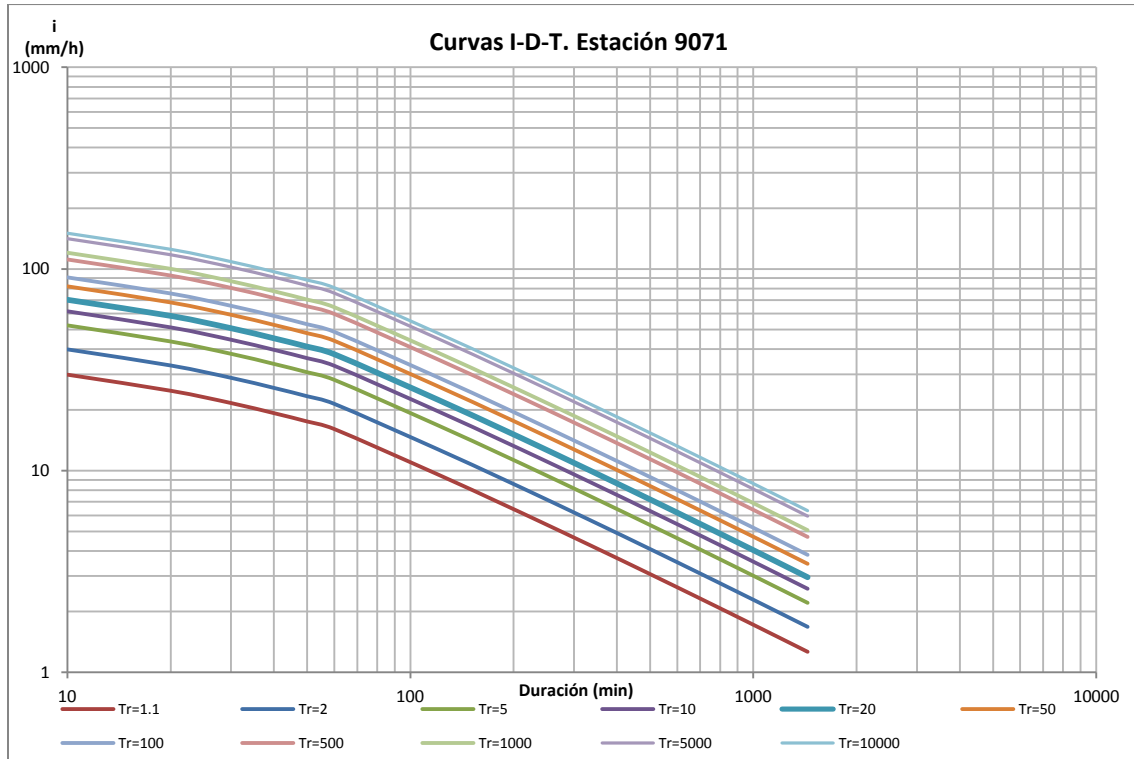


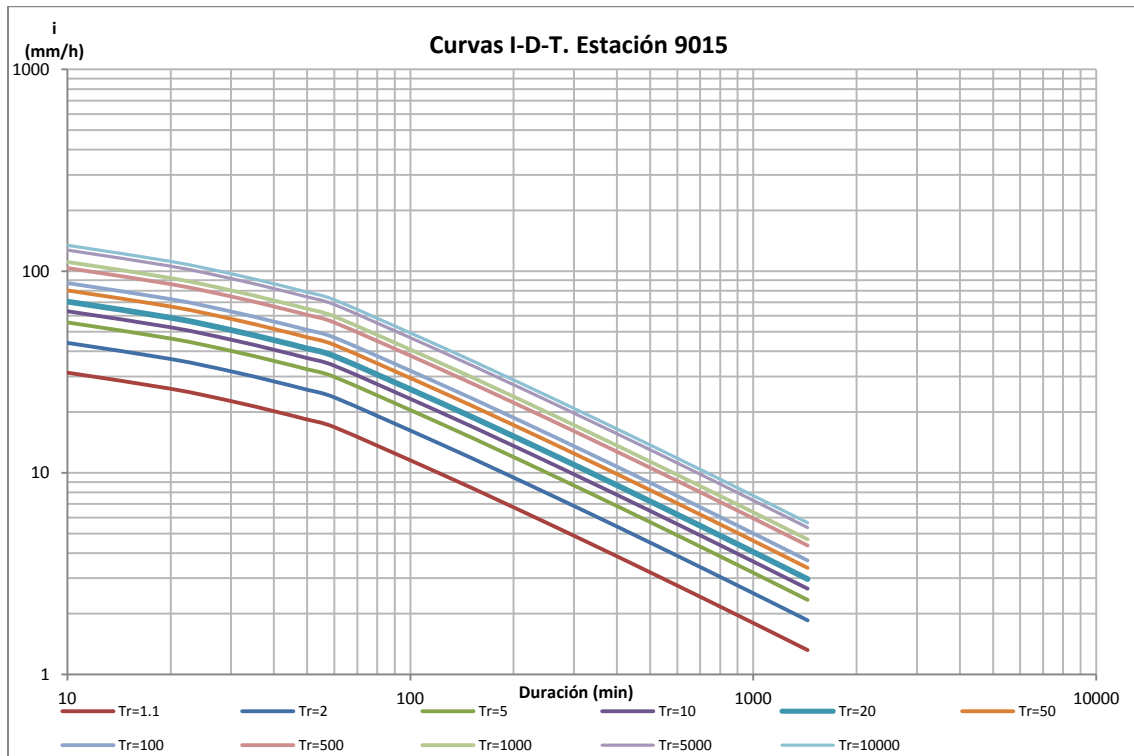
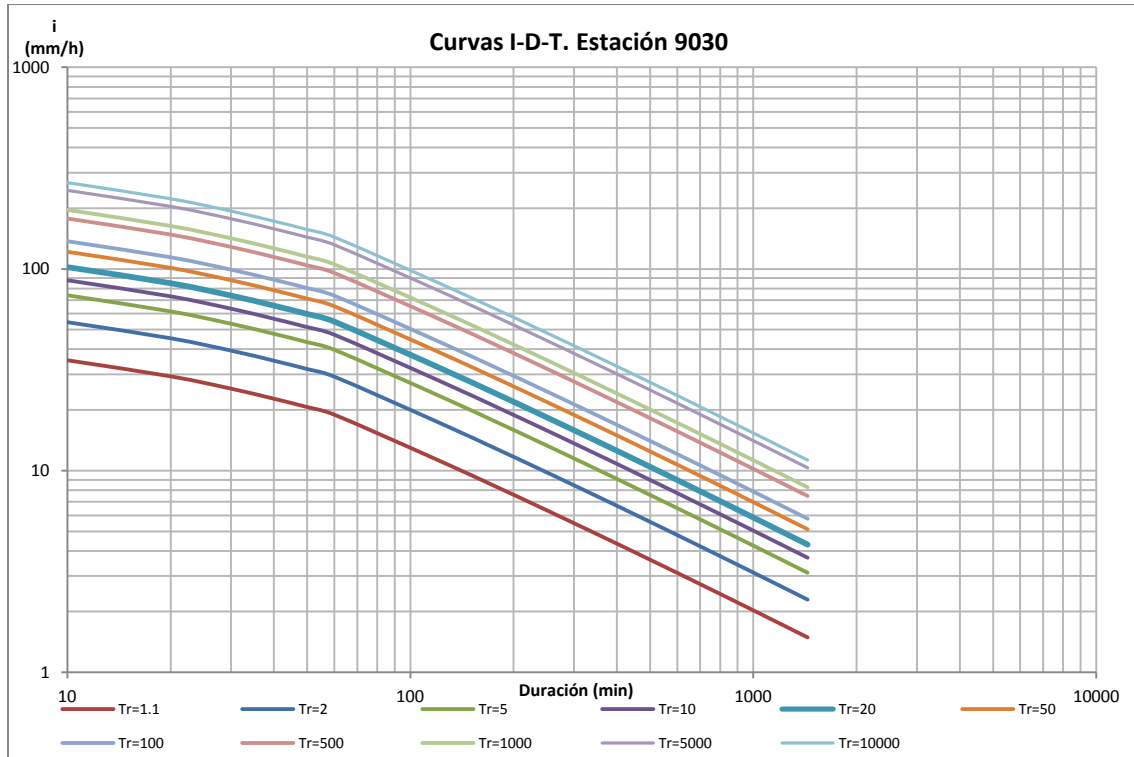


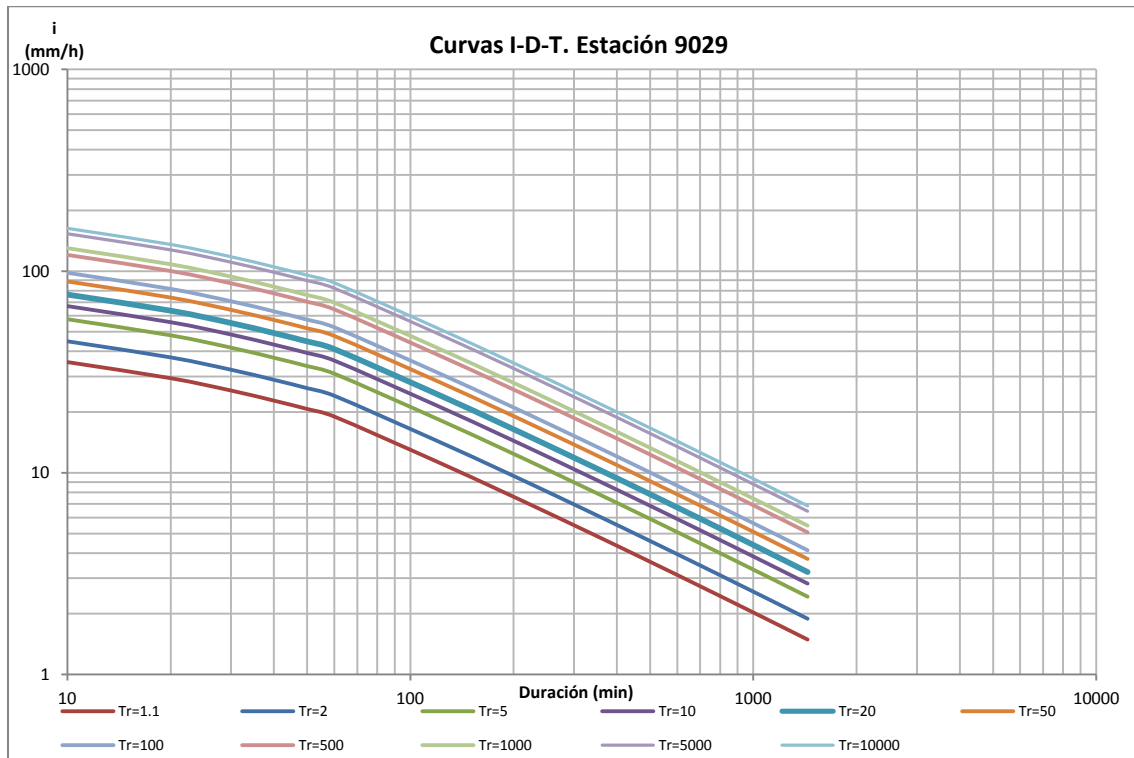
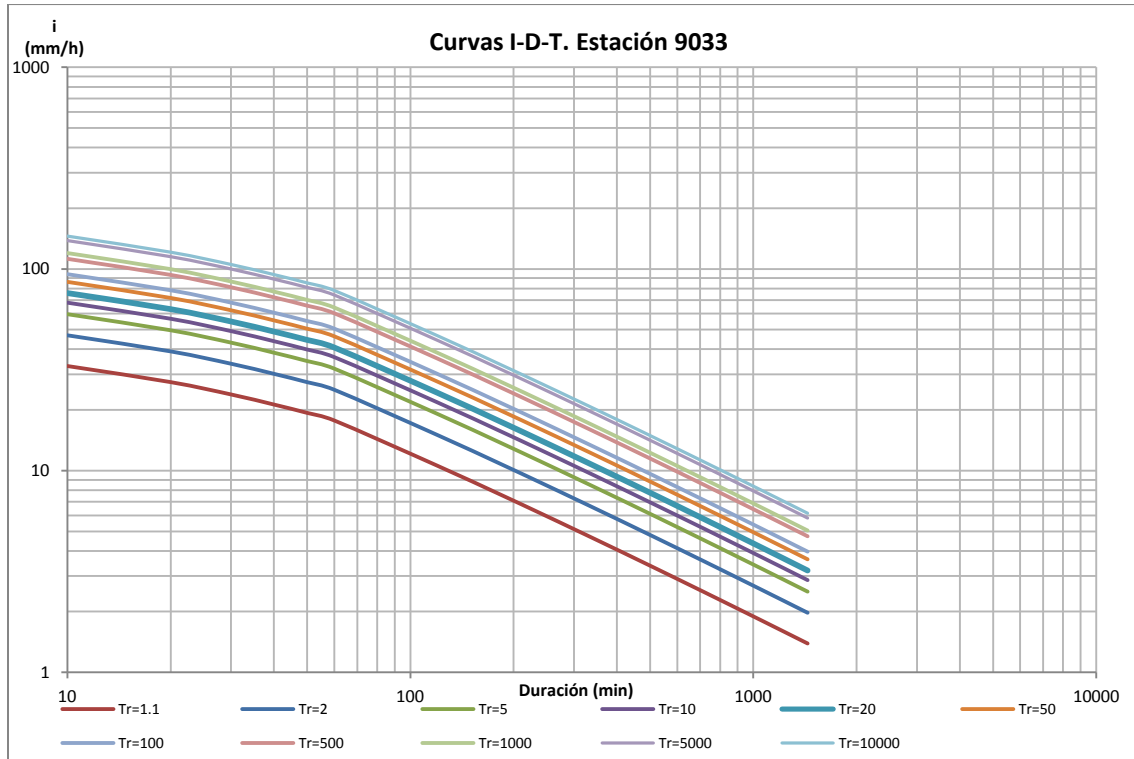


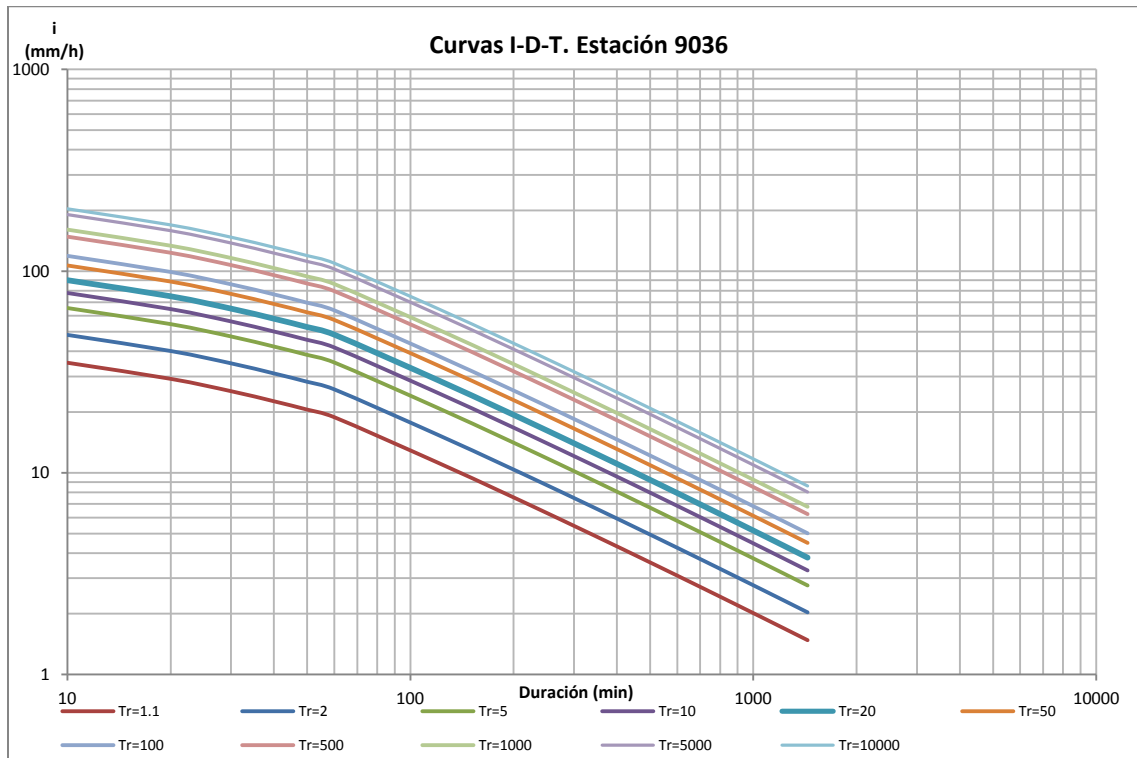
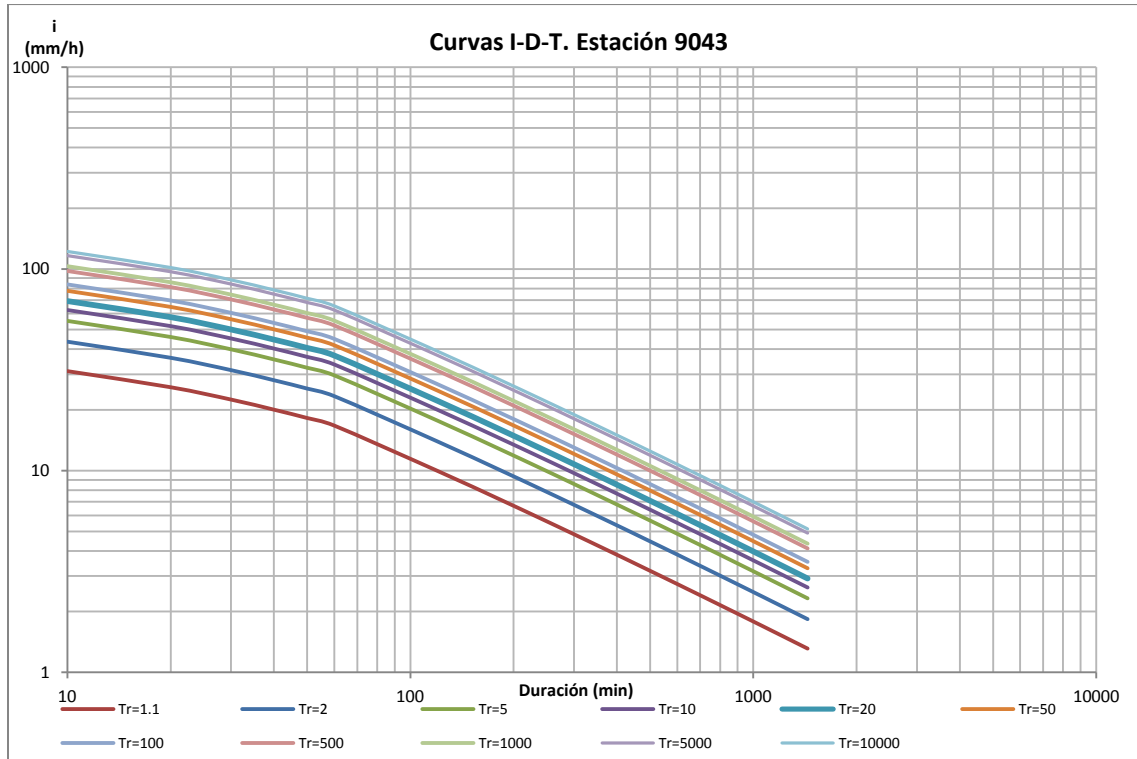




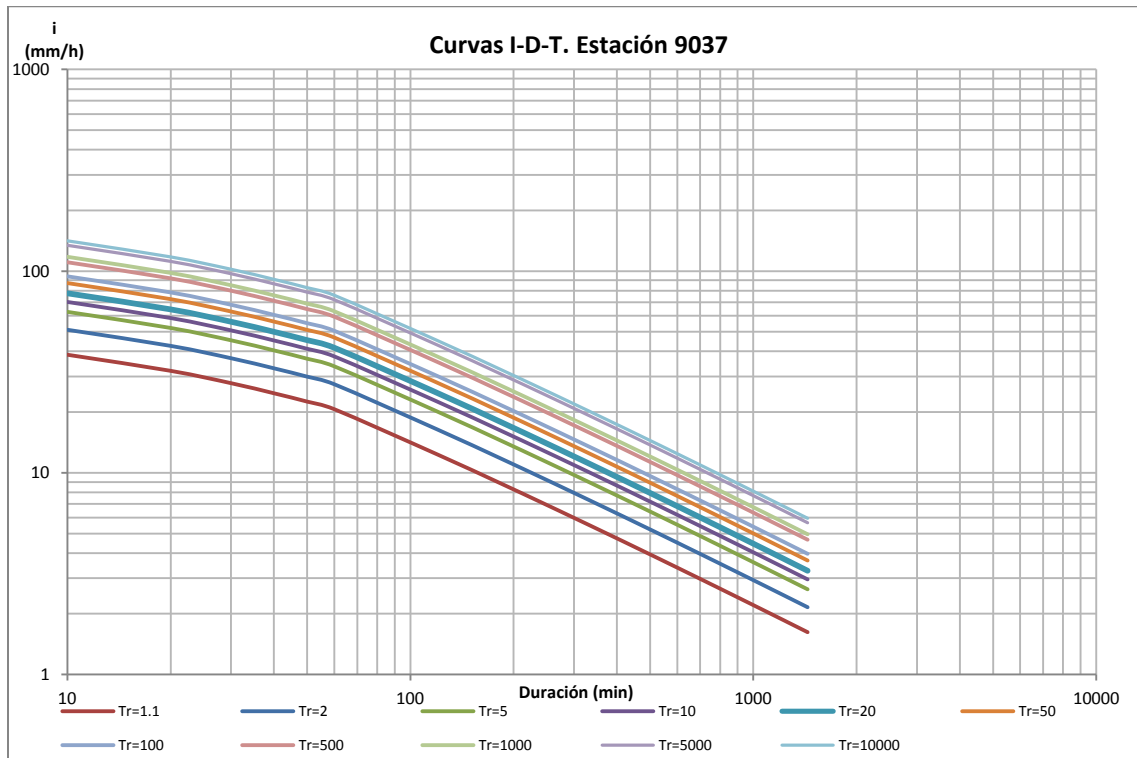
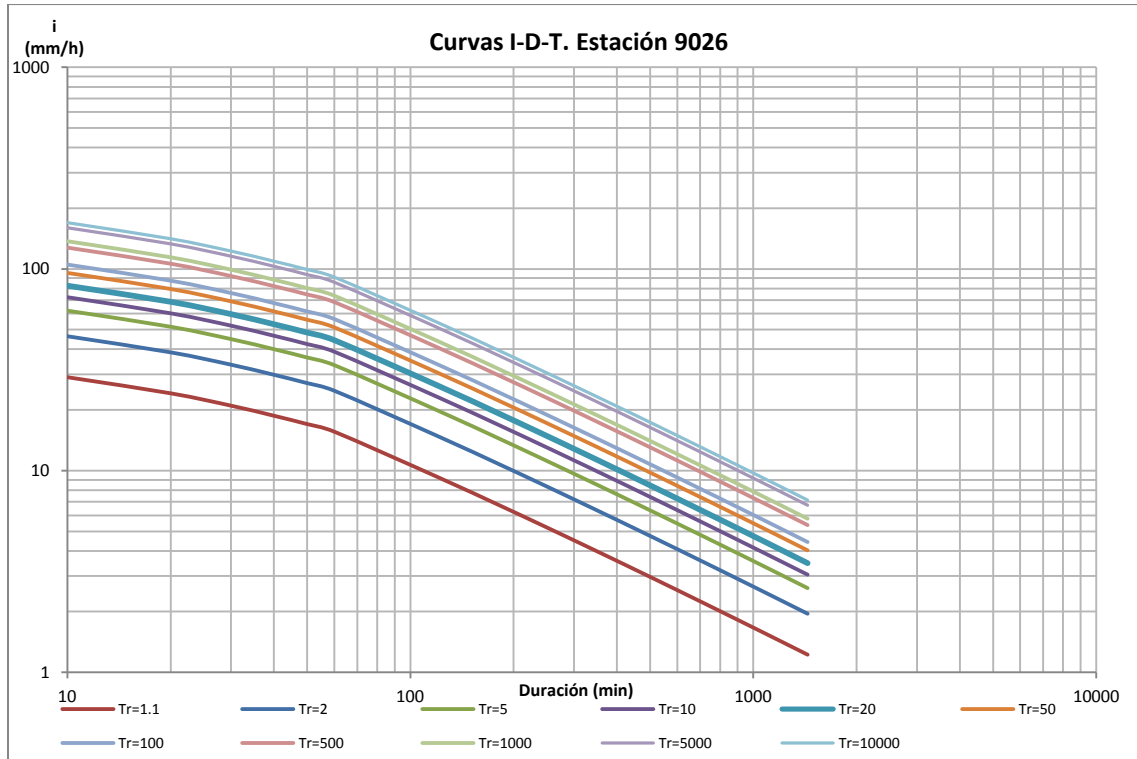


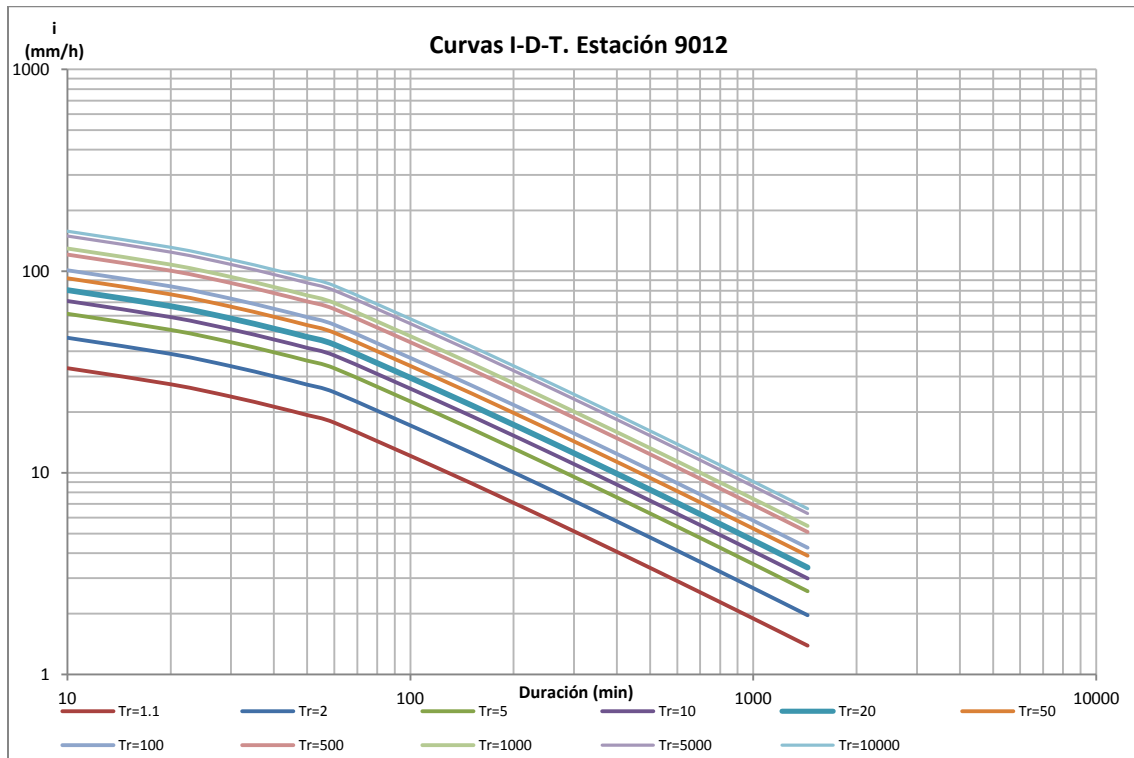
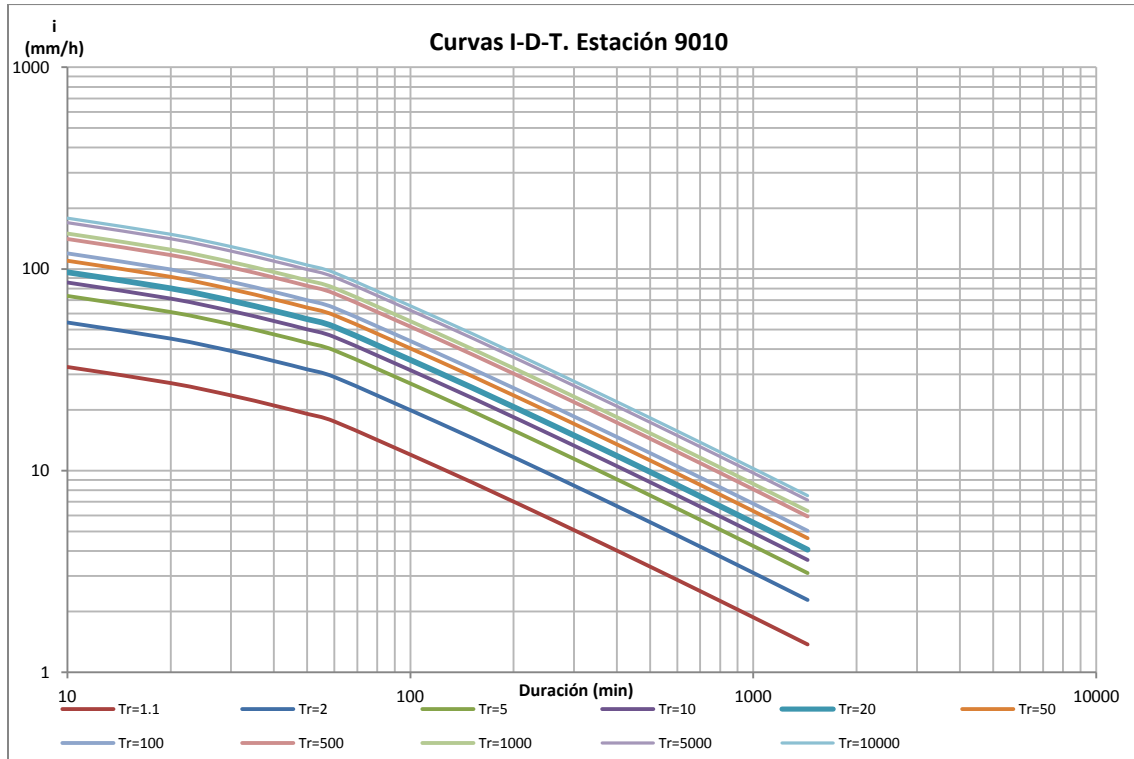


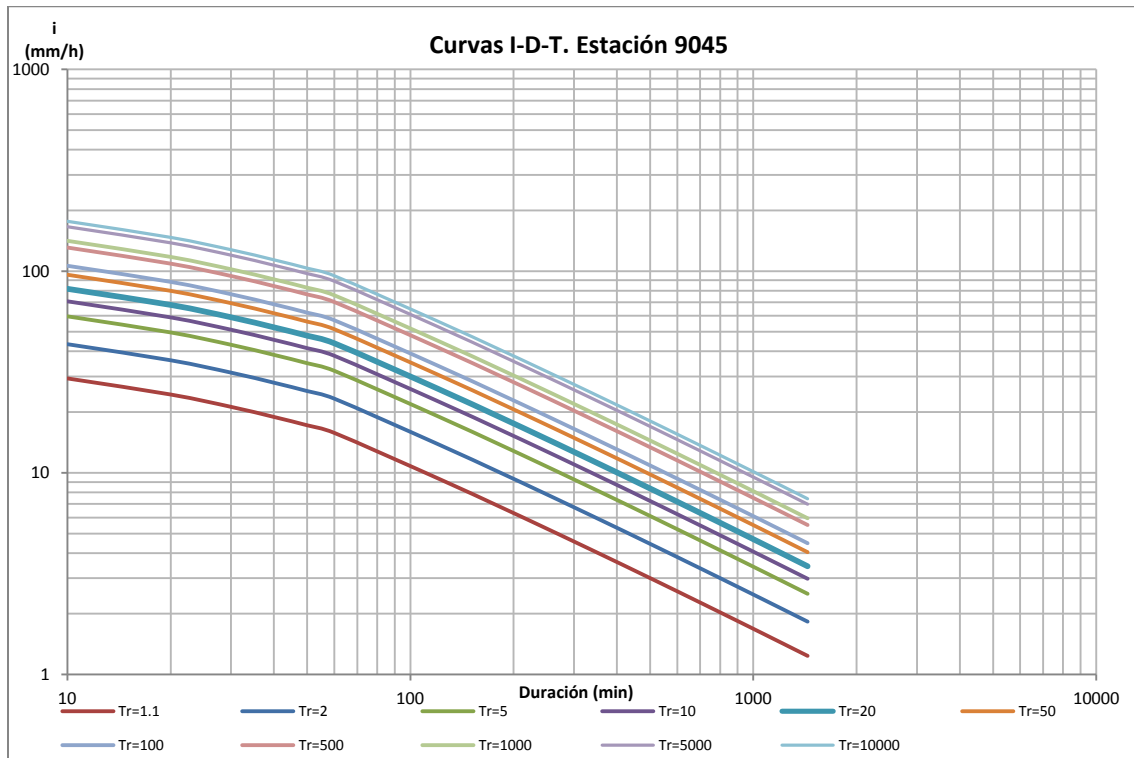
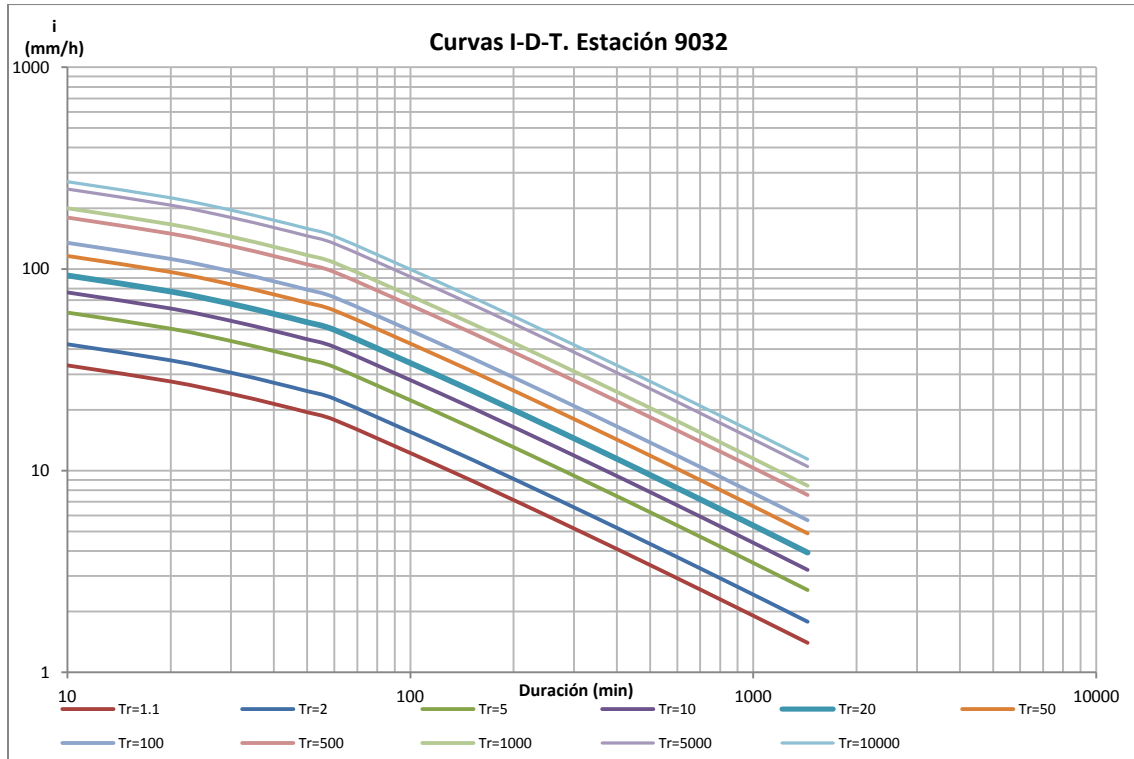


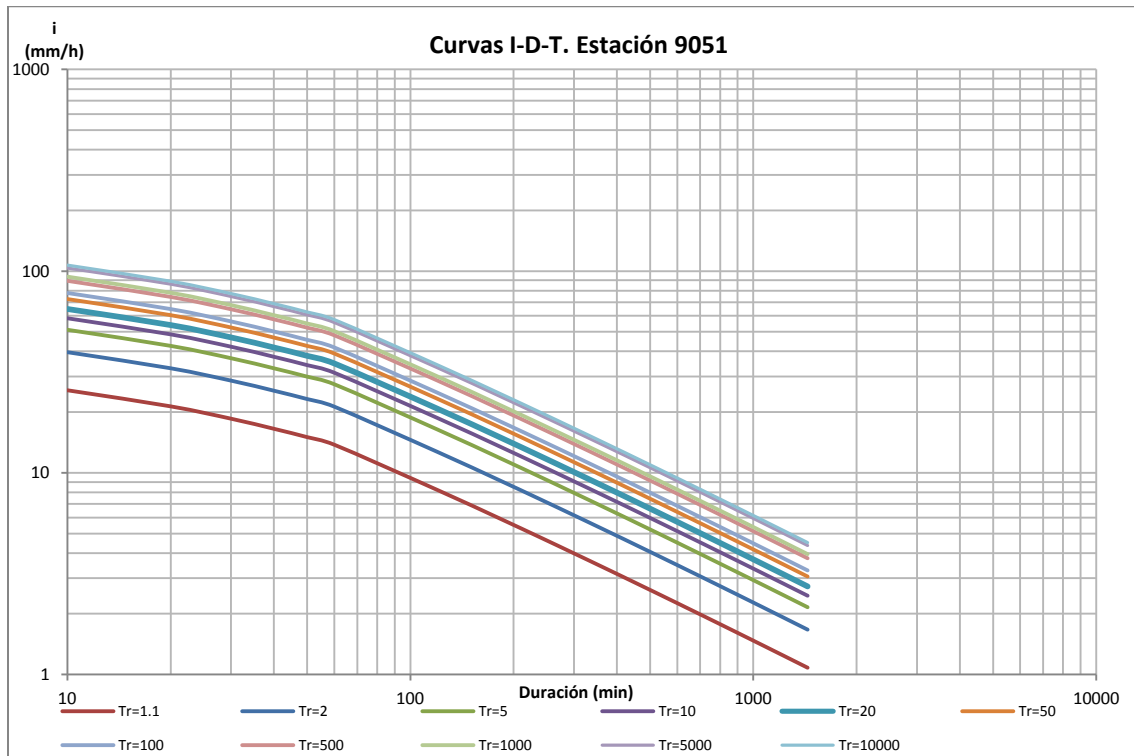
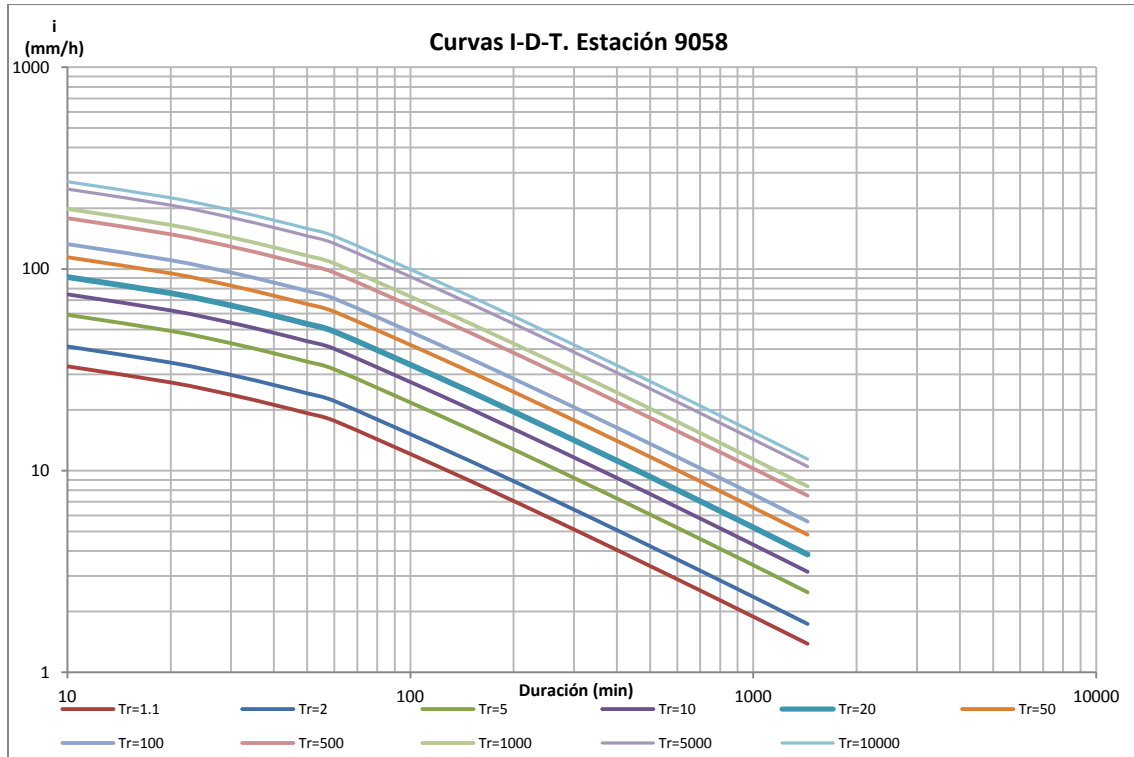


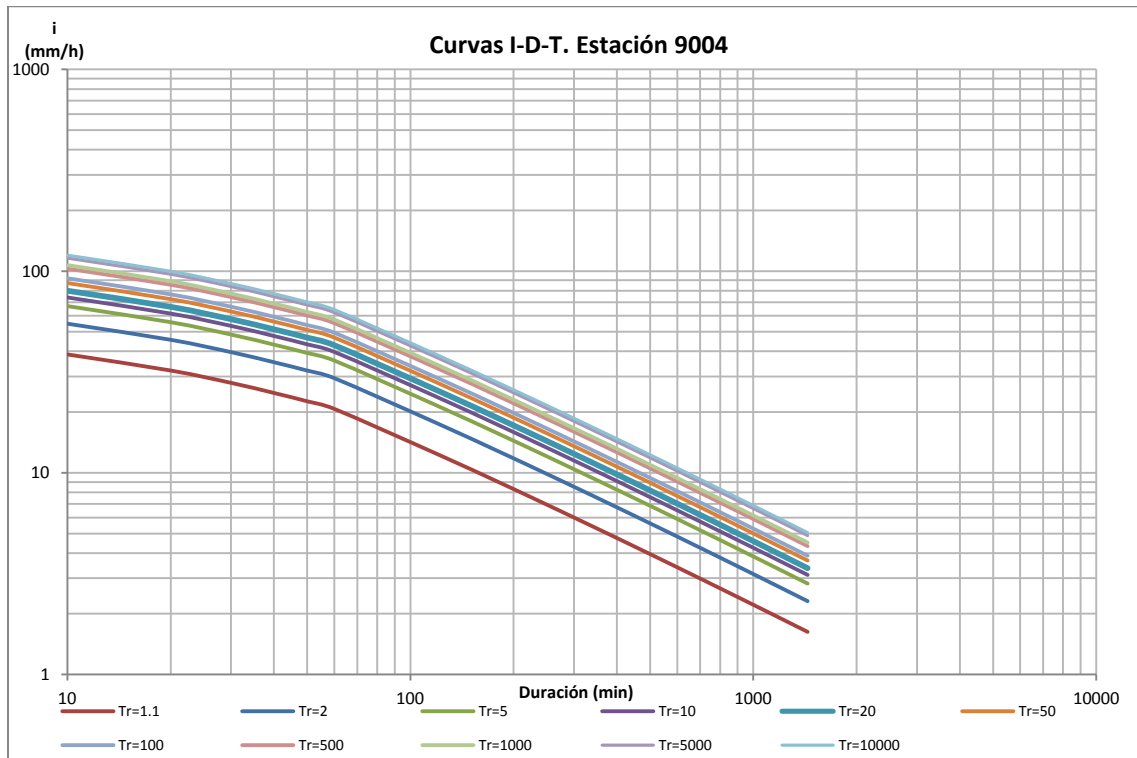
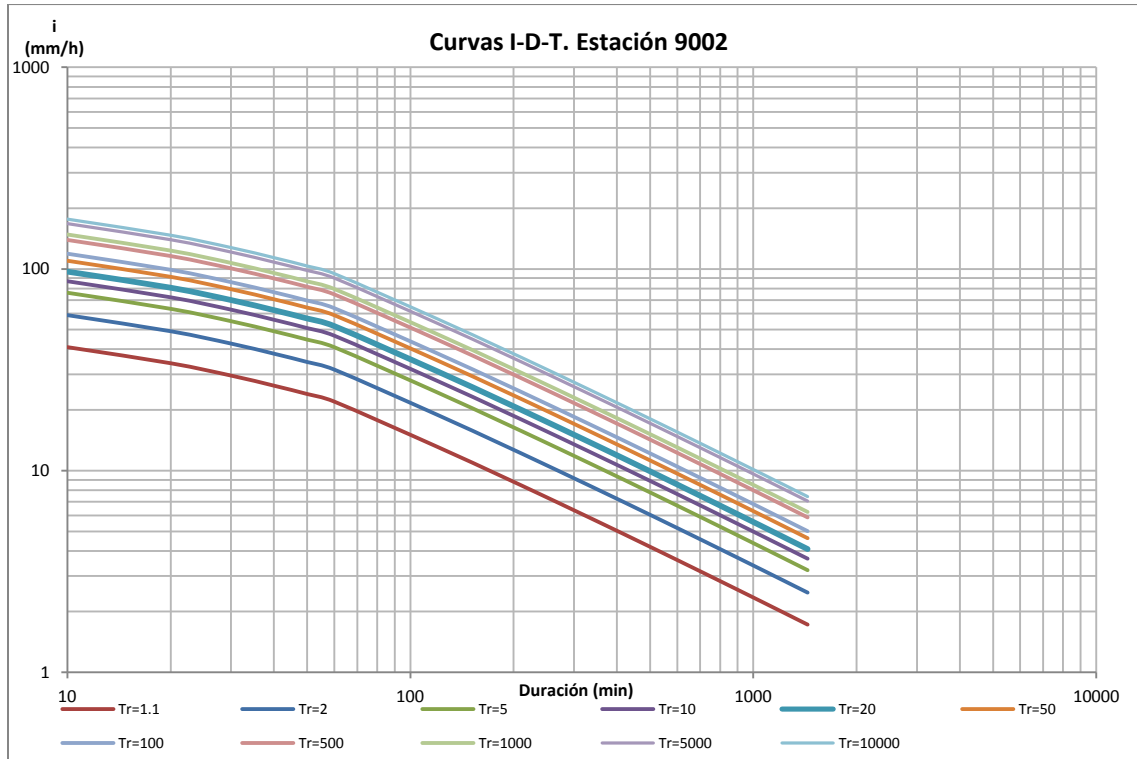


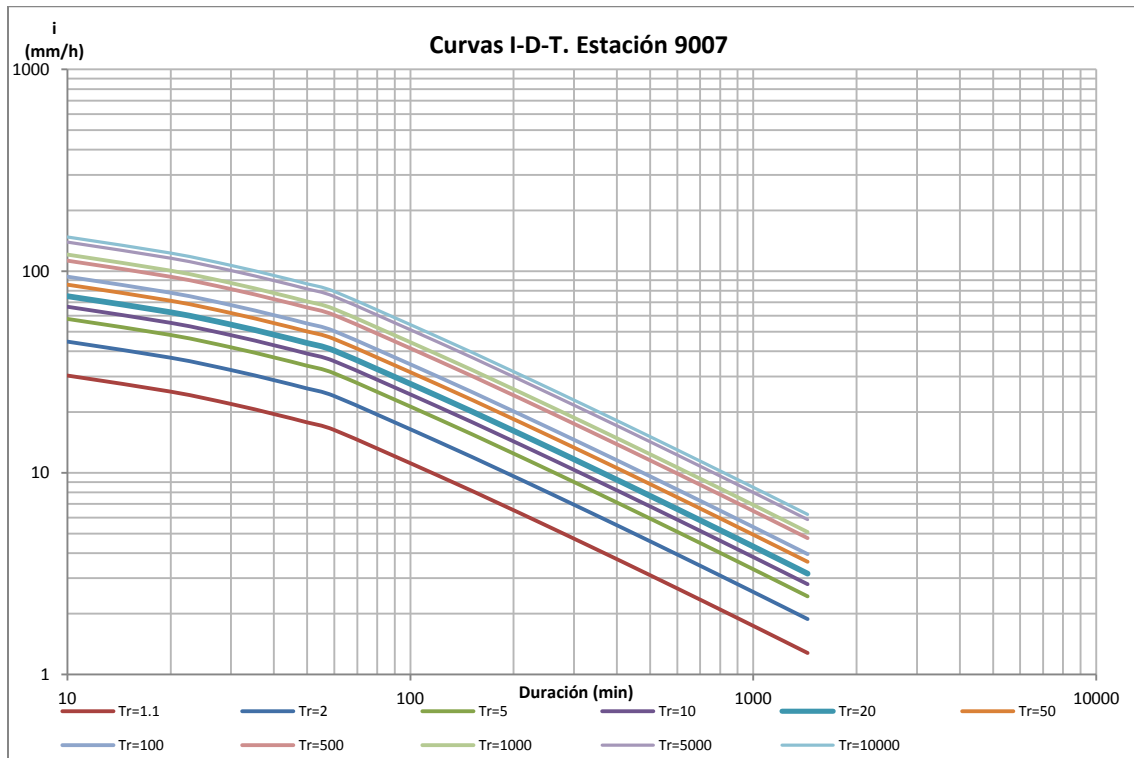
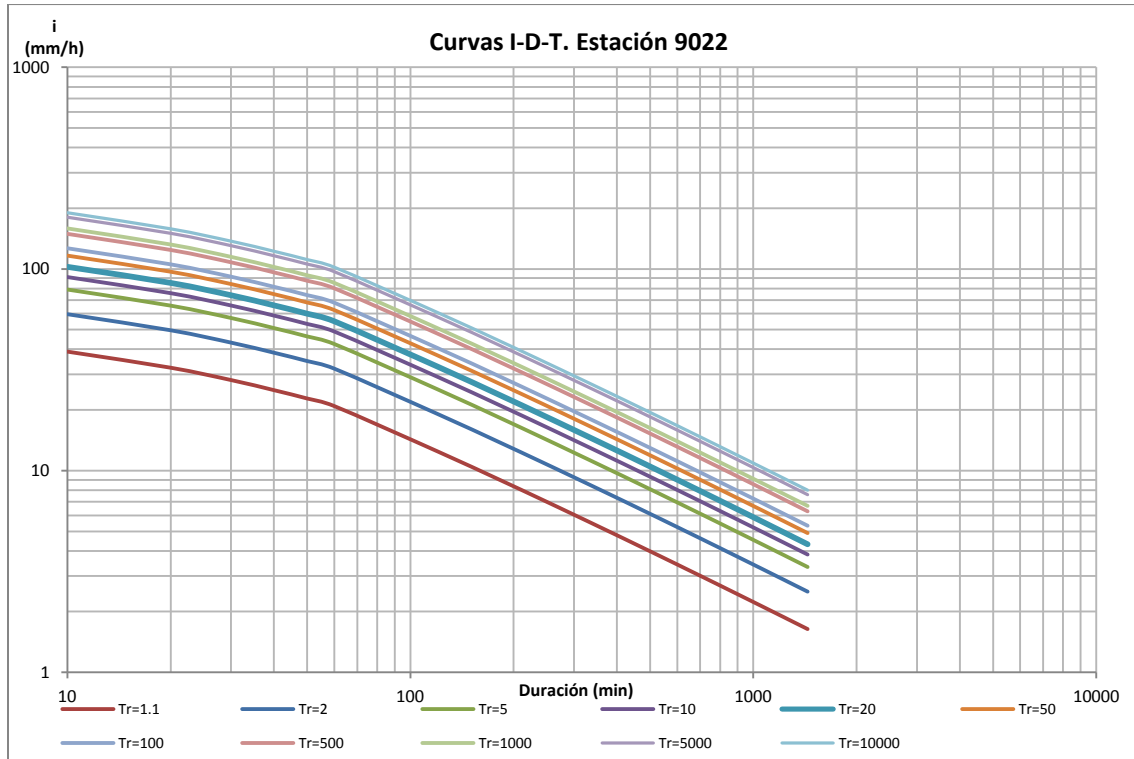


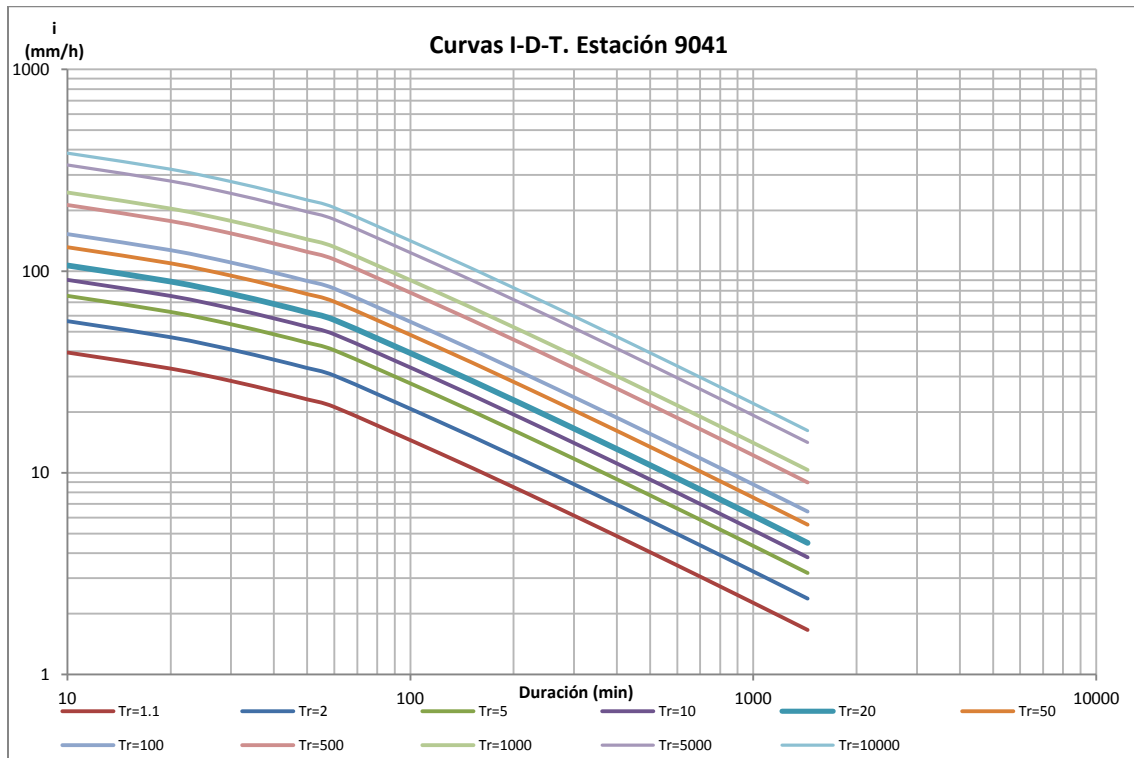
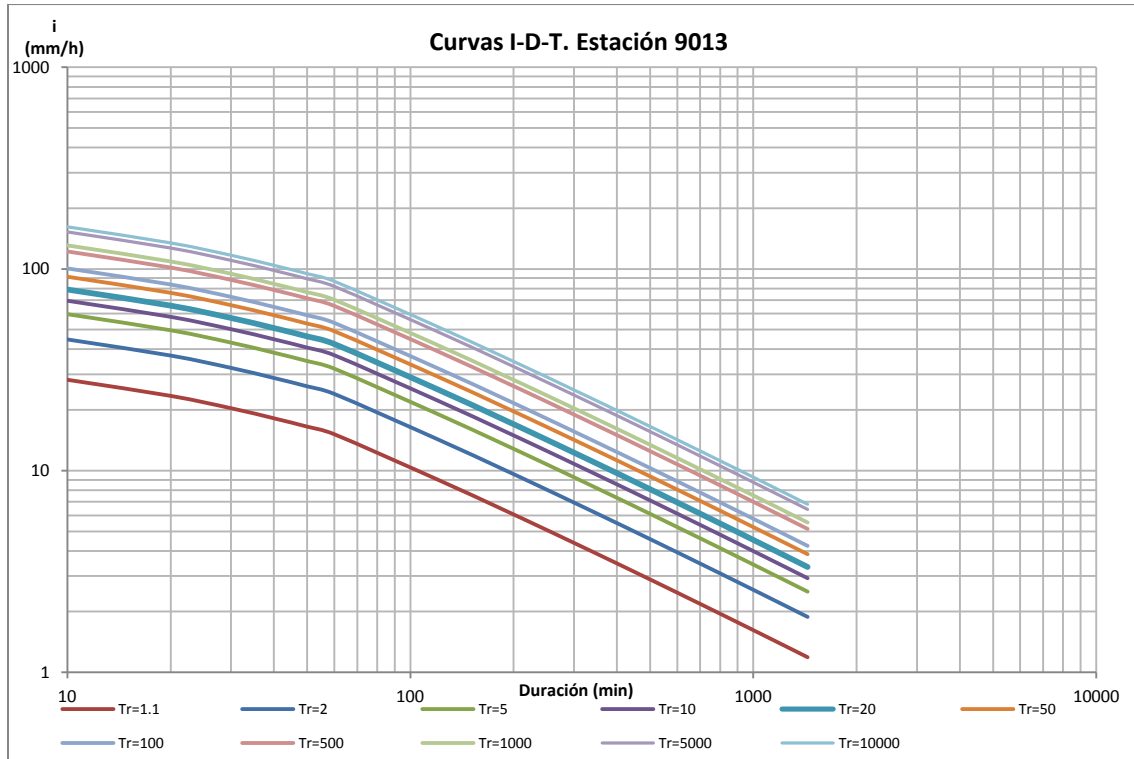


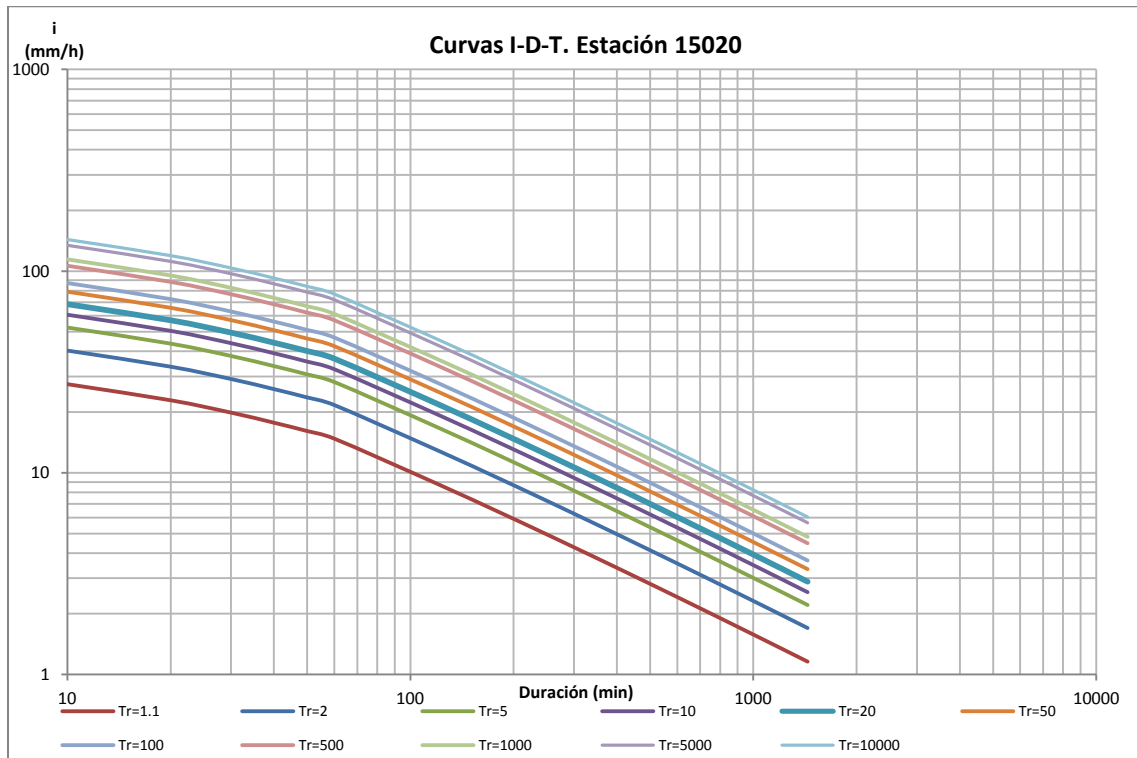
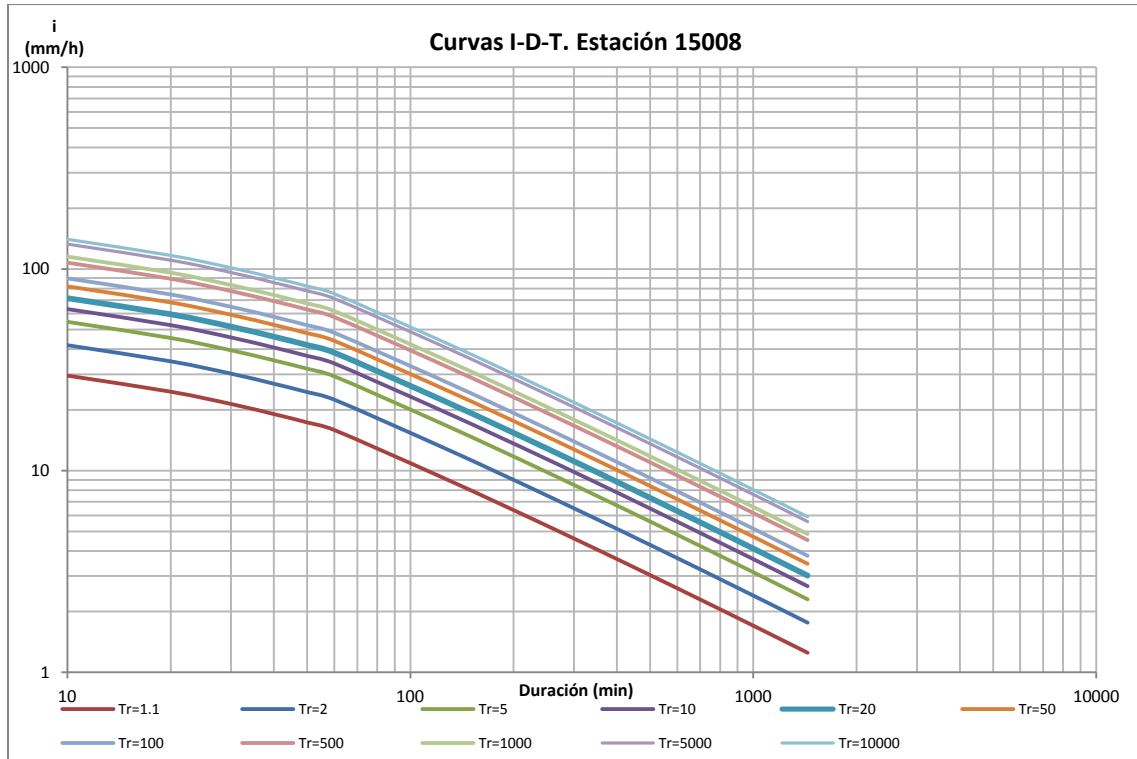




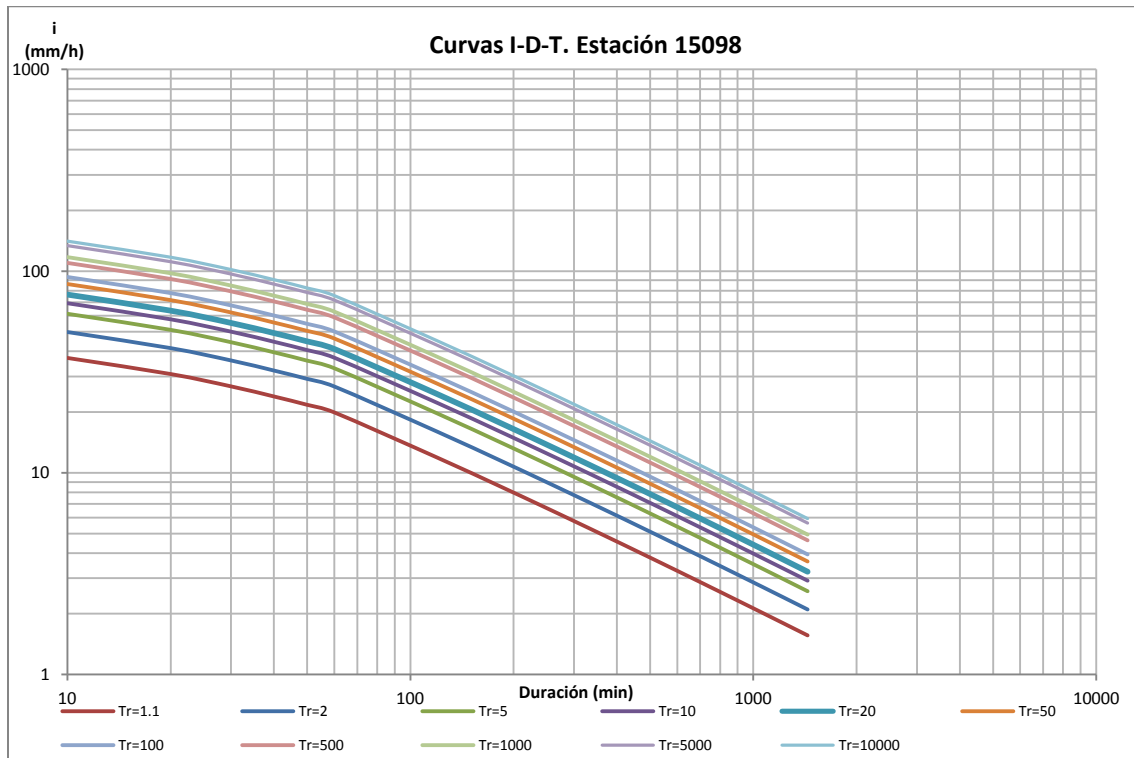
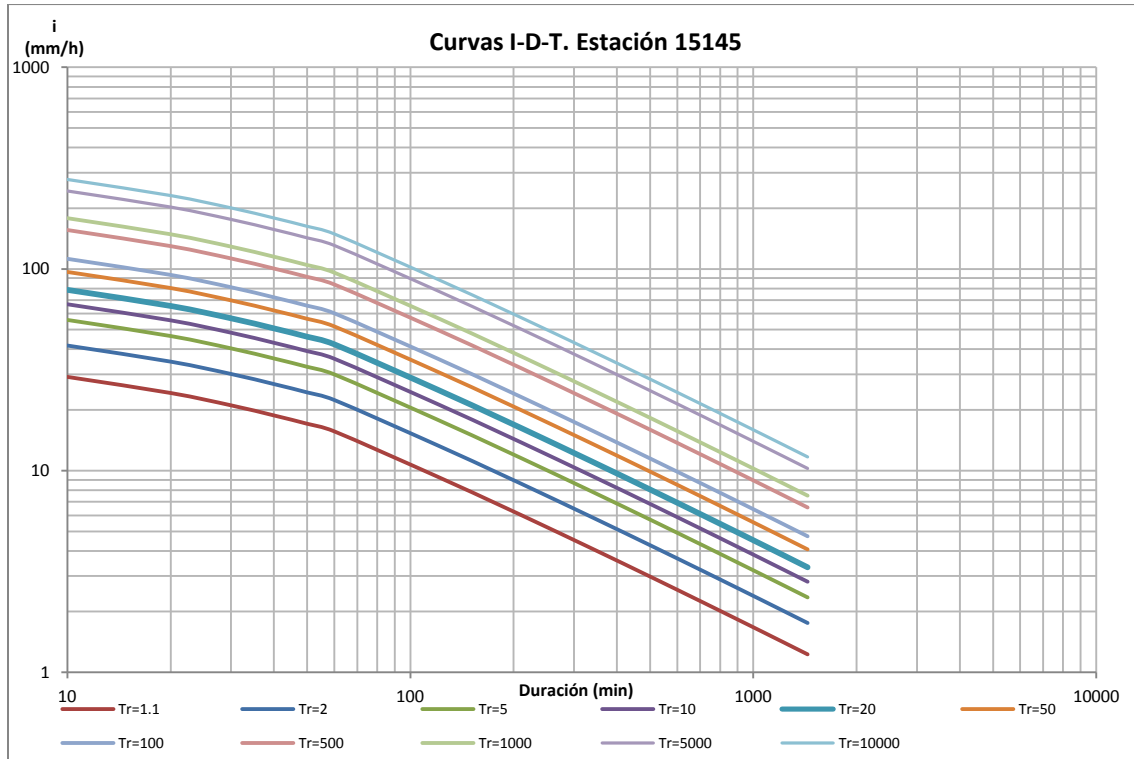


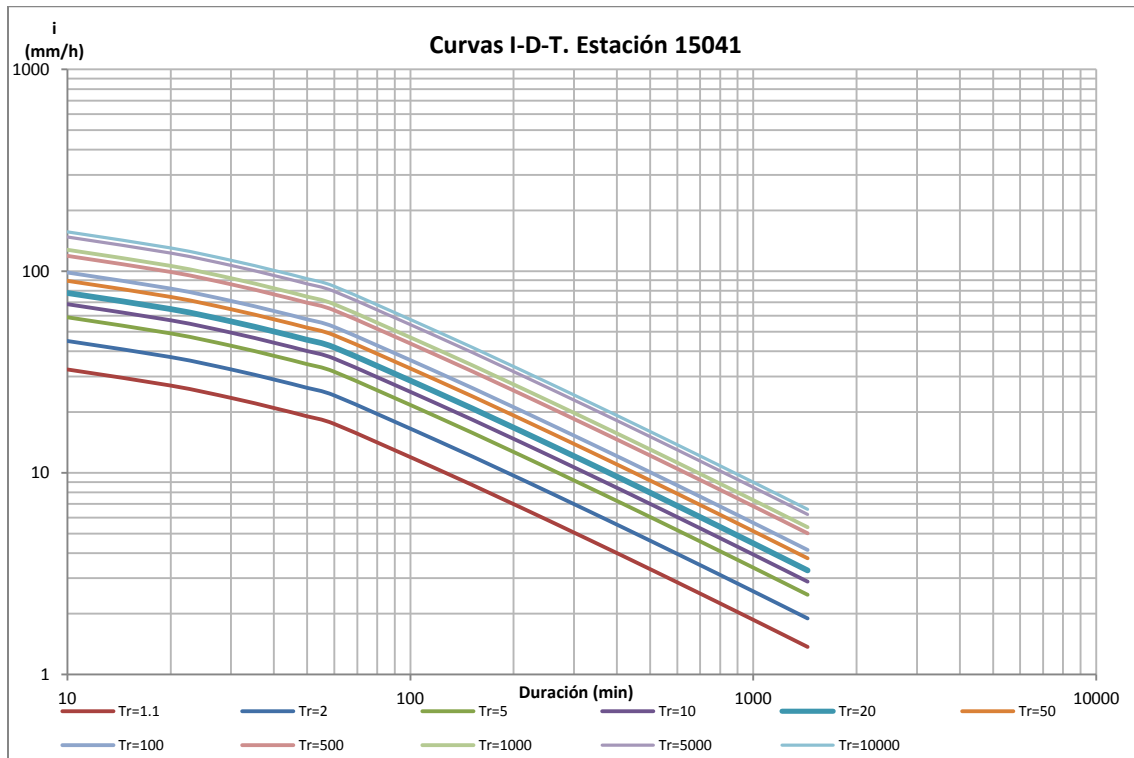
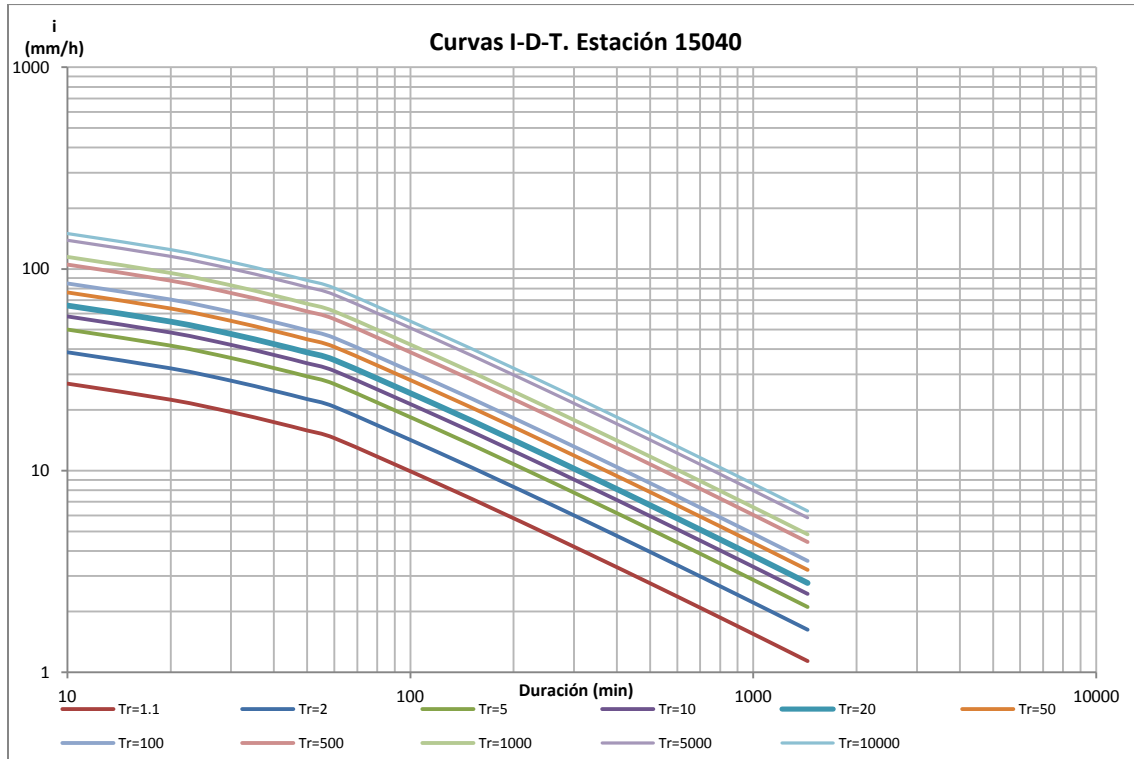


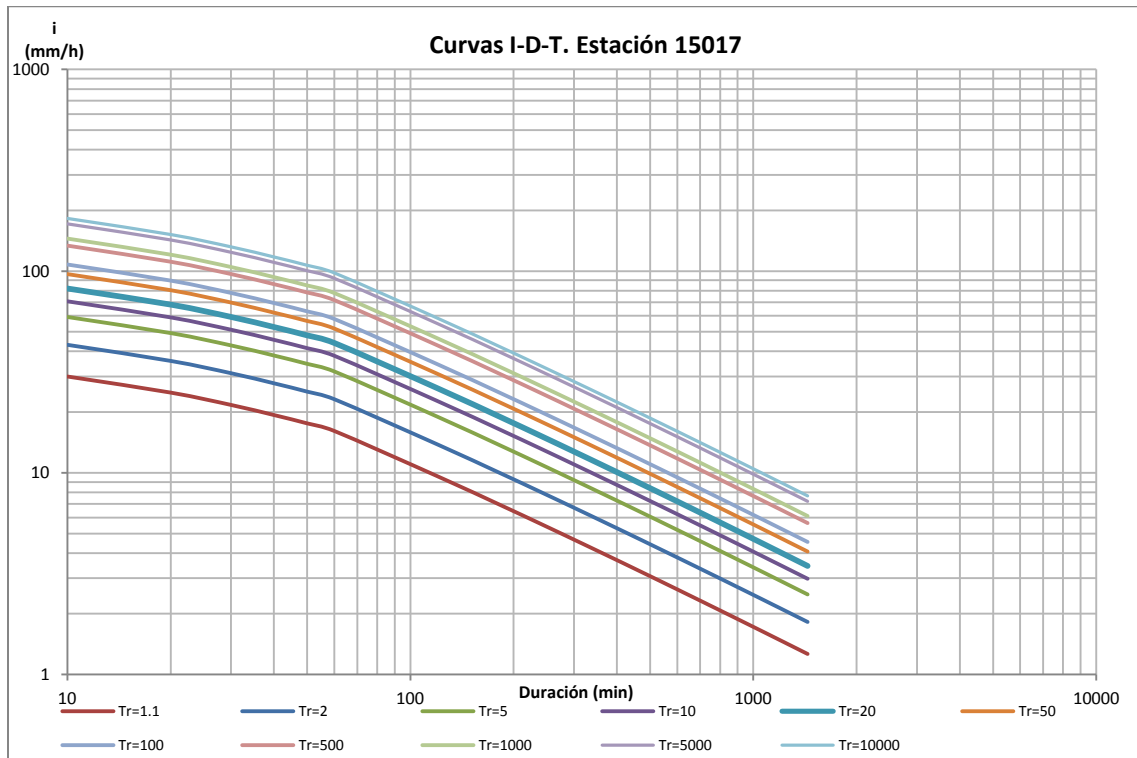
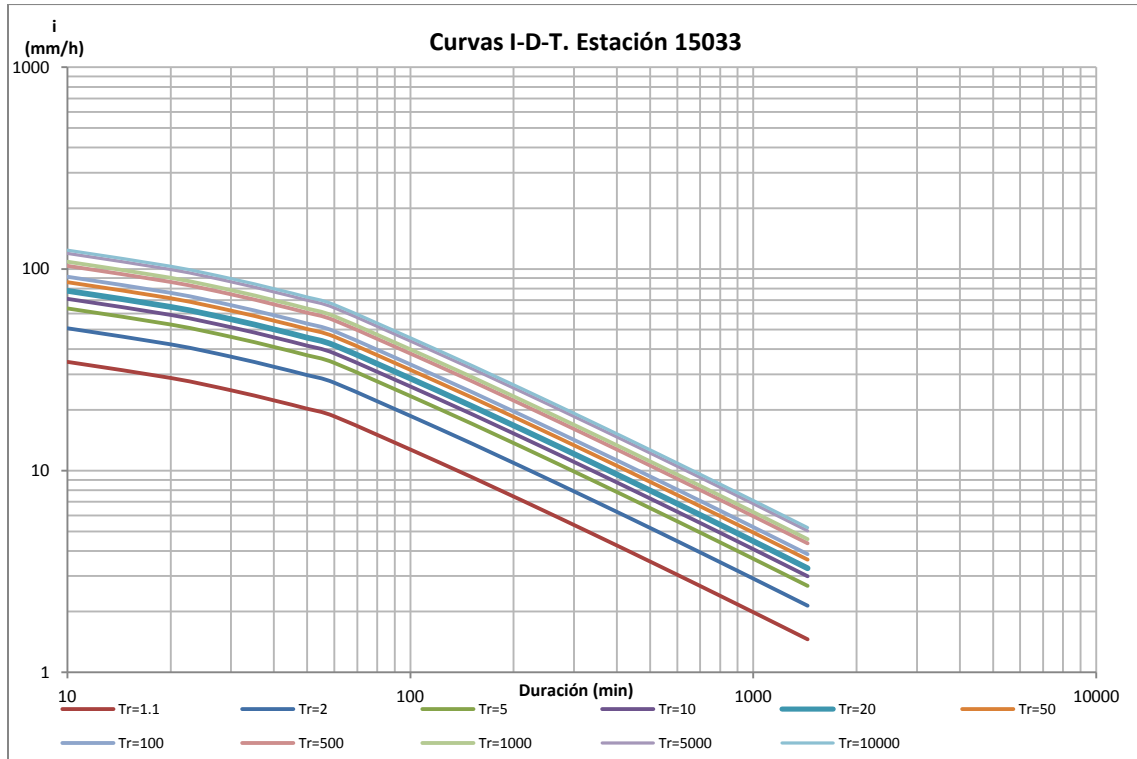


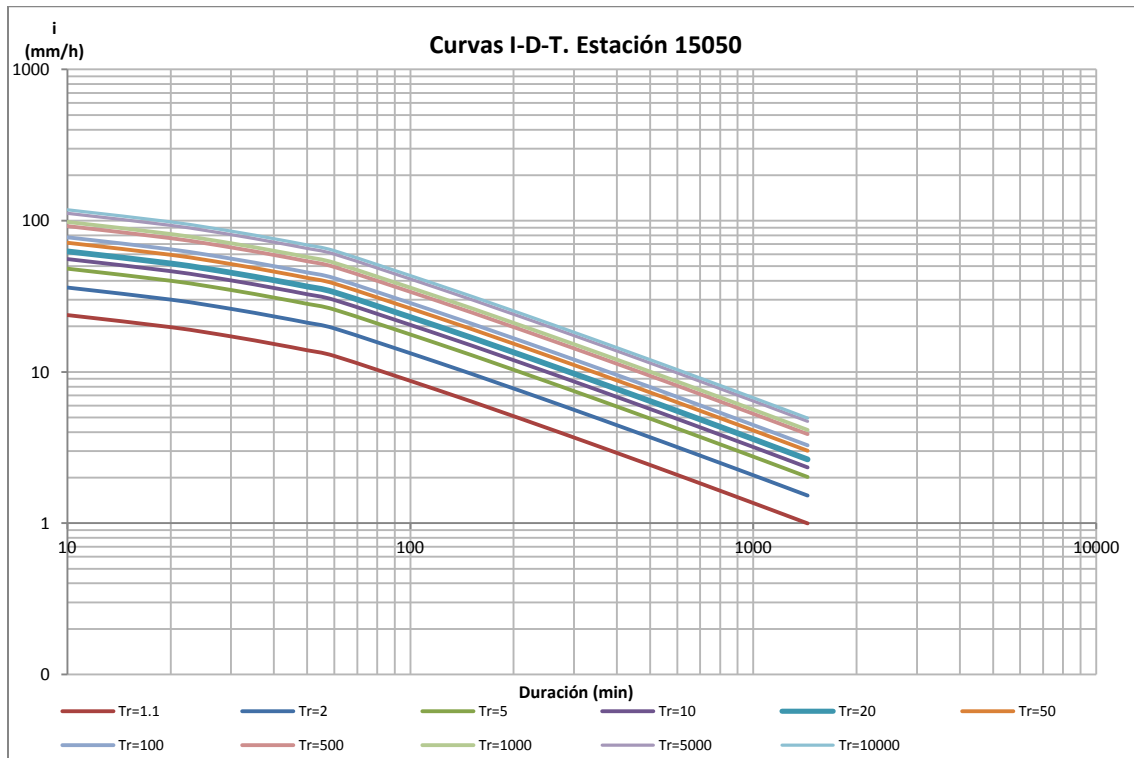
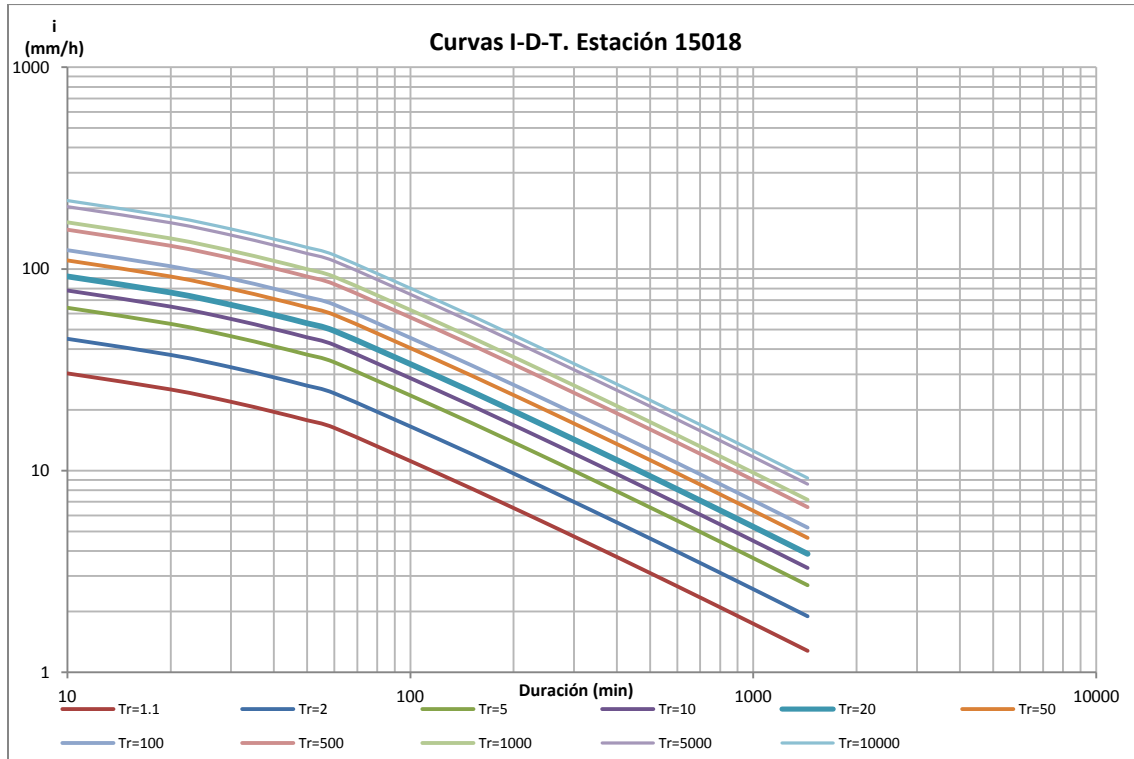


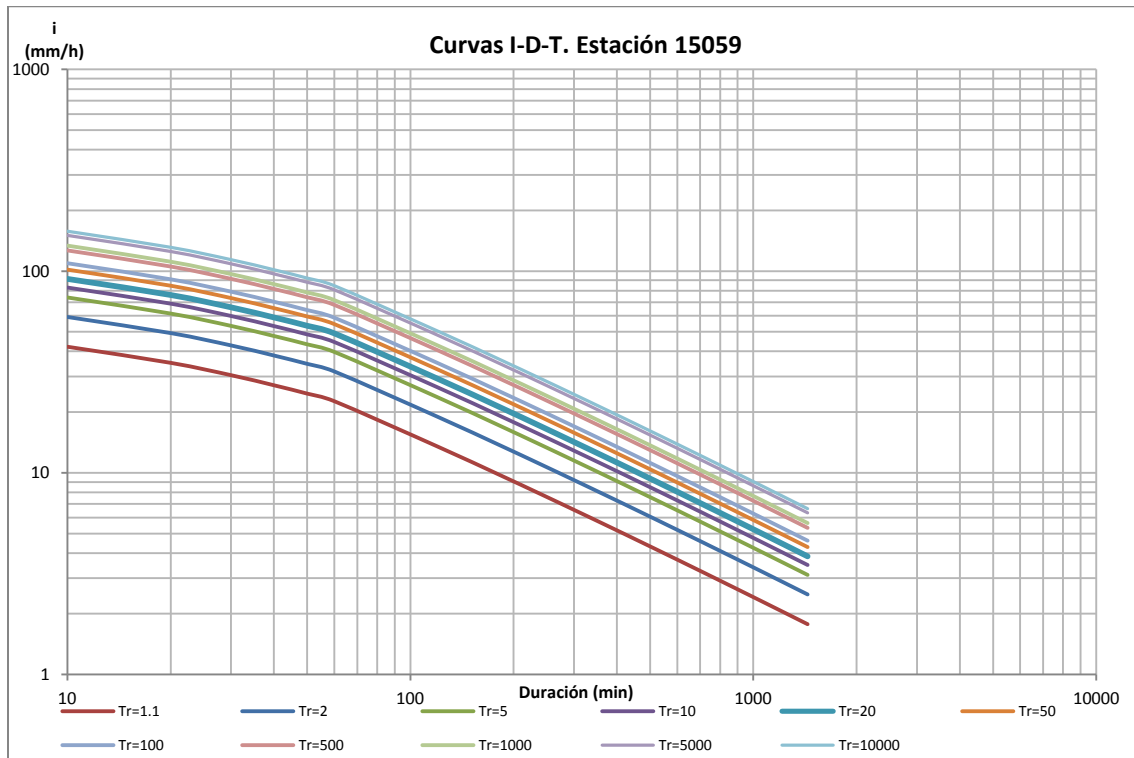
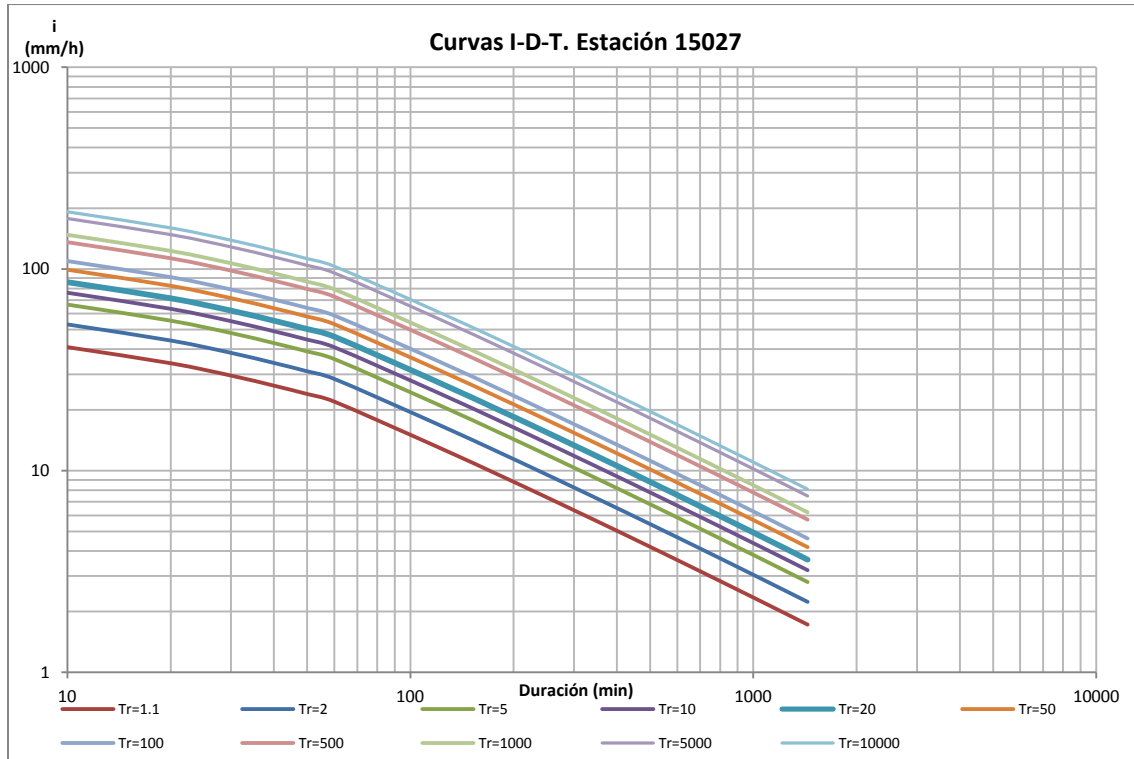


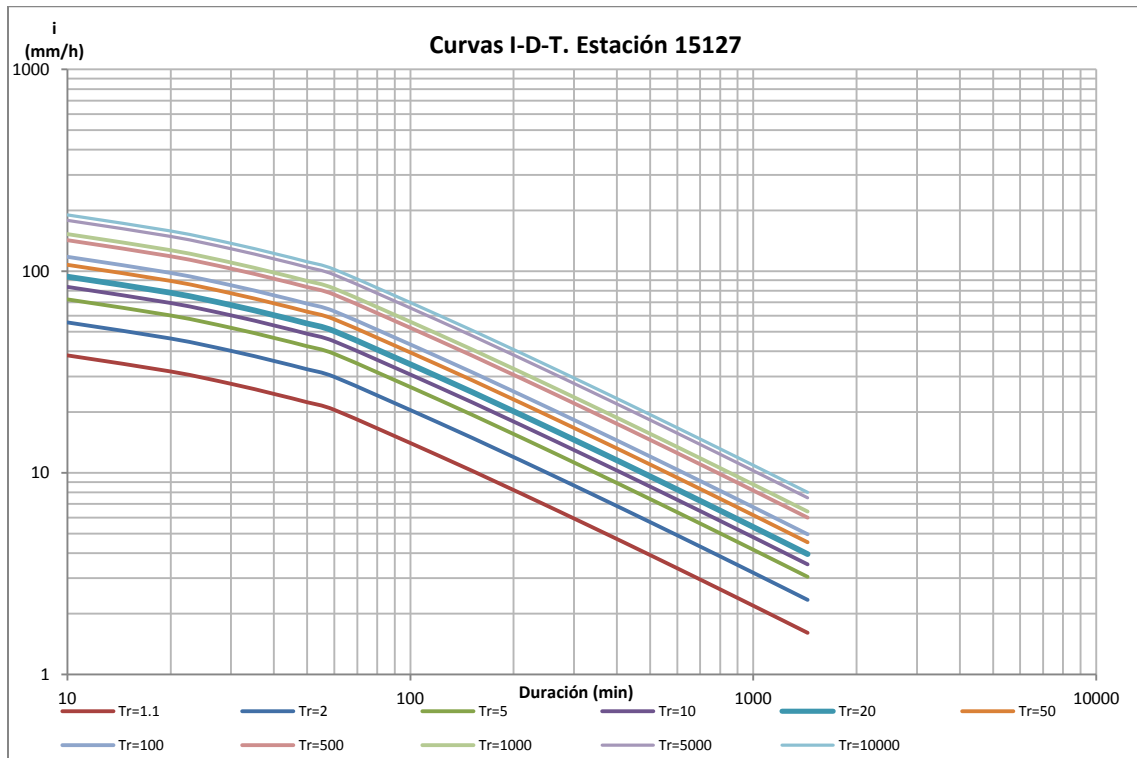
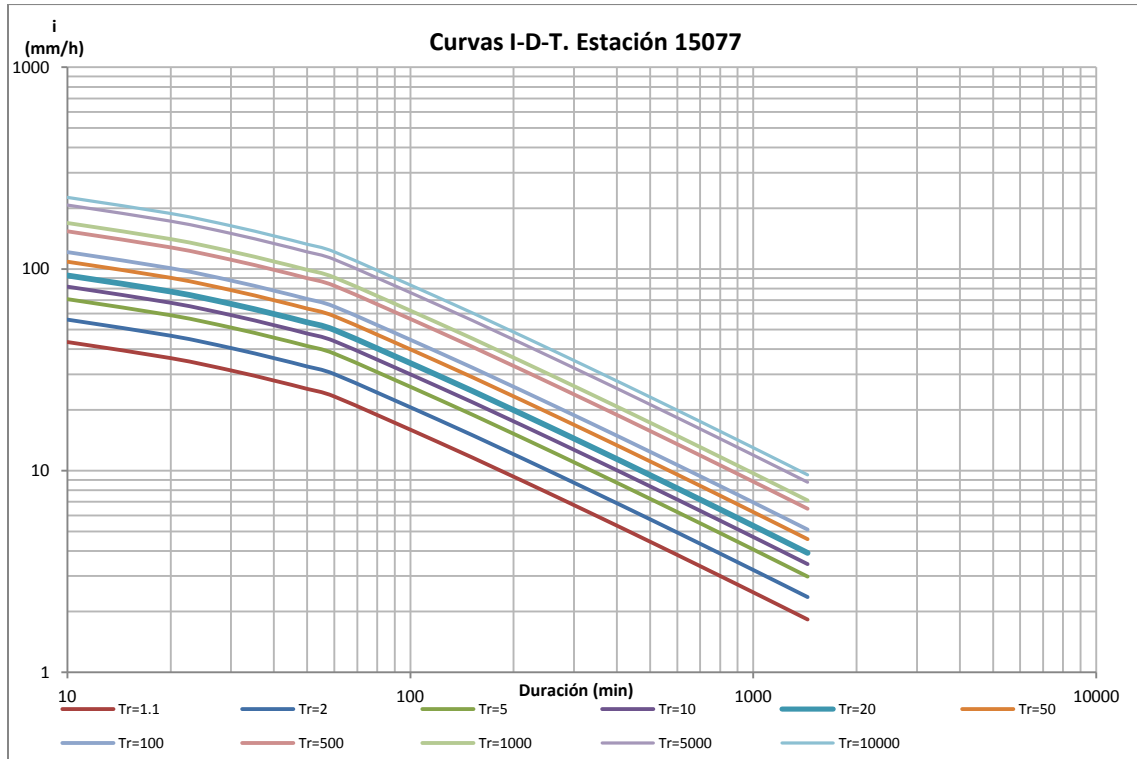


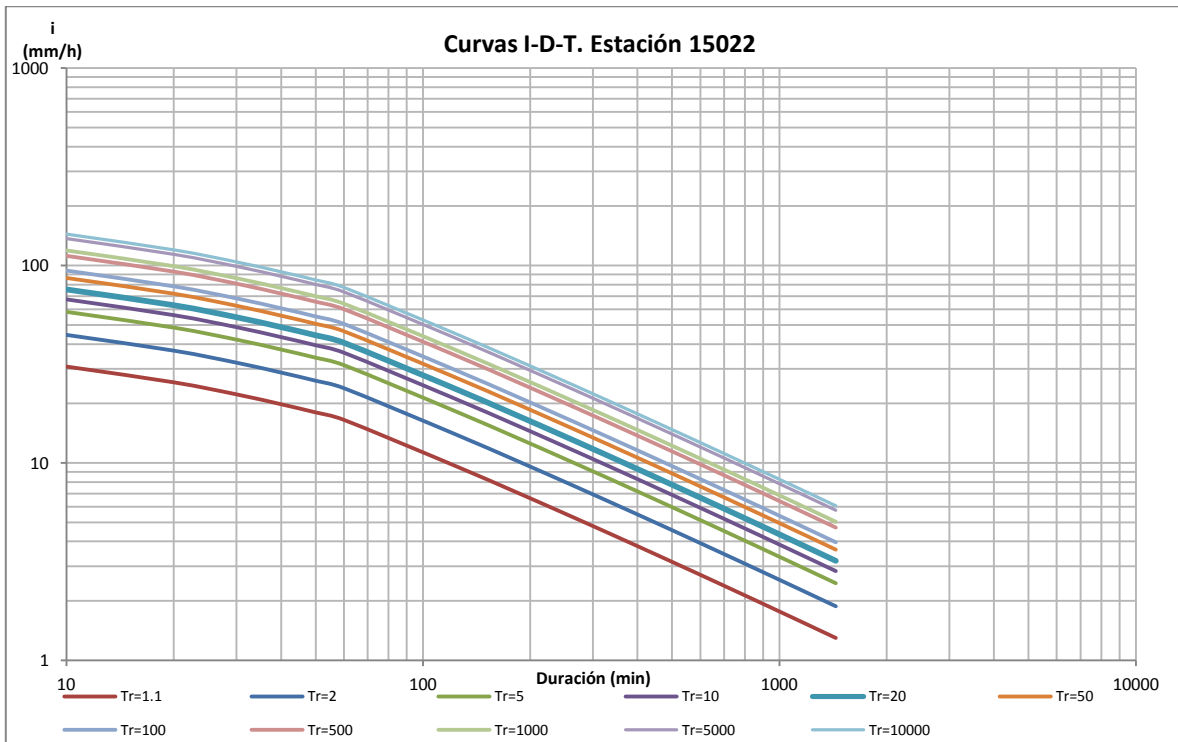
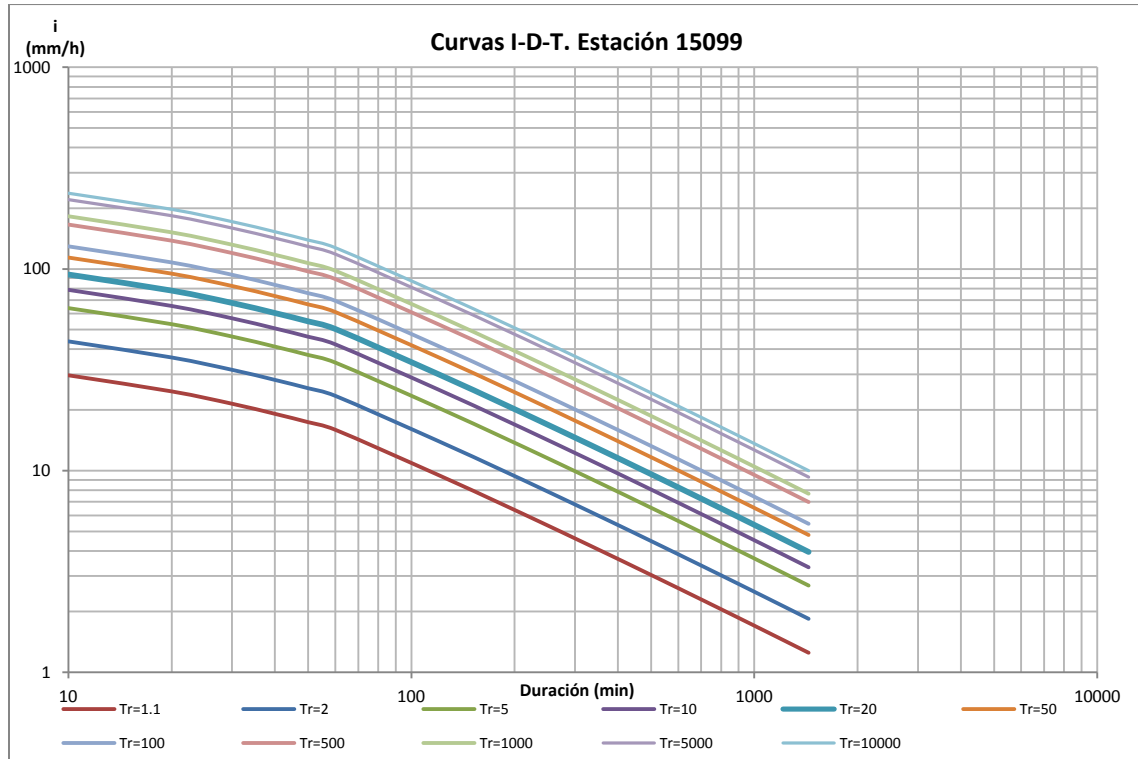


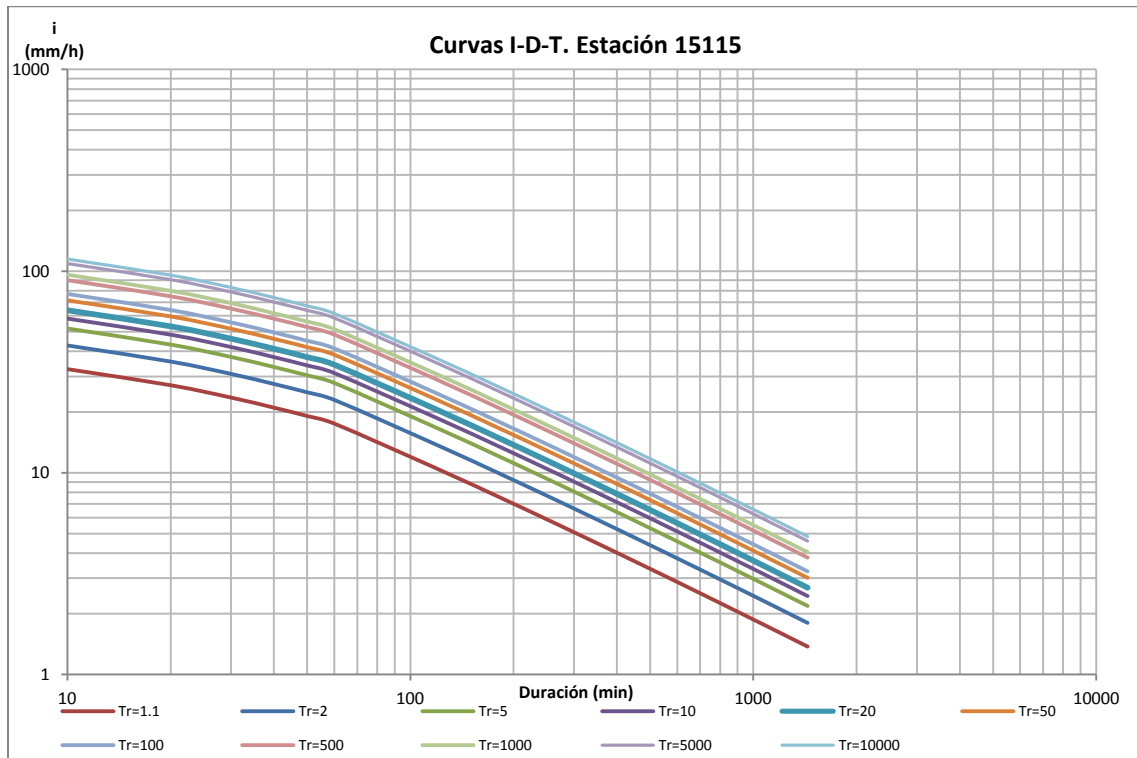
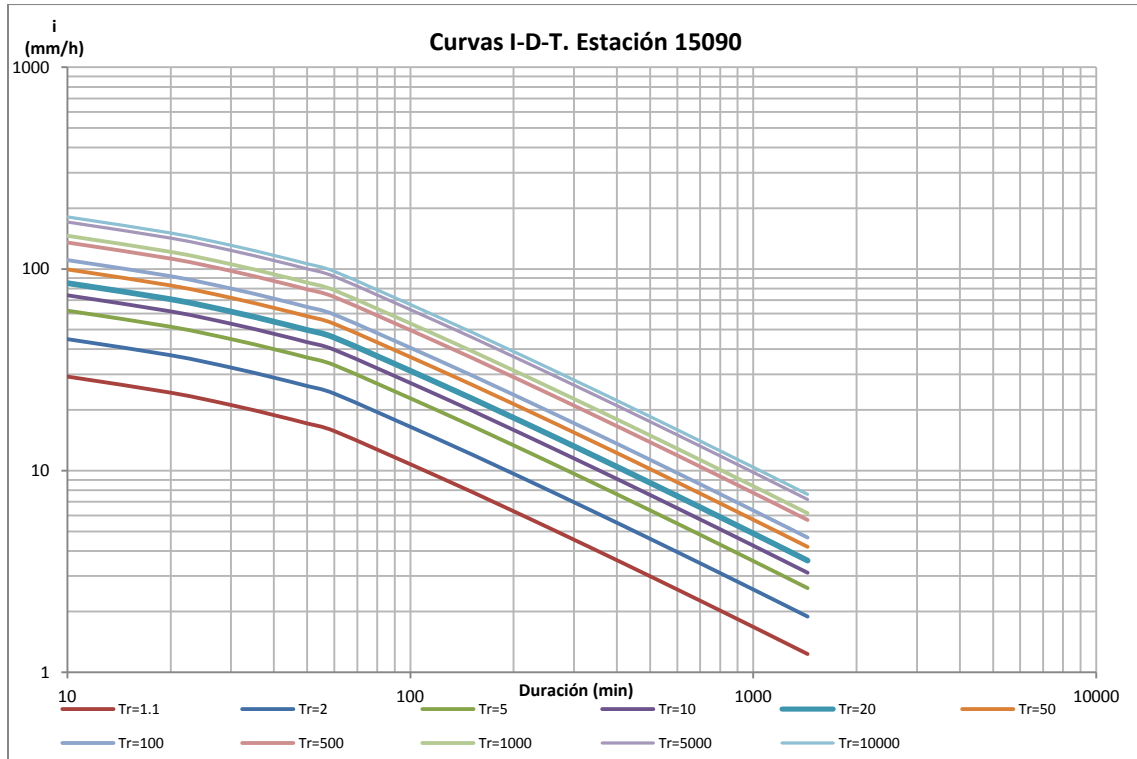




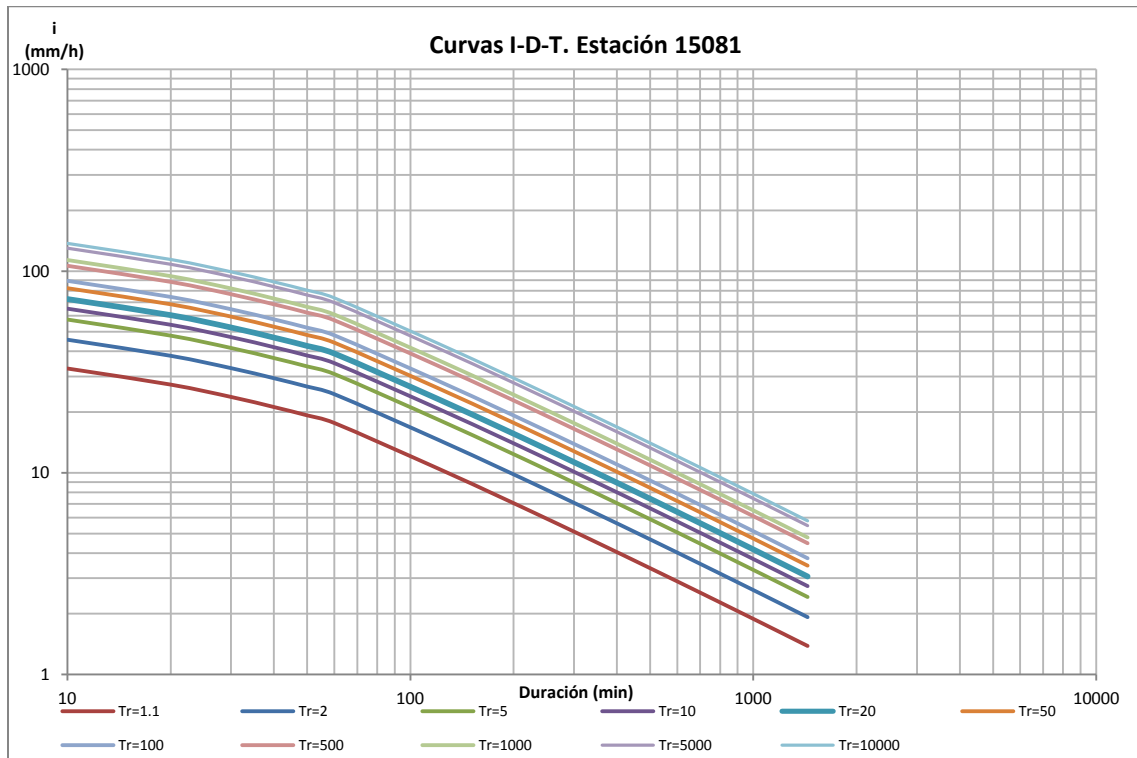
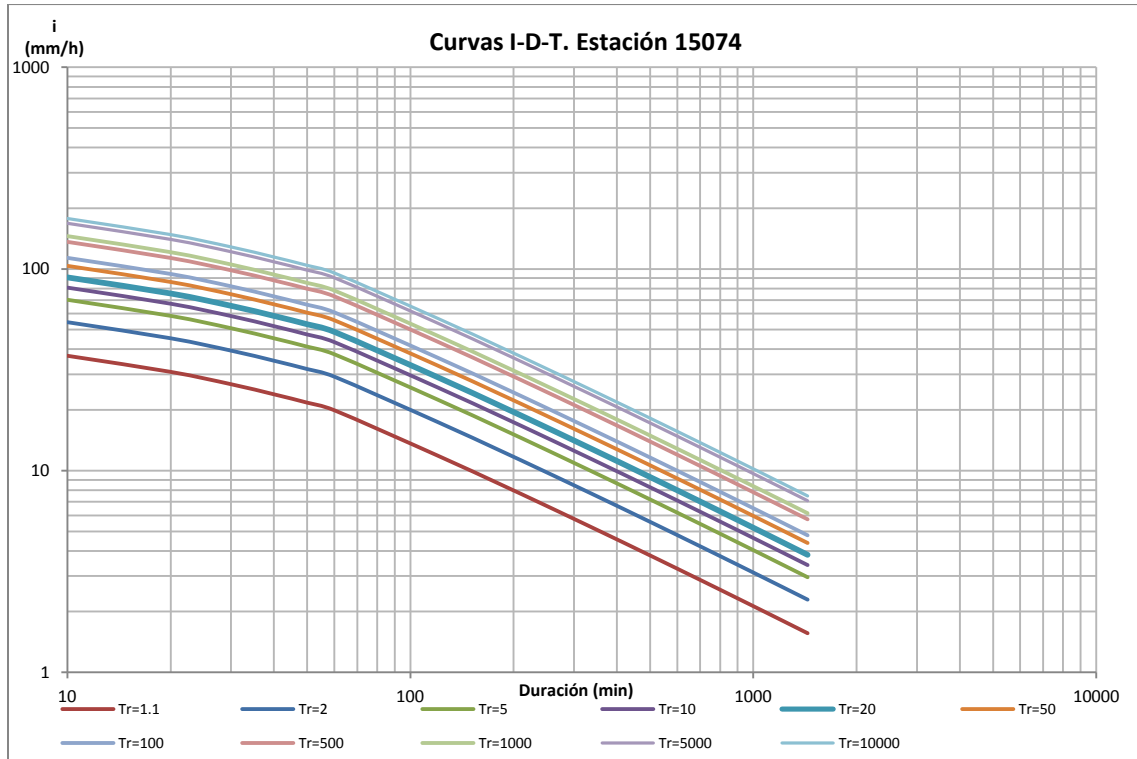


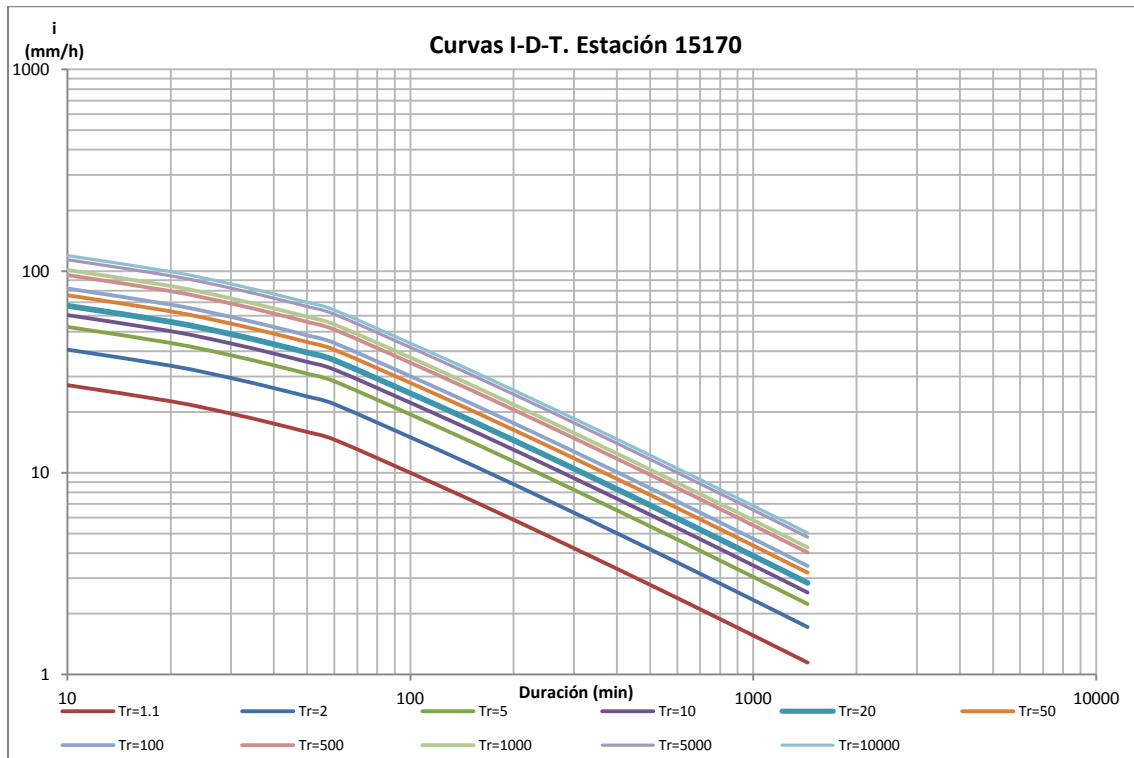
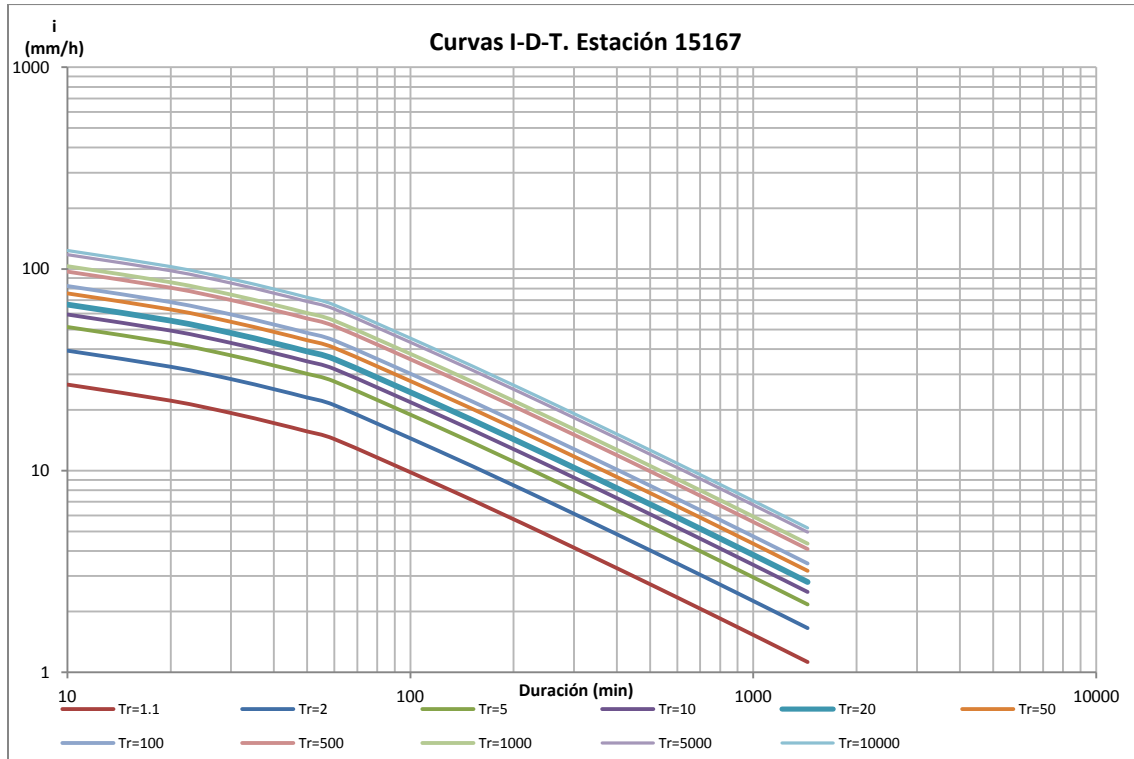


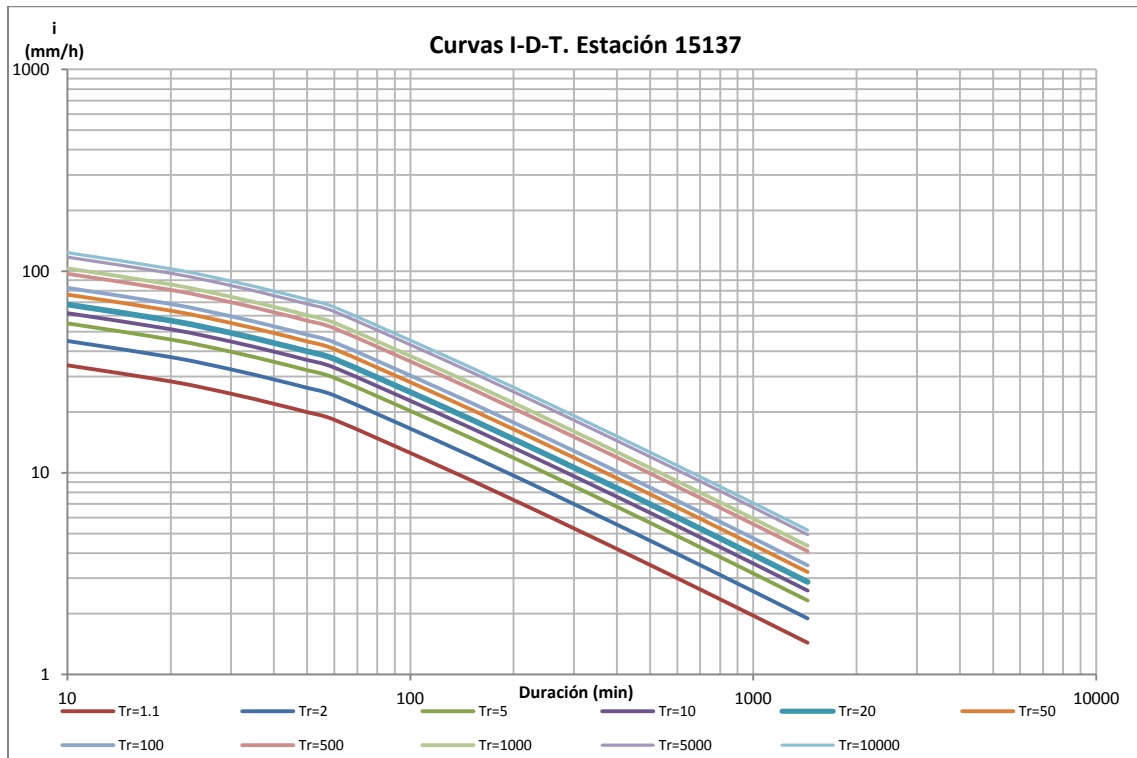
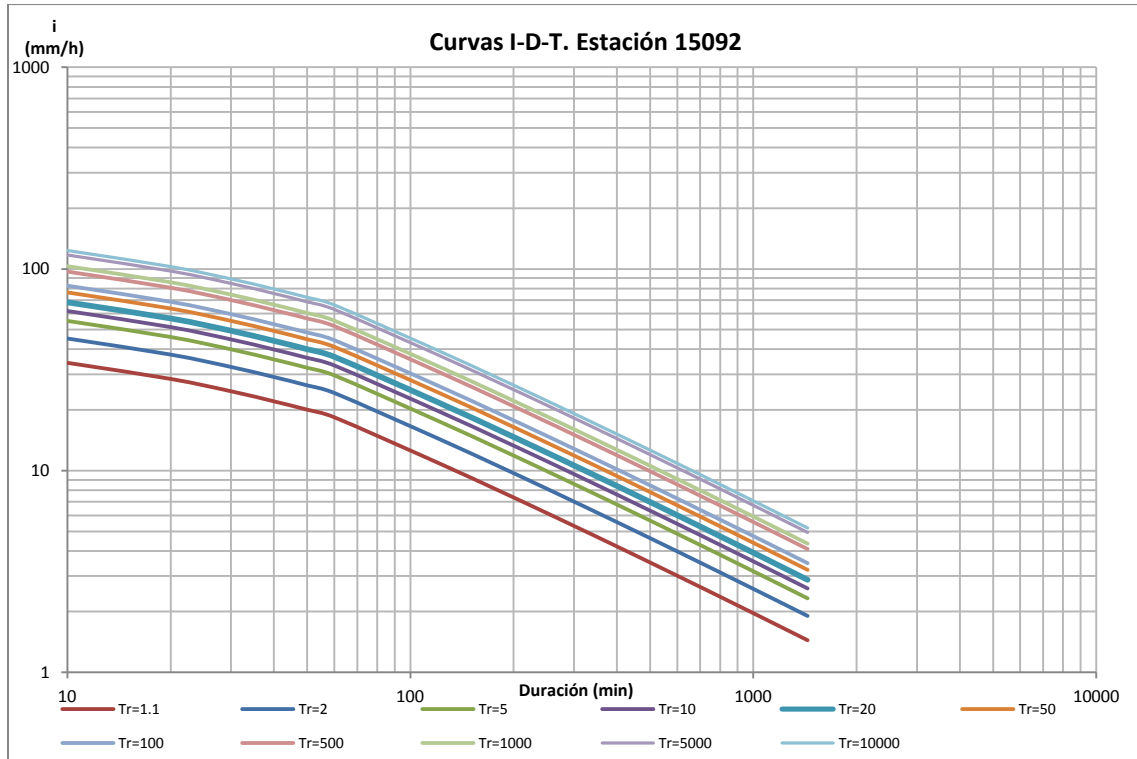


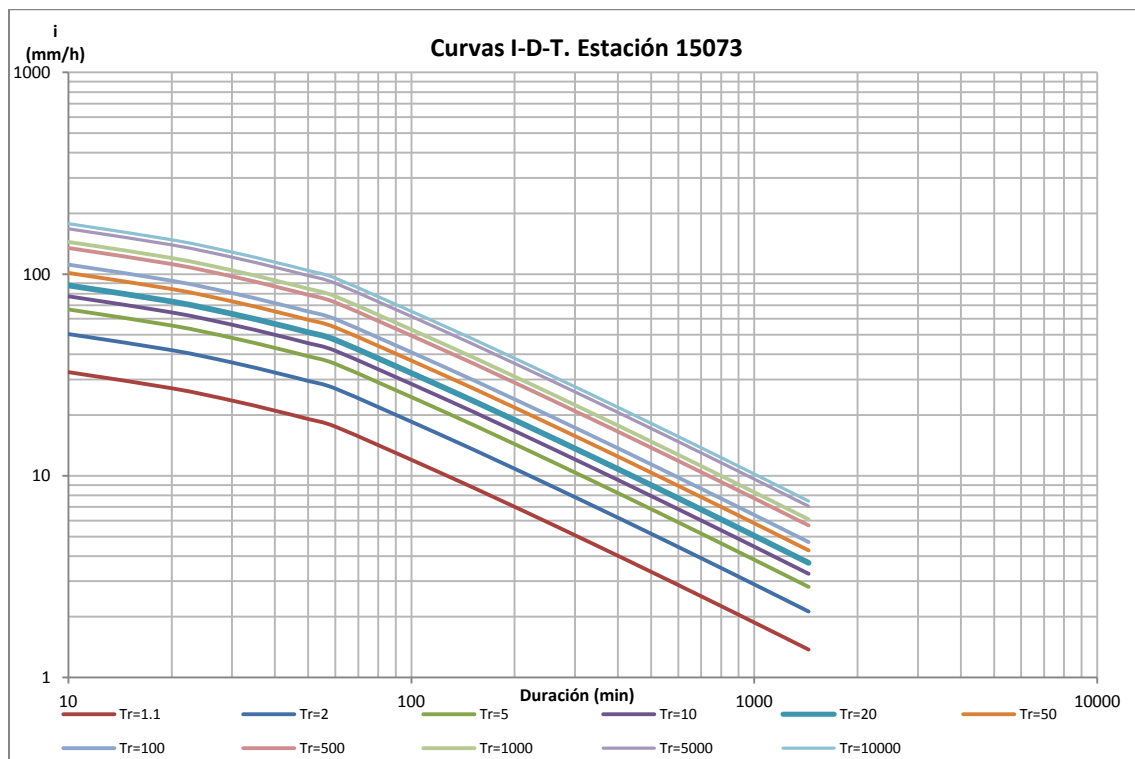
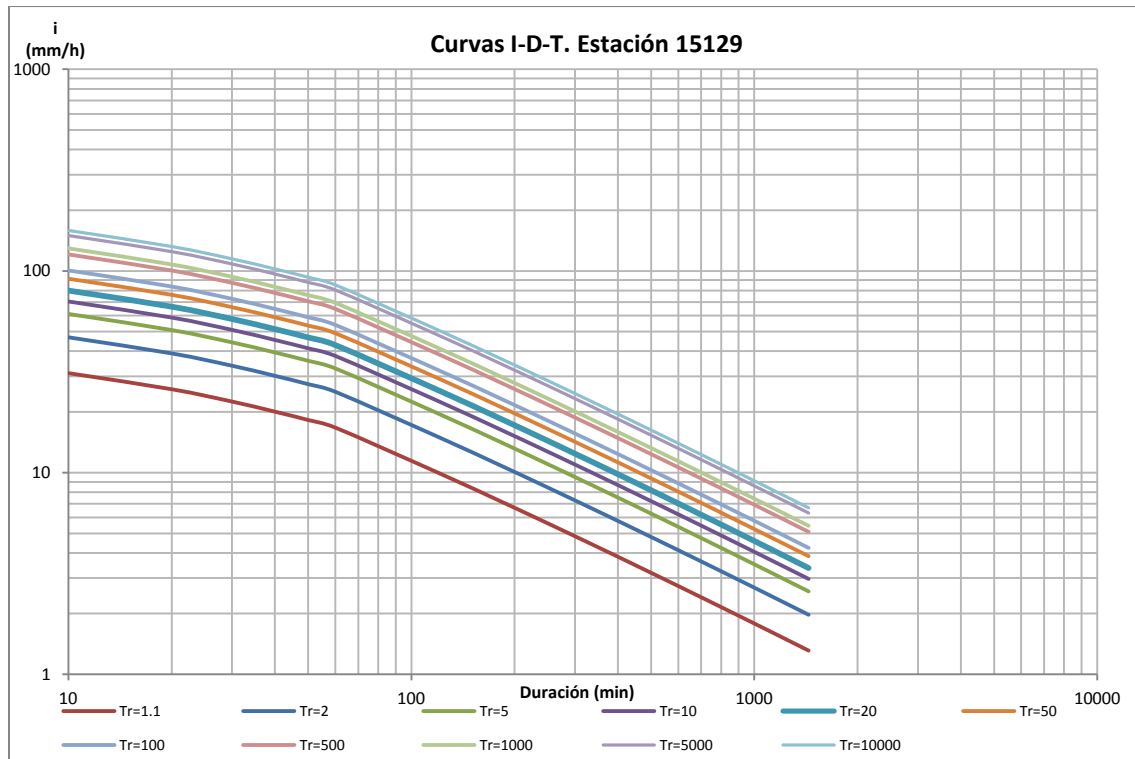


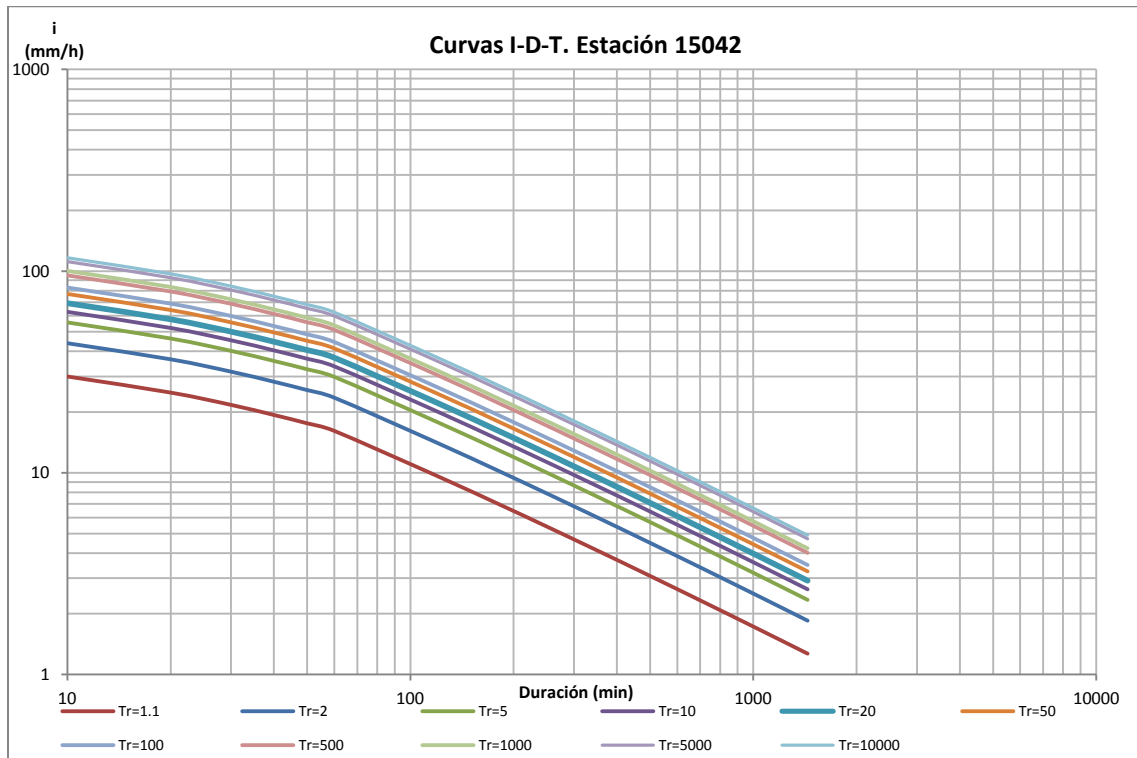
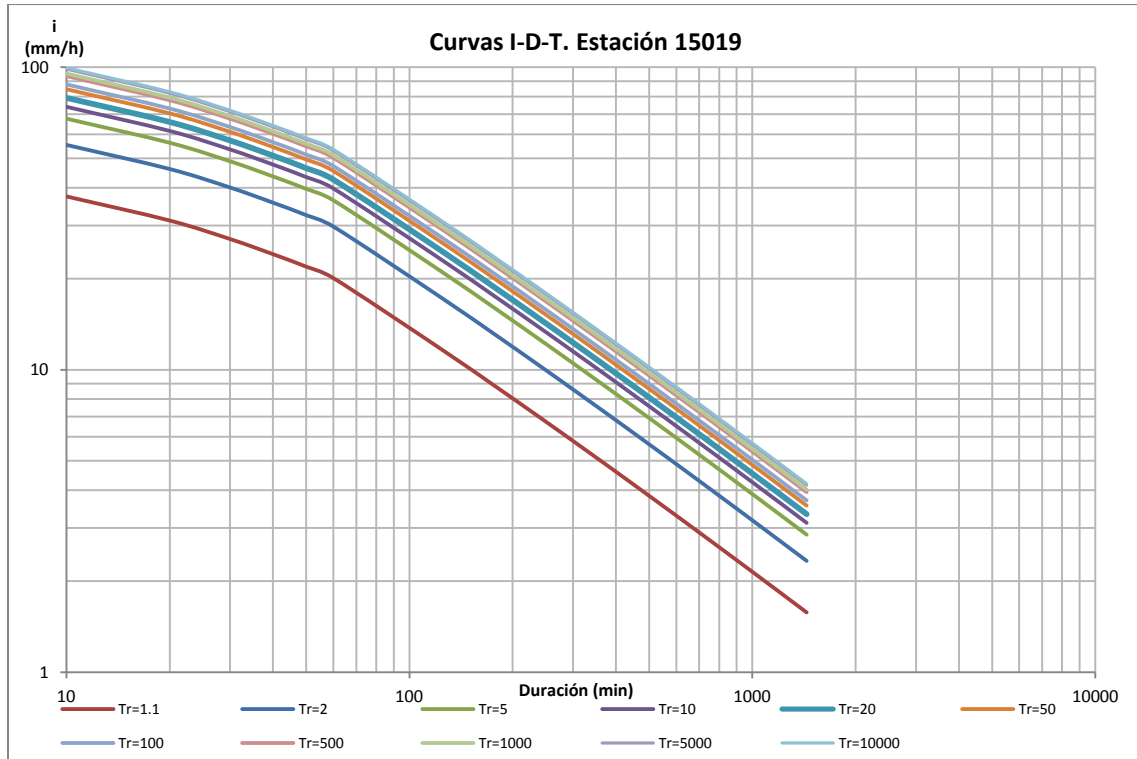












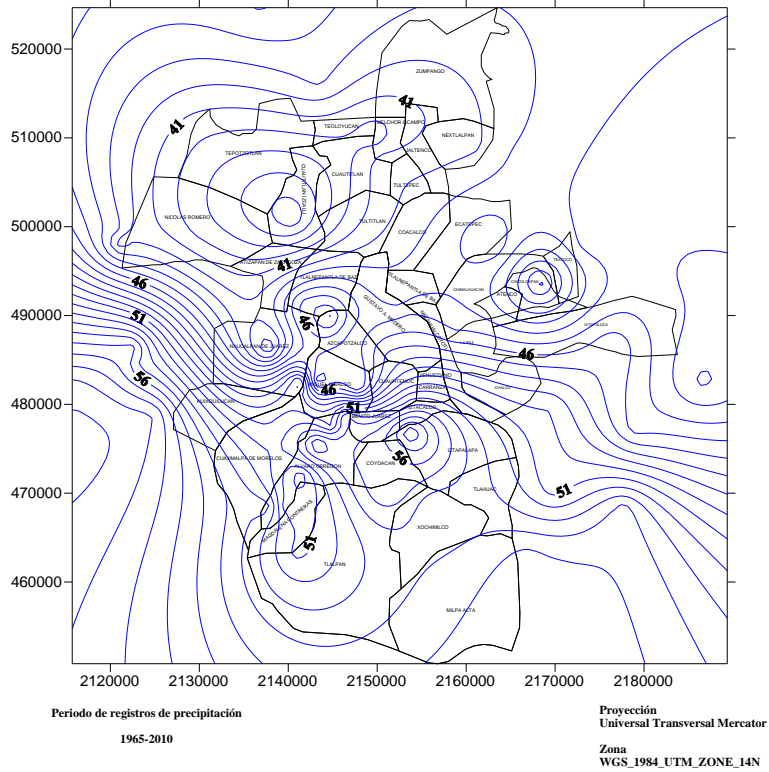
## **ANEXO C**

### **ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN**

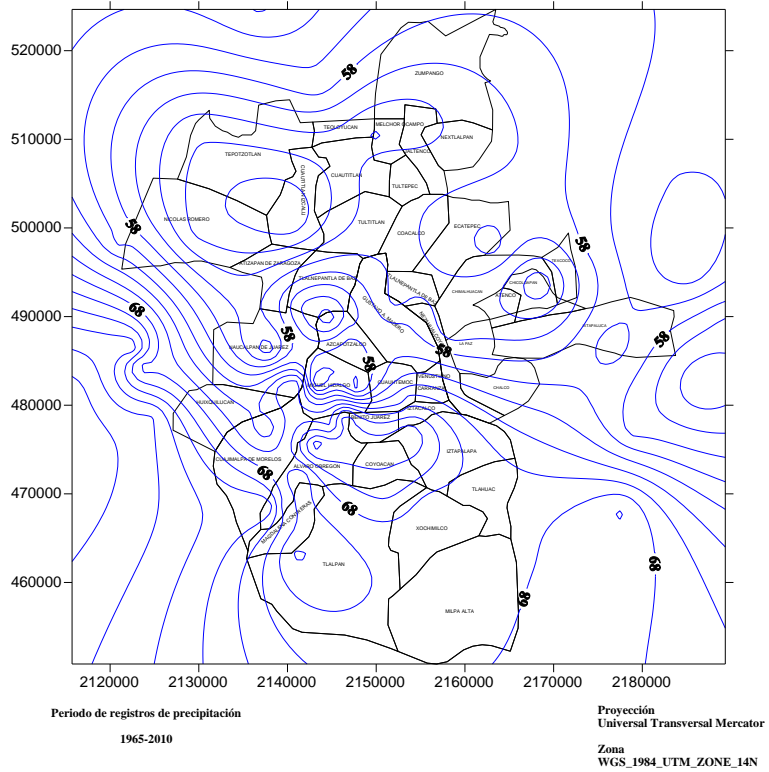
Este anexo incluye los resultados de la determinación de las Isoyetas de Precipitación para el área de estudio. Los valores utilizados para el cálculo de las mismas se obtuvieron de las curvas I-D-T calculadas en el capítulo V de este trabajo y que se encuentran en el anexo B. Se obtuvieron las Isoyetas de precipitación para las duraciones de 10, 20,30,40,50 y 60 minutos, asociadas cada una a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 1 00, 5 00, 1 000, 5 000 y 10 000 años

Anexo C

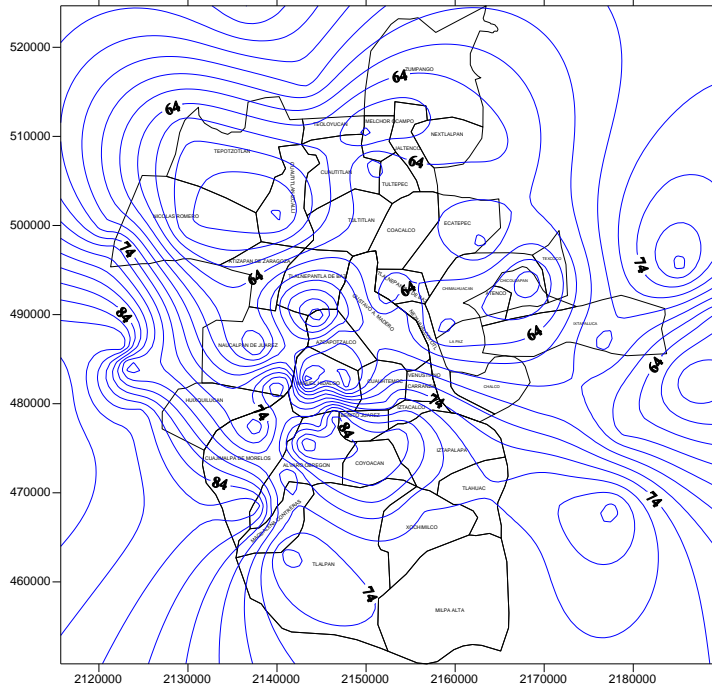
Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 10 minutos y periodo de retorno de 2 años



Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 10 minutos y periodo de retorno de 5 años



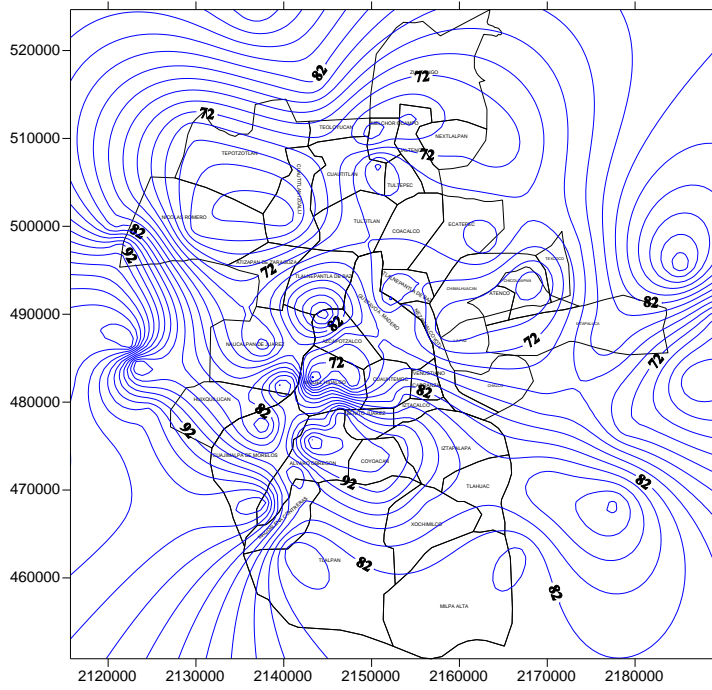
Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 10 minutos y periodo de retorno de 10 años



Periodo de registros de precipitación  
1965-2010

Proyección  
Universal Transversal Mercator  
Zona  
WGS\_1984\_UTM\_ZONE\_14N

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 10 minutos y periodo de retorno de 20 años



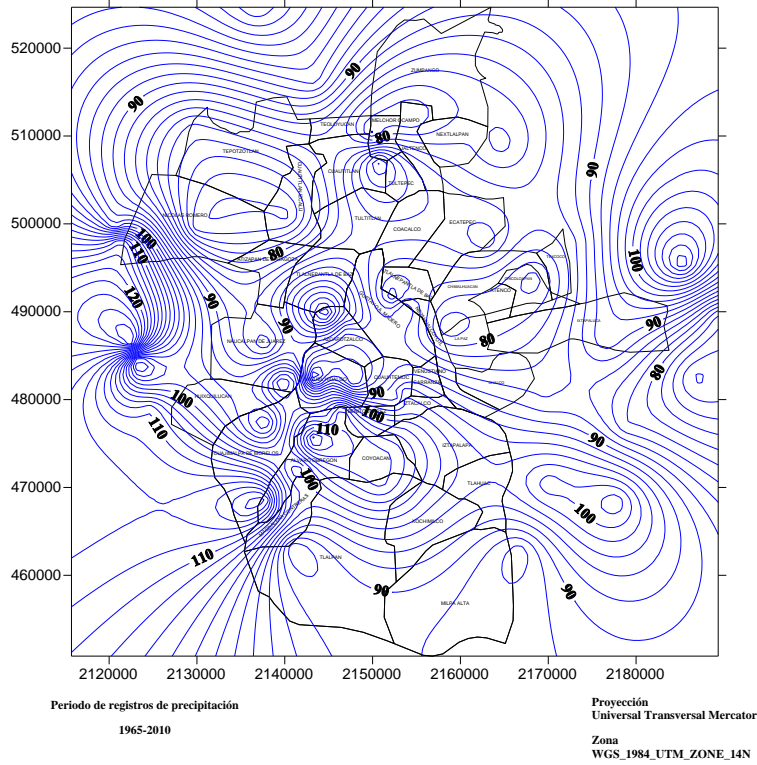
Periodo de registros de precipitación  
1965-2010

Proyección  
Universal Transversal Mercator  
Zona  
WGS\_1984\_UTM\_ZONE\_14N

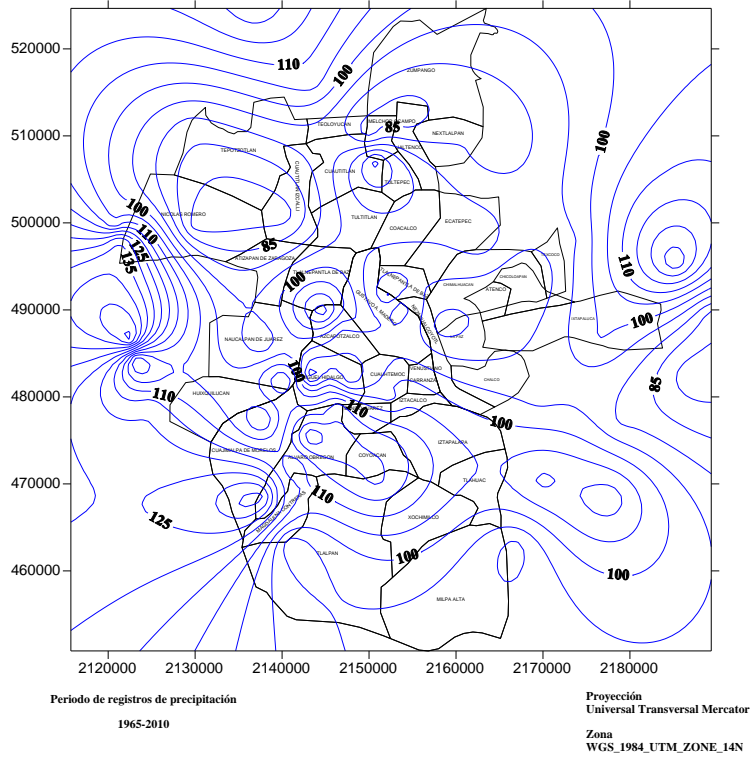


# Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 10 minutos y periodo de retorno de 50 años

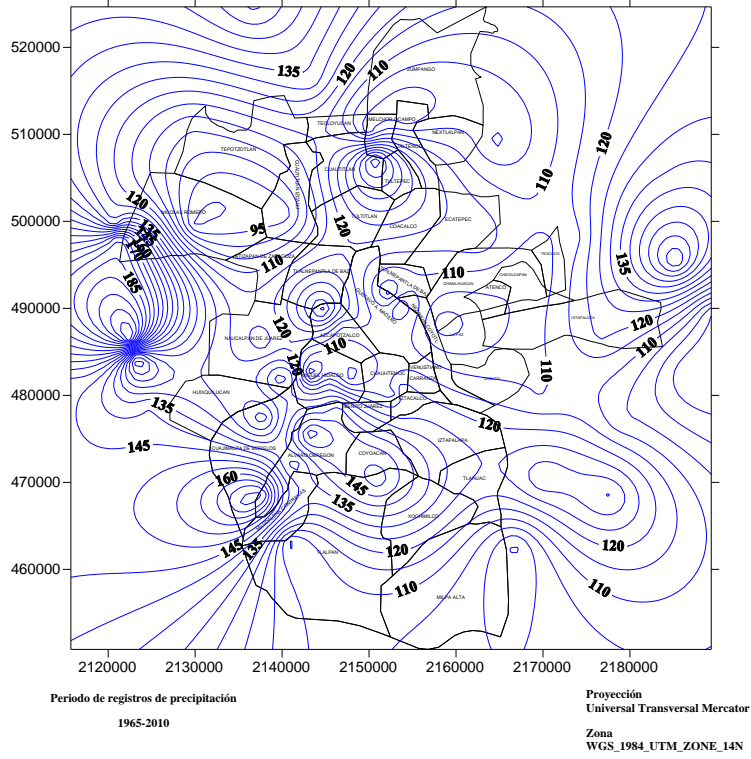


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 10 minutos y periodo de retorno de 100 años

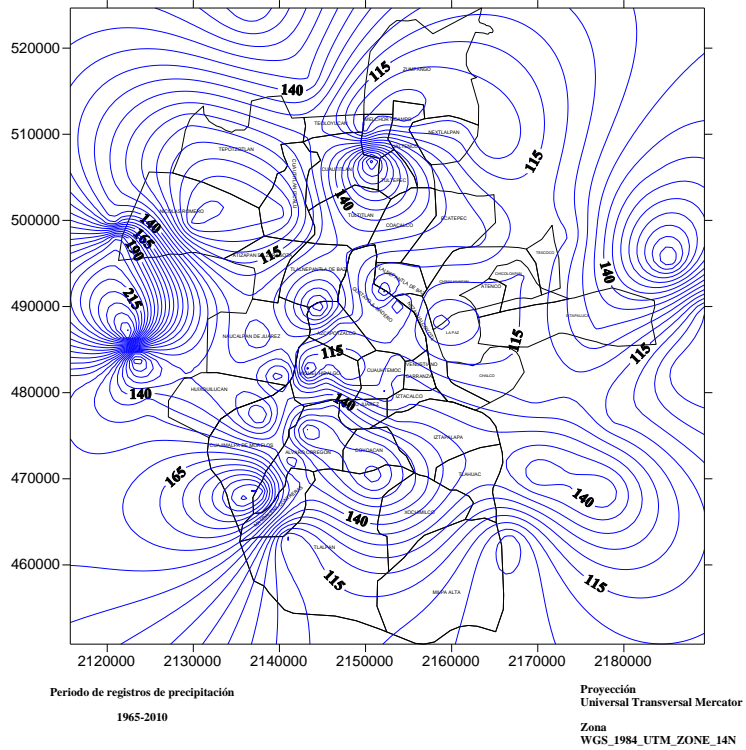


## Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 10 minutos y periodo de retorno de 500 años

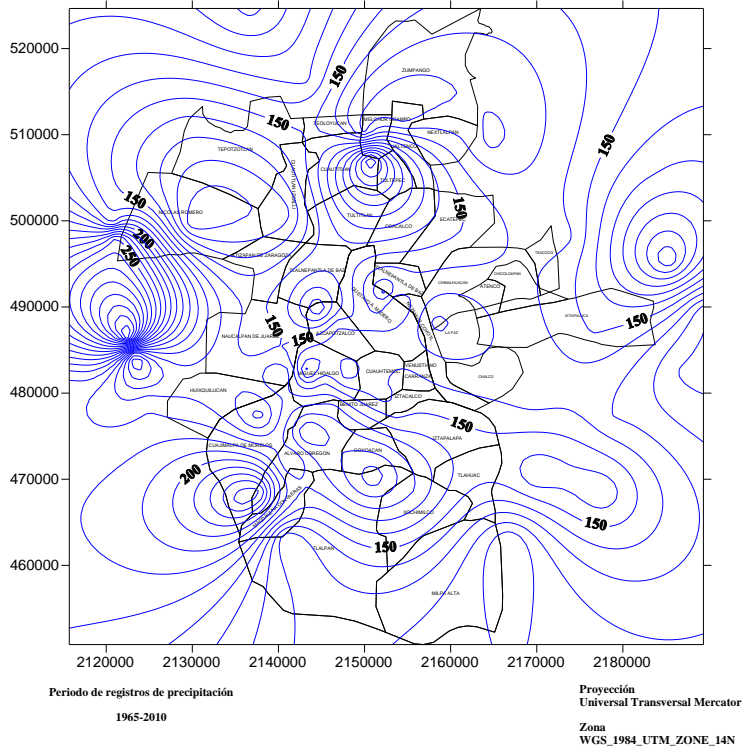


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 10 minutos y periodo de retorno de 1000 años

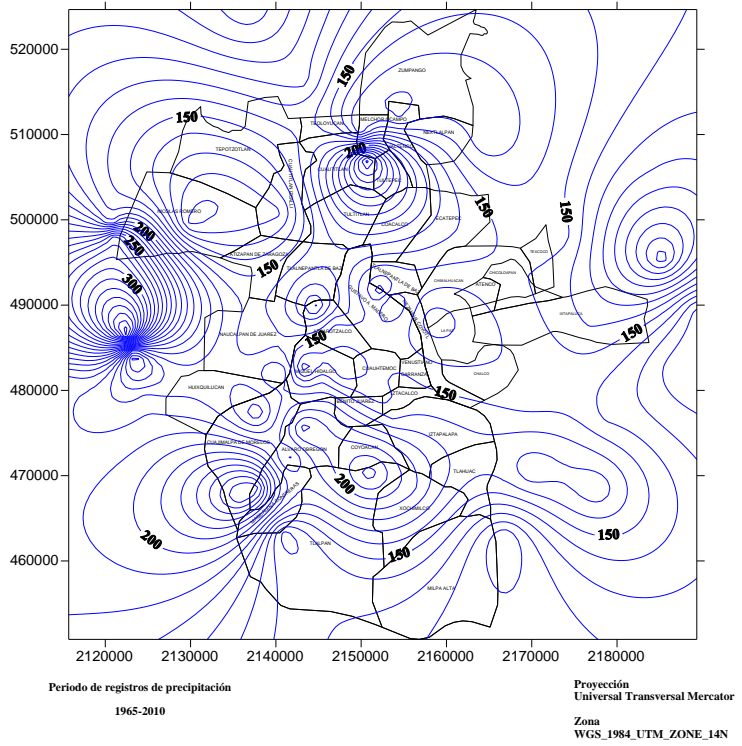


# Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 10 minutos y periodo de retorno de 5000 años

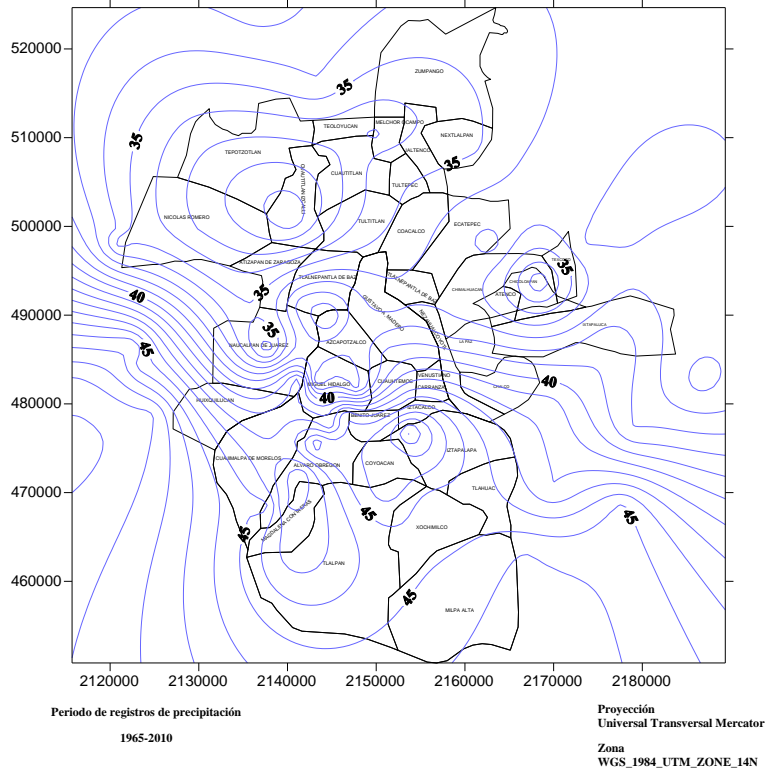


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 10 minutos y periodo de retorno de 10000 años

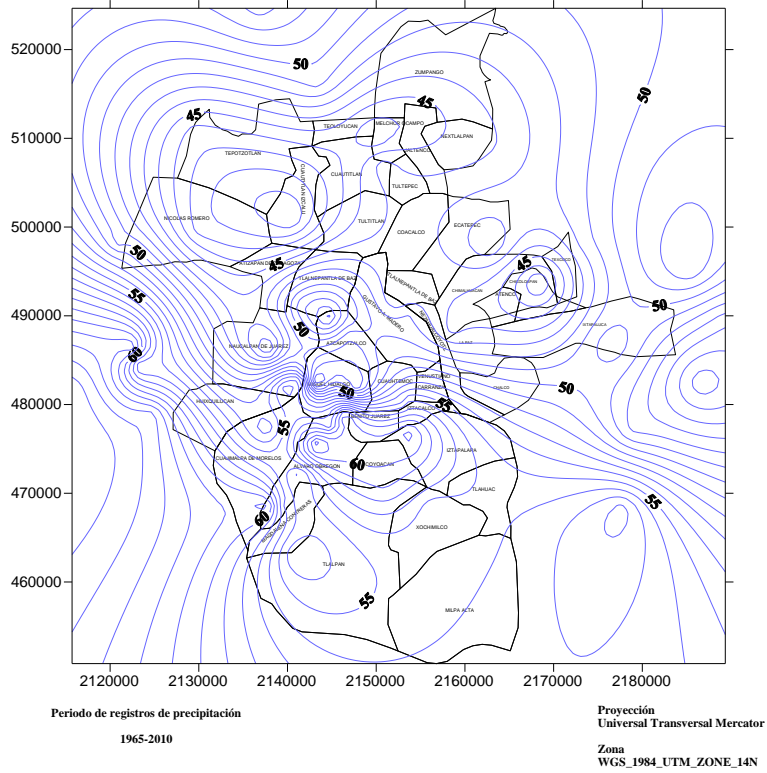


# Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 20 minutos y periodo de retorno de 2 años

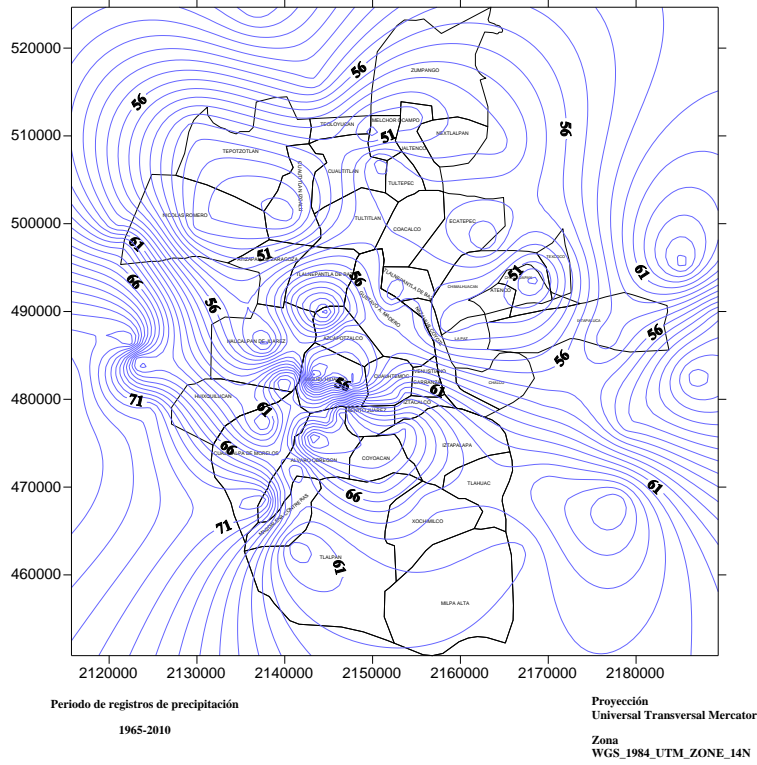


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 20 minutos y periodo de retorno de 5 años

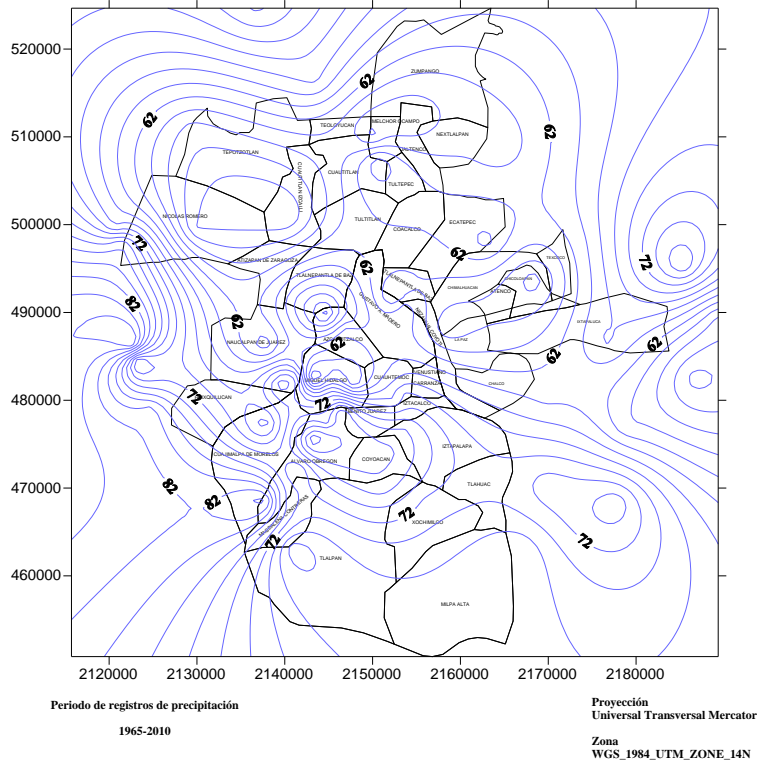


Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 20 minutos y periodo de retorno de 10 años

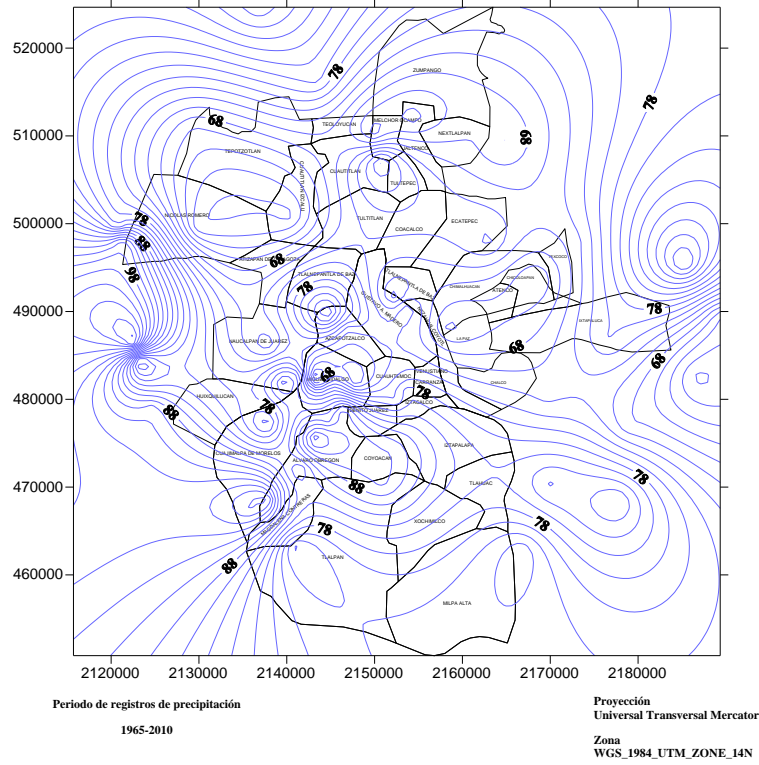


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 20 minutos y periodo de retorno de 20 años

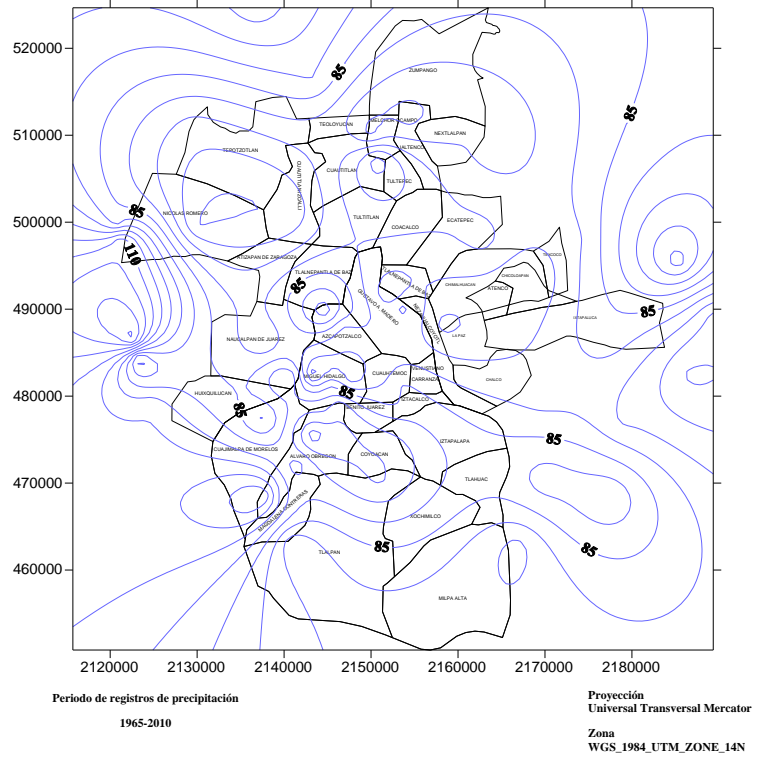


## Anexo C

**Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 20 minutos y periodo de retorno de 50 años**

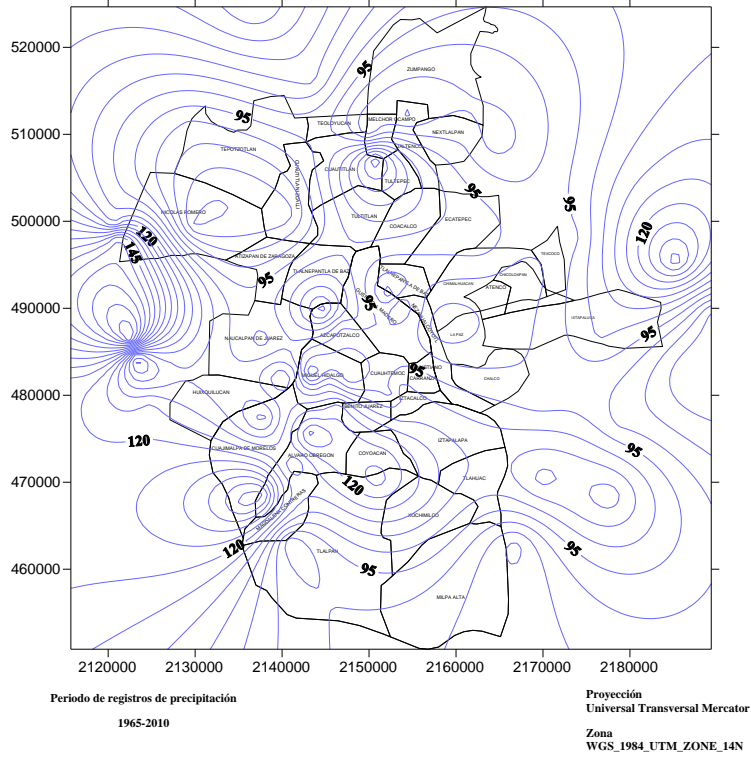


**Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 20 minutos y periodo de retorno de 100 años**

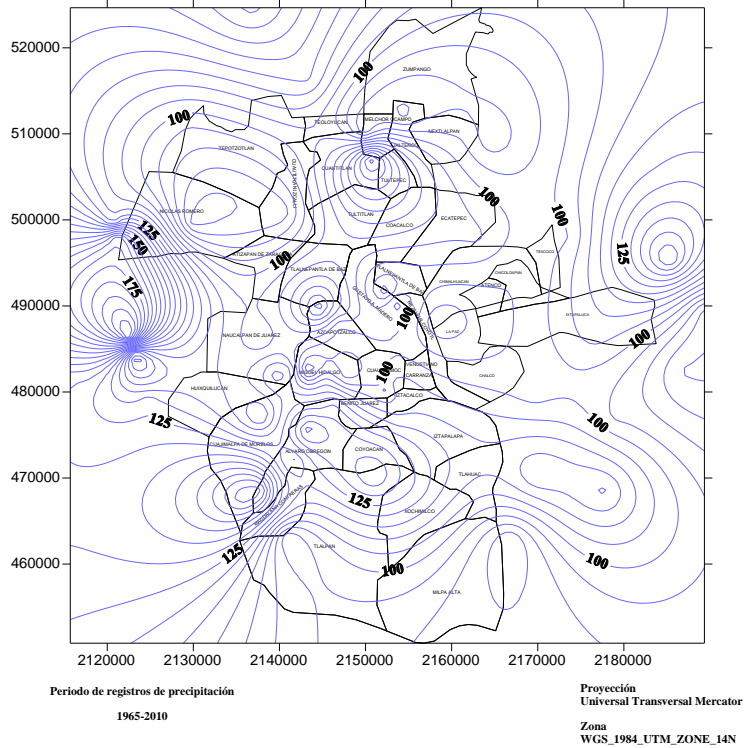


## Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 20 minutos y periodo de retorno de 500 años

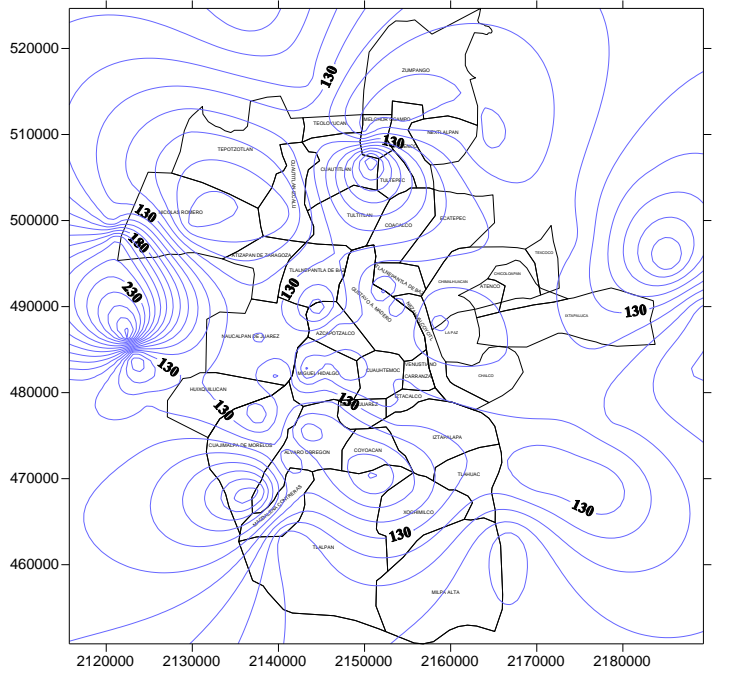


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 20 minutos y periodo de retorno de 1000 años



# Anexo C

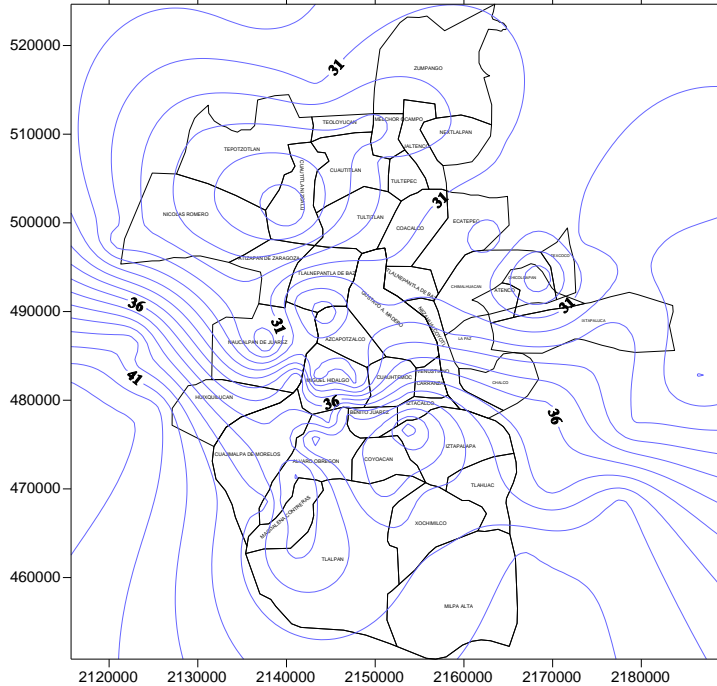
Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 20 minutos y periodo de retorno de 5000 años



Periodo de registros de precipitación  
1965-2010

Proyección  
Universal Transversal Mercator  
Zona  
WGS\_1984\_UTM\_ZONE\_14N

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 30 minutos y periodo de retorno de 2 años



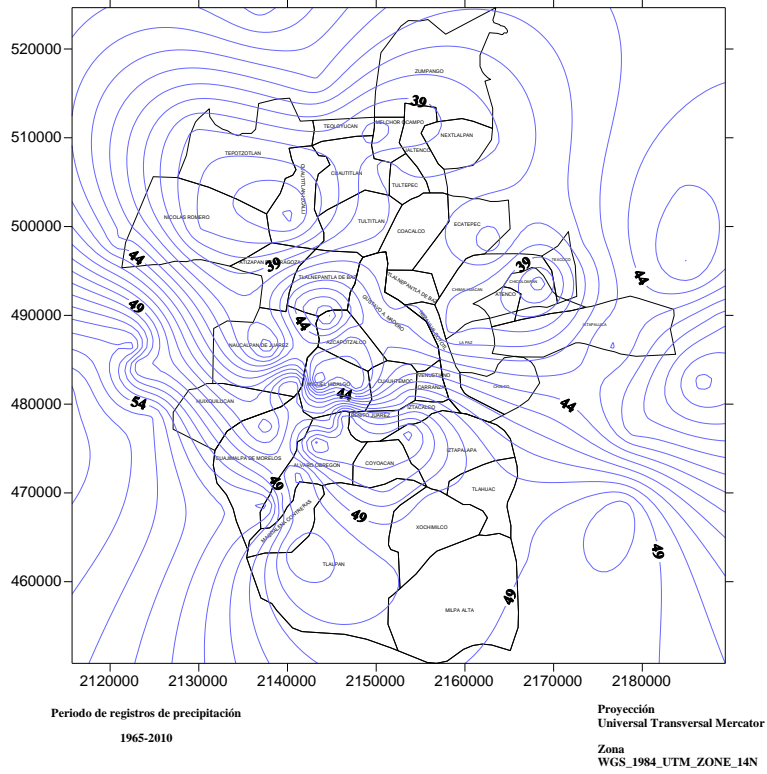
Periodo de registros de precipitación  
1965-2010

Proyección  
Universal Transversal Mercator  
Zona  
WGS\_1984\_UTM\_ZONE\_14N

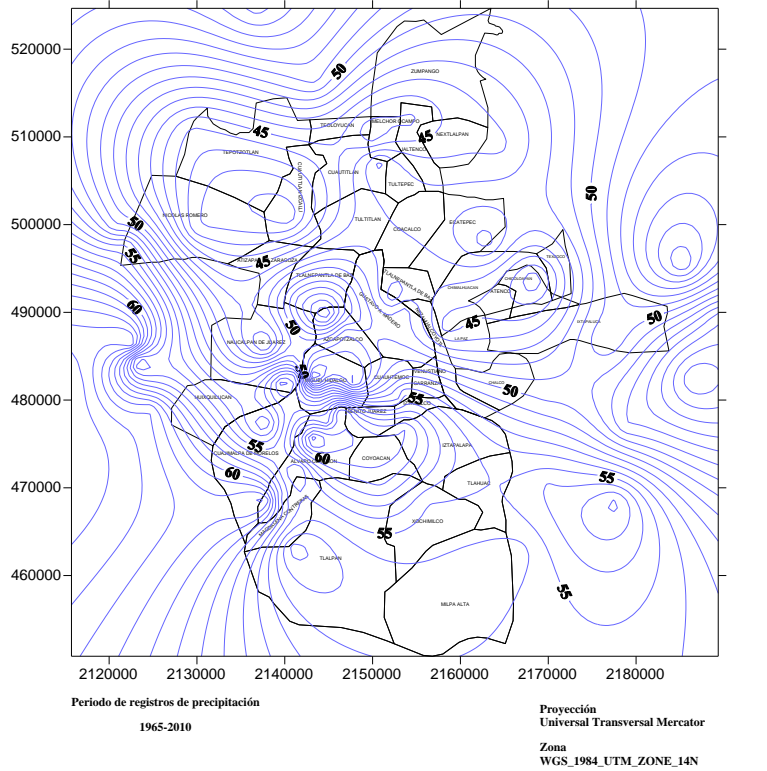


Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 30 minutos y periodo de retorno de 5 años

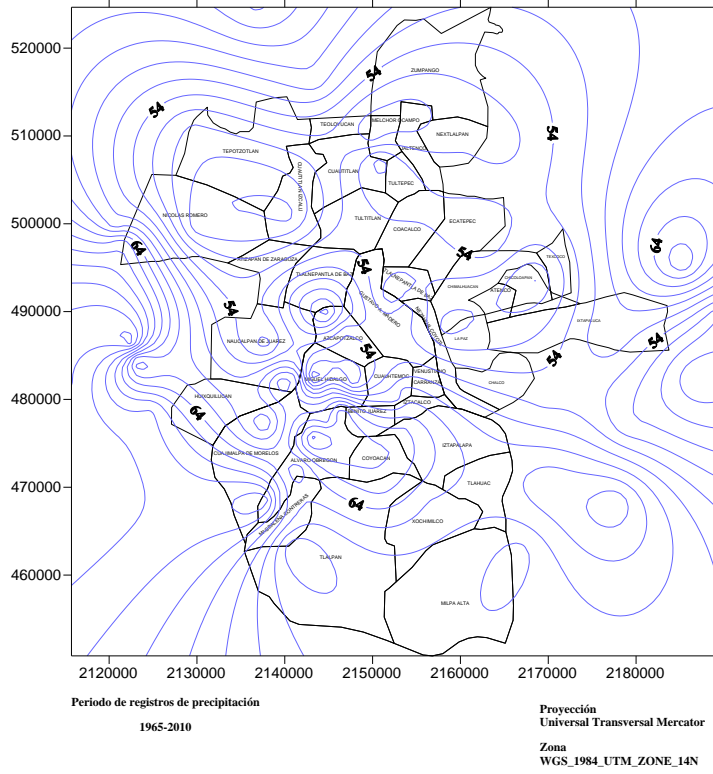


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 30 minutos y periodo de retorno de 10 años

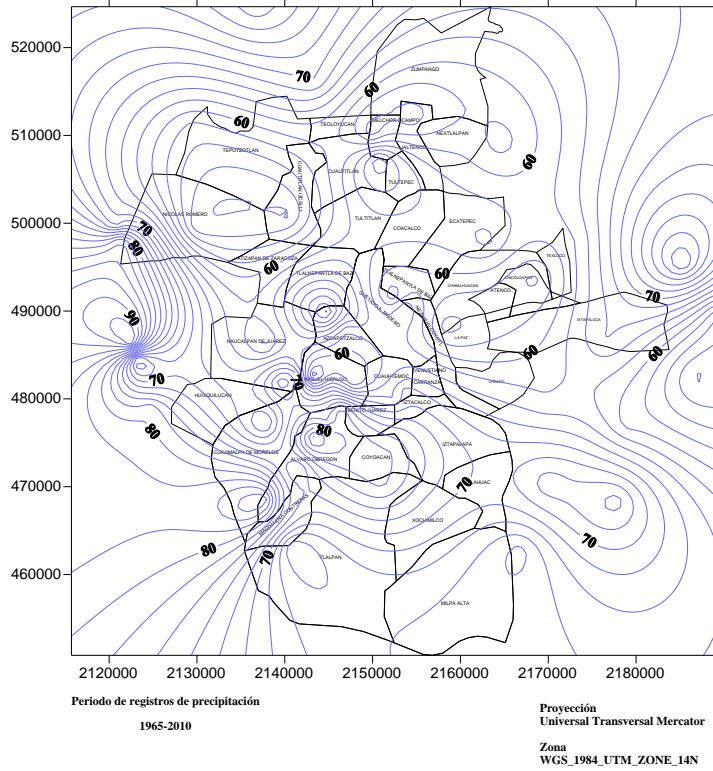


# Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 30 minutos y periodo de retorno de 20 años

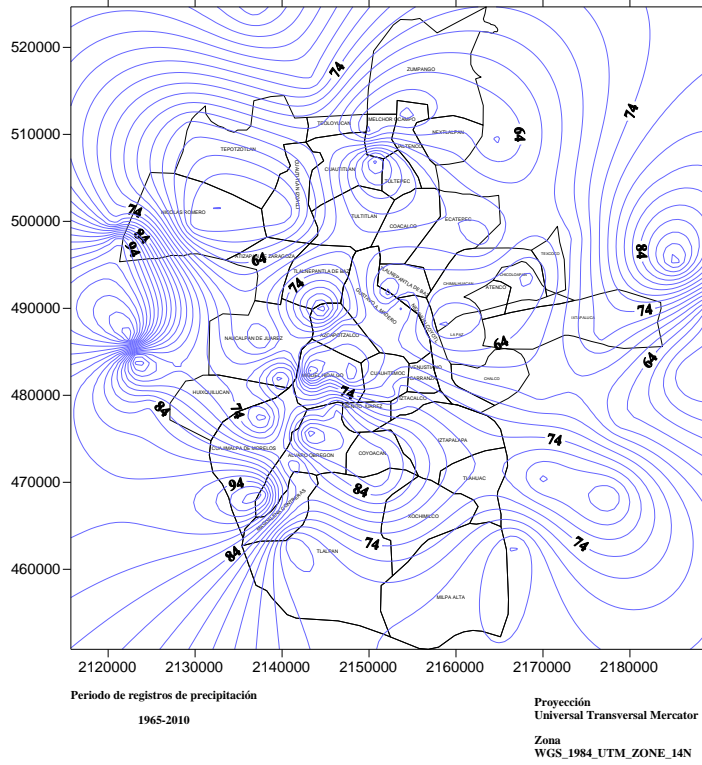


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 30 minutos y periodo de retorno de 50 años

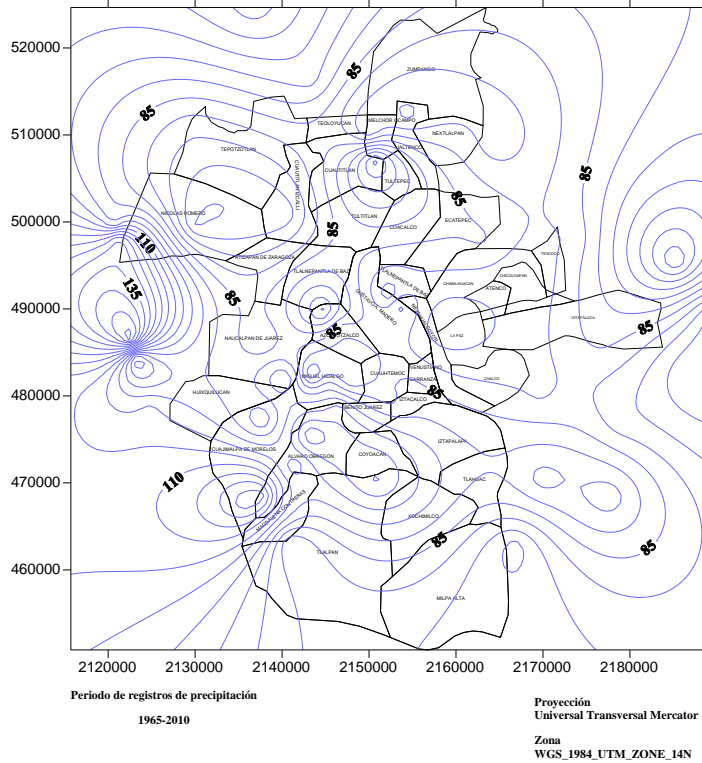


## Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 30 minutos y periodo de retorno de 100 años

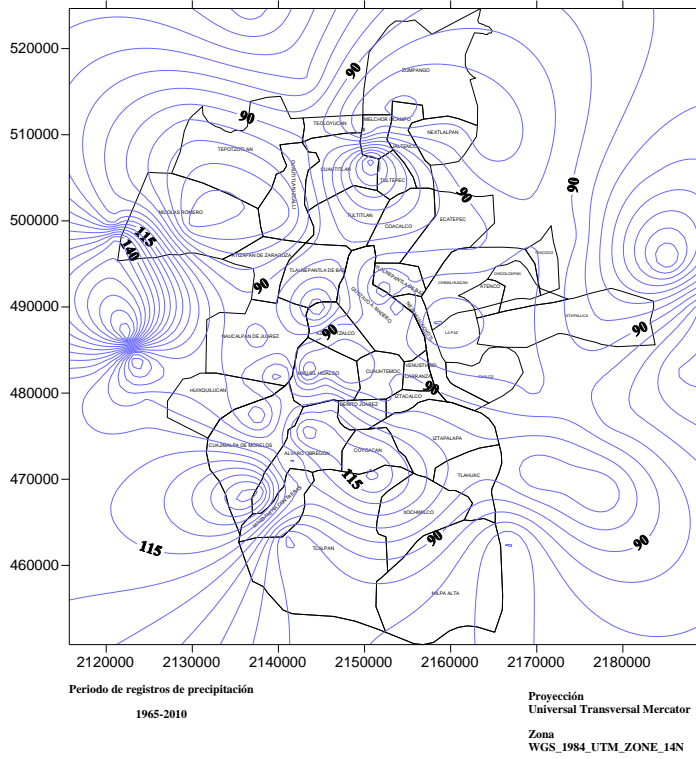


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 30 minutos y periodo de retorno de 500 años

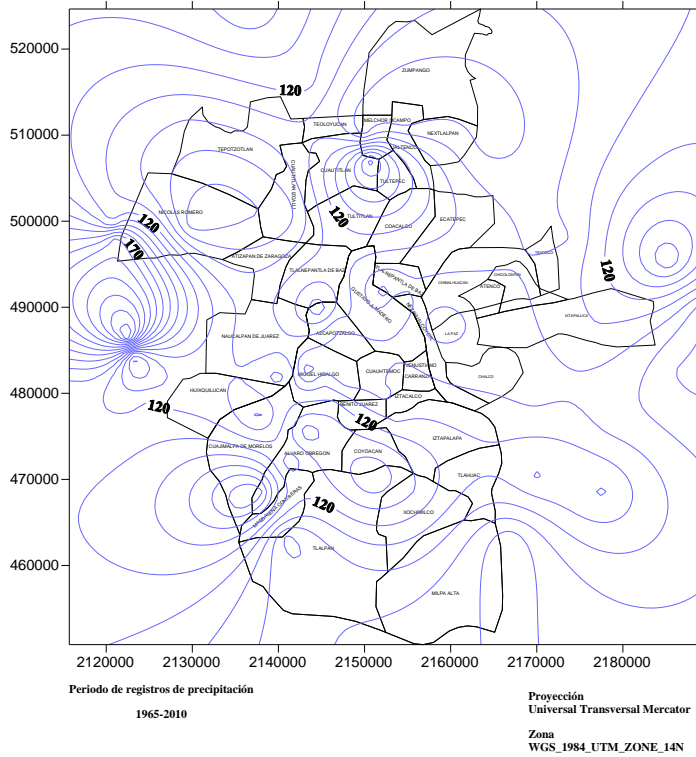


# Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 30 minutos y periodo de retorno de 1000 años

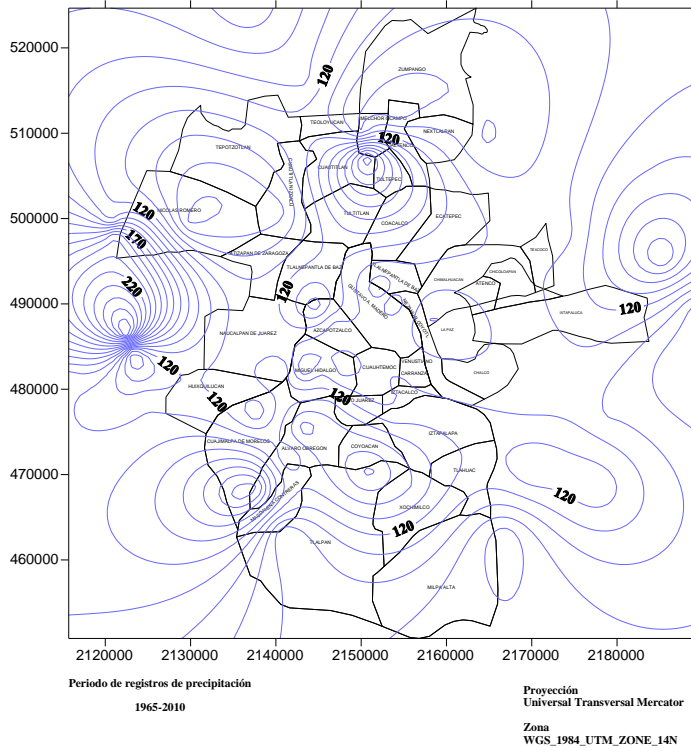


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 30 minutos y periodo de retorno de 500 años

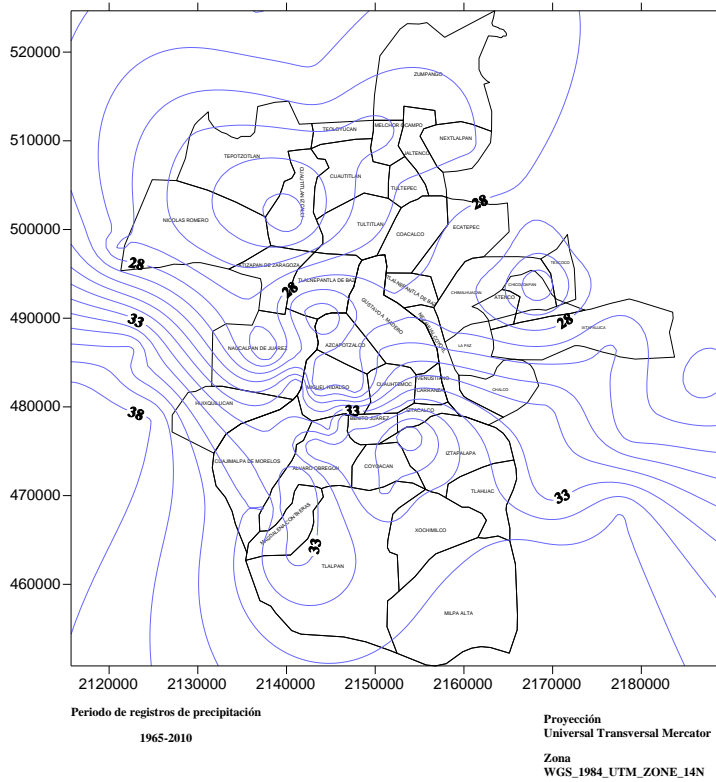


# Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 30 minutos y periodo de retorno de 10000 años

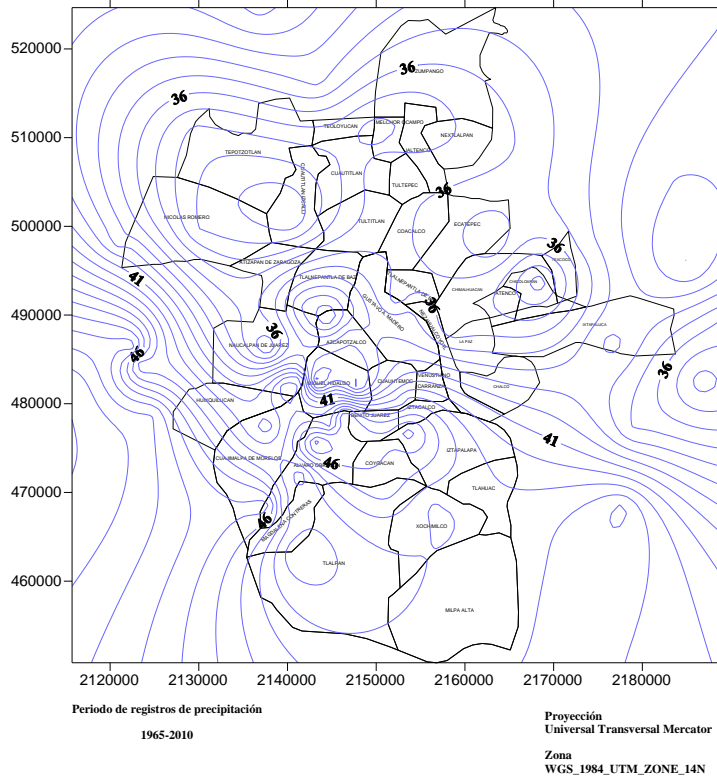


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 40 minutos y periodo de retorno de 2 años

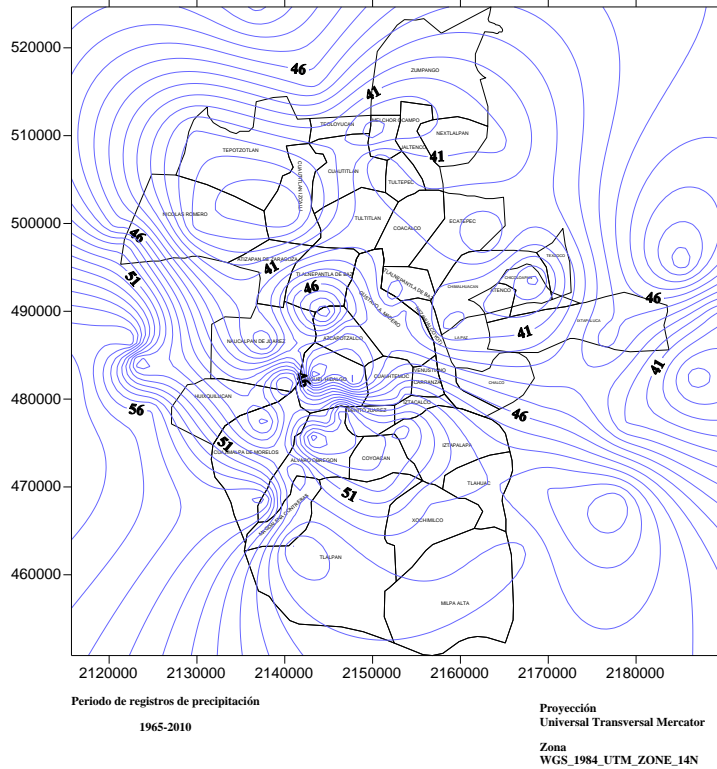


## Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 40 minutos y periodo de retorno de 5 años

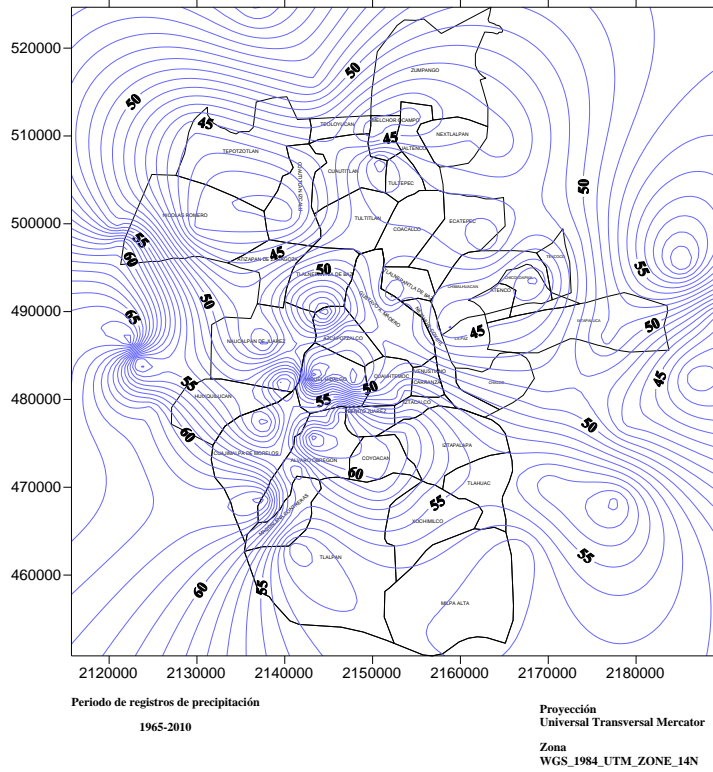


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 40 minutos y periodo de retorno de 10 años

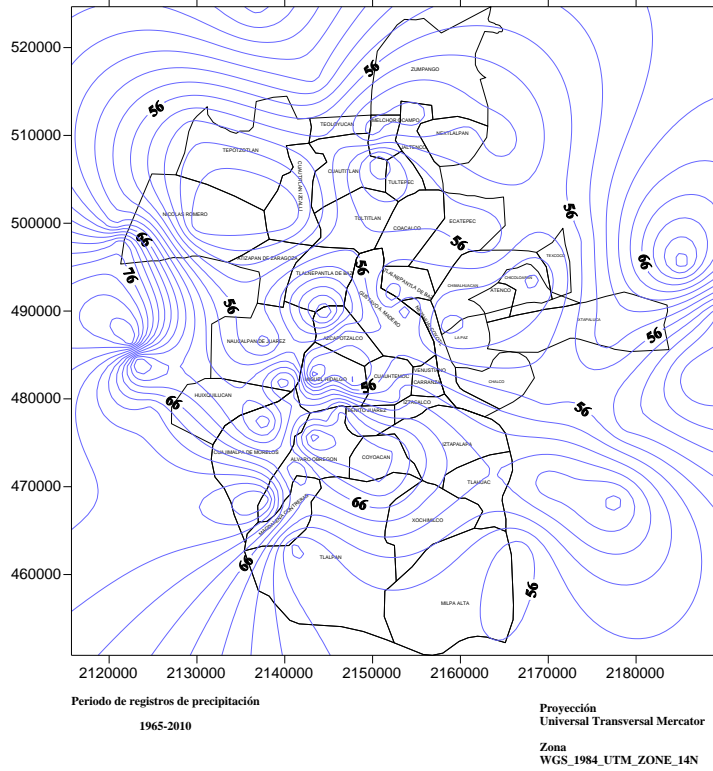


Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 40 minutos y periodo de retorno de 20 años

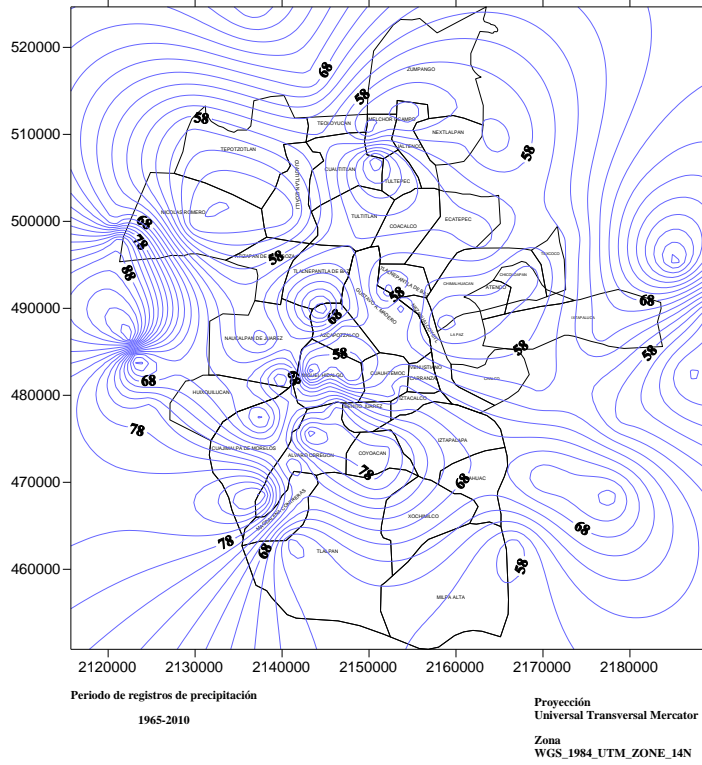


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 40 minutos y periodo de retorno de 50 años

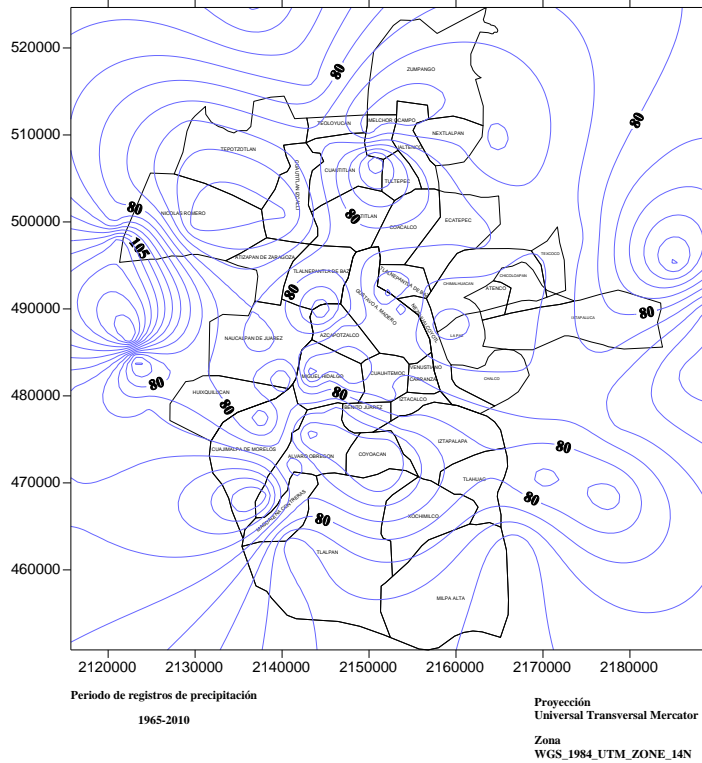


## Anexo C

**Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 40 minutos y periodo de retorno de 100 años**



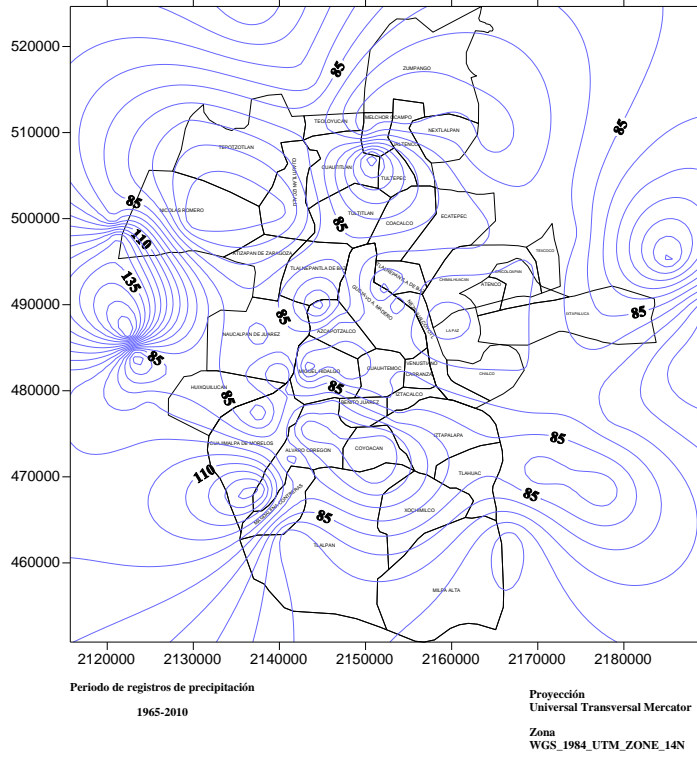
**Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 40 minutos y periodo de retorno de 500 años**



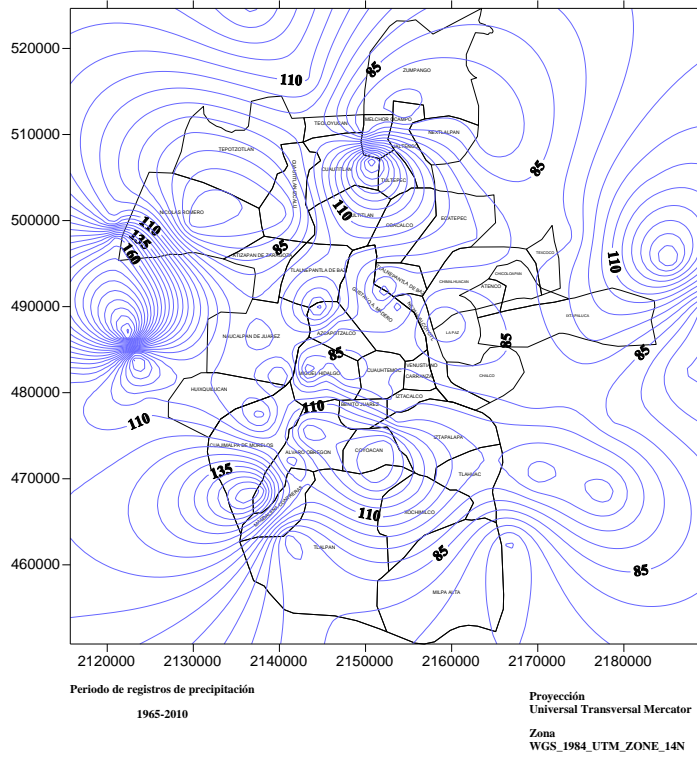


Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 40 minutos y periodo de retorno de 1000 años

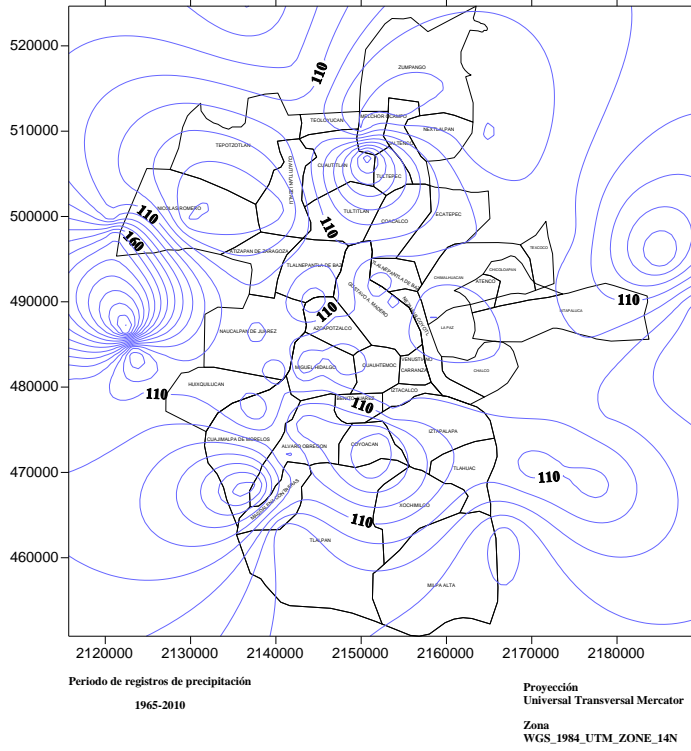


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 40 minutos y periodo de retorno de 5000 años

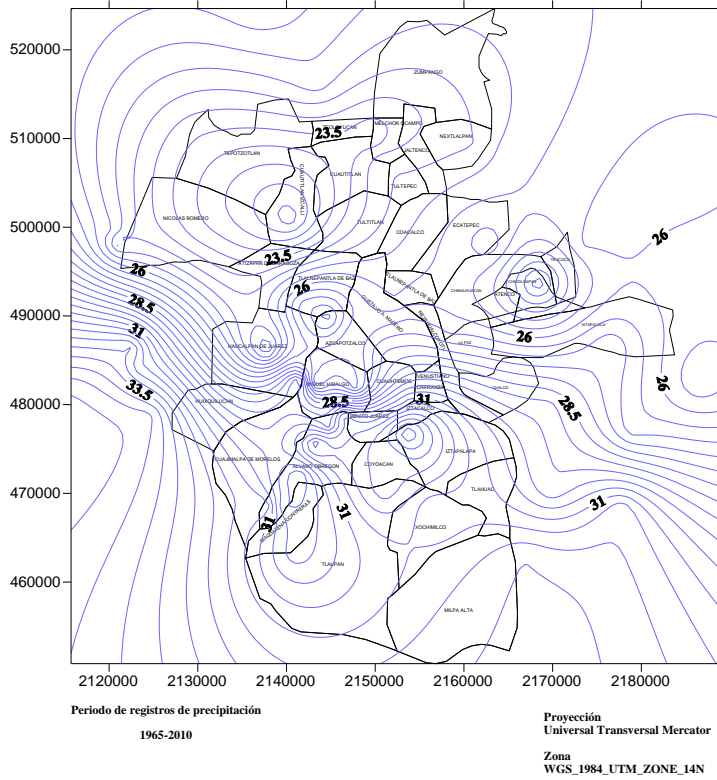


Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 40 minutos y periodo de retorno de 10000 años

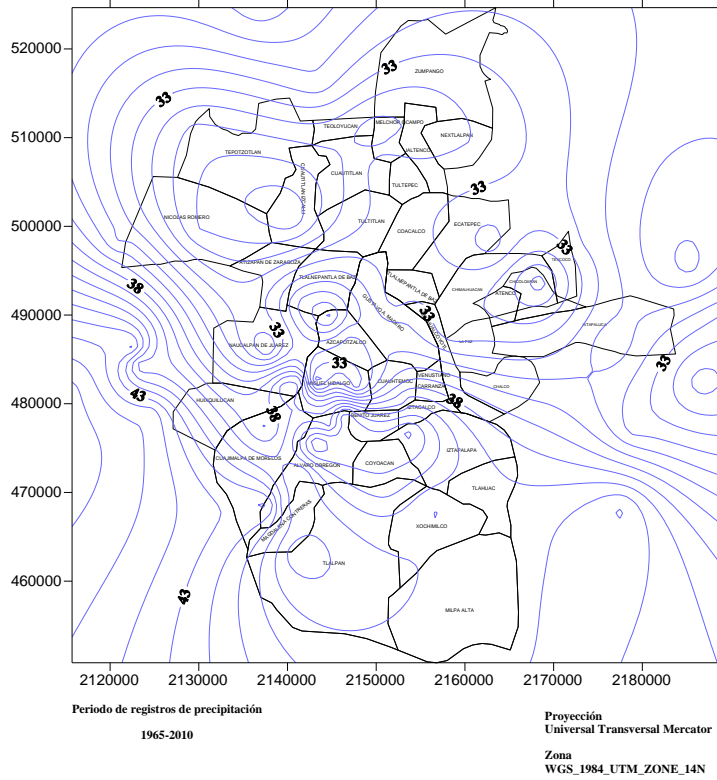


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 50 minutos y periodo de retorno de 2 años

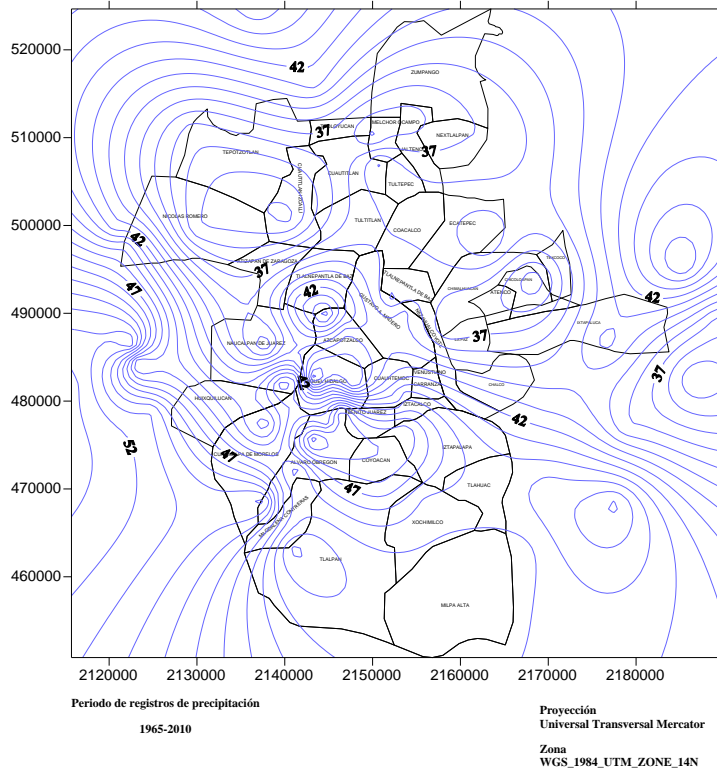


# Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 50 minutos y periodo de retorno de 5 años

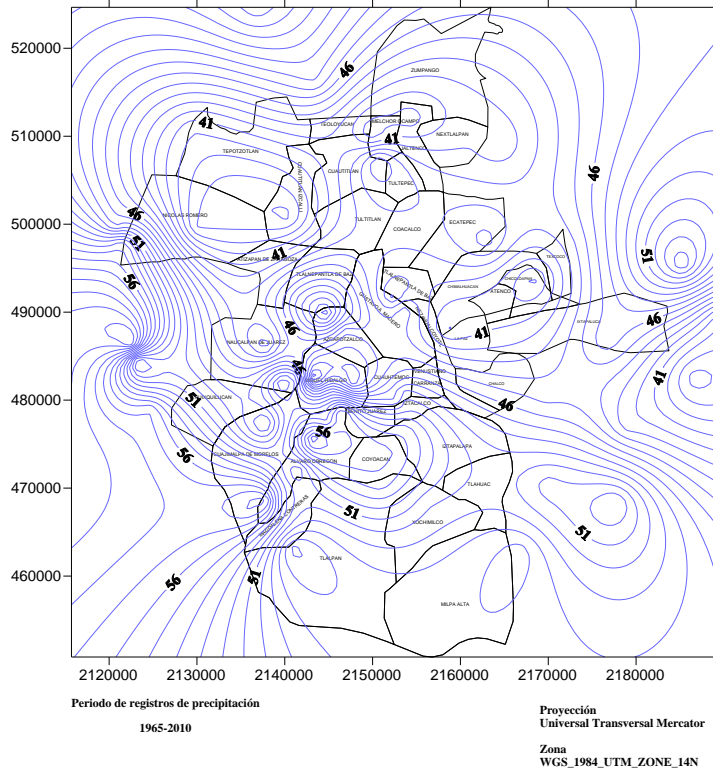


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 50 minutos y periodo de retorno de 10 años

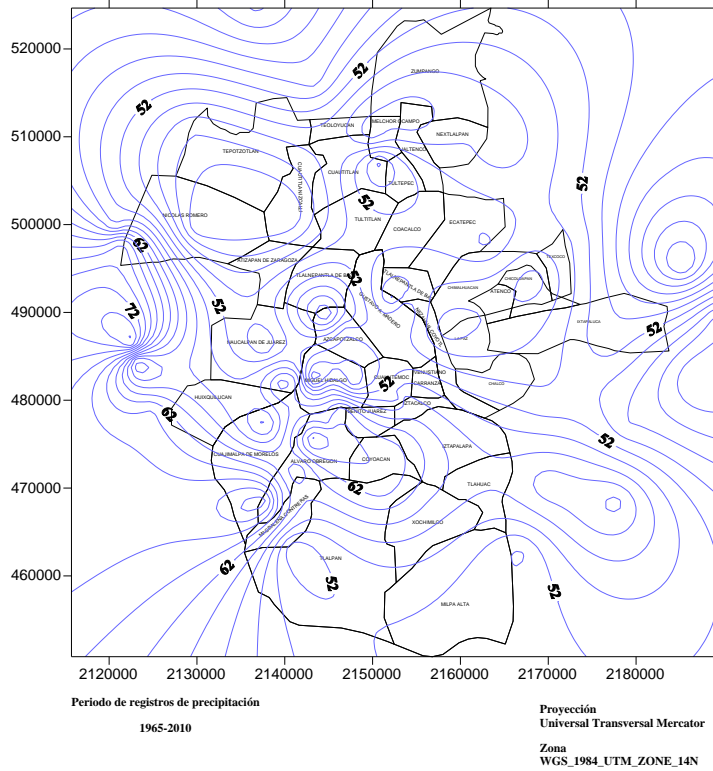


# Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 50 minutos y periodo de retorno de 20 años

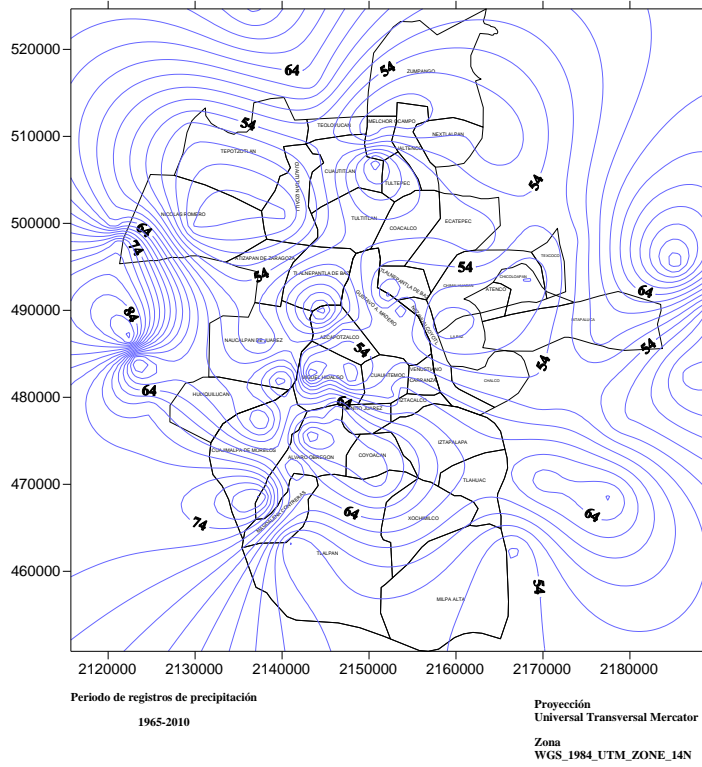


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 50 minutos y periodo de retorno de 50 años

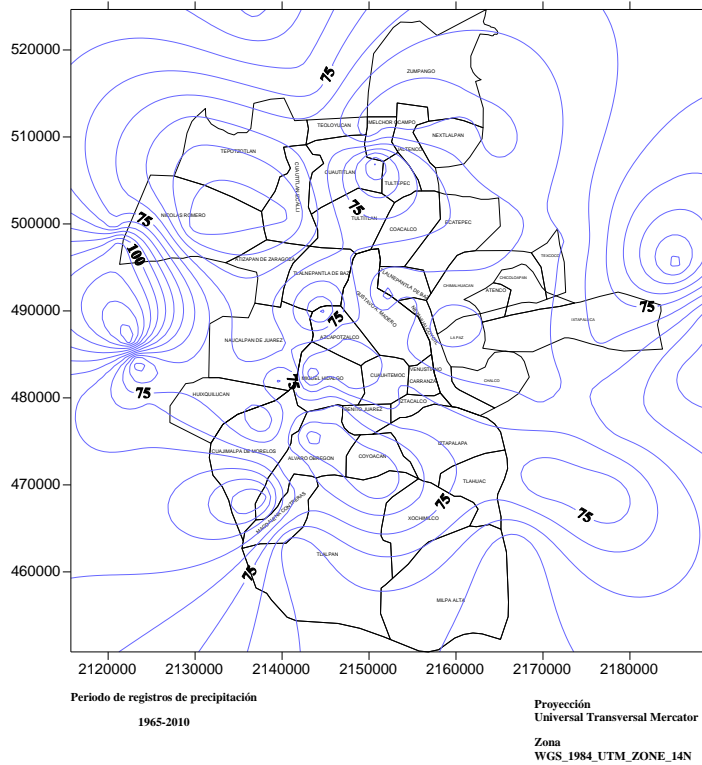


## Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 50 minutos y periodo de retorno de 100 años

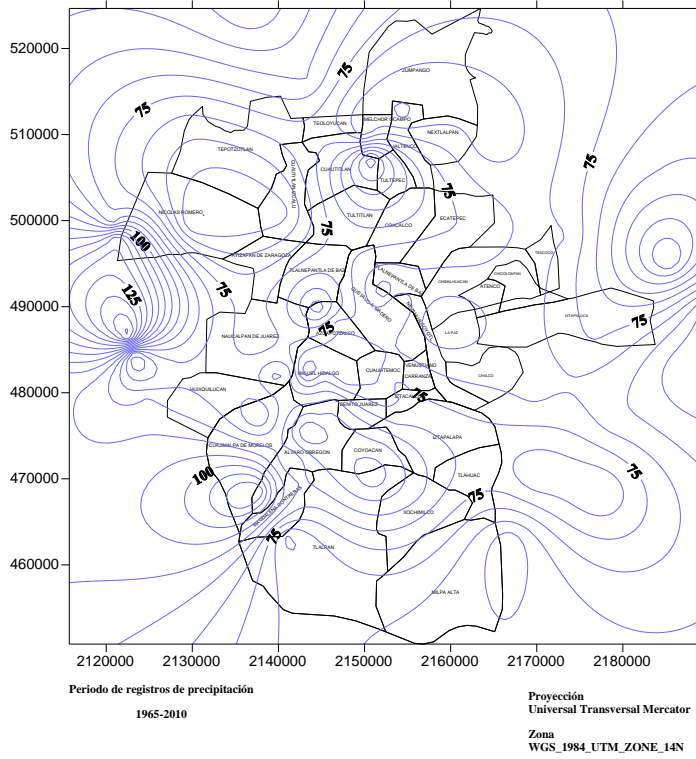


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 50 minutos y periodo de retorno de 500 años

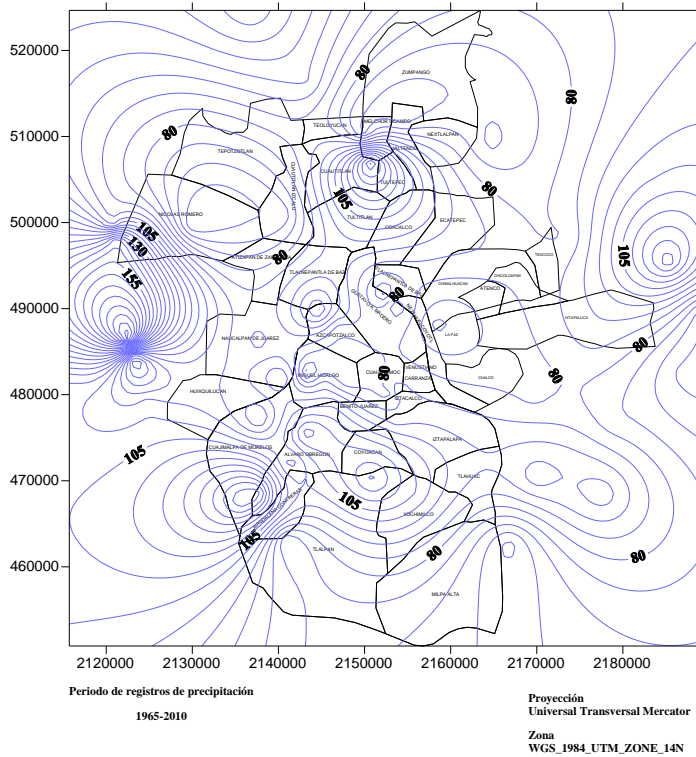


# Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 50 minutos y periodo de retorno de 1000 años

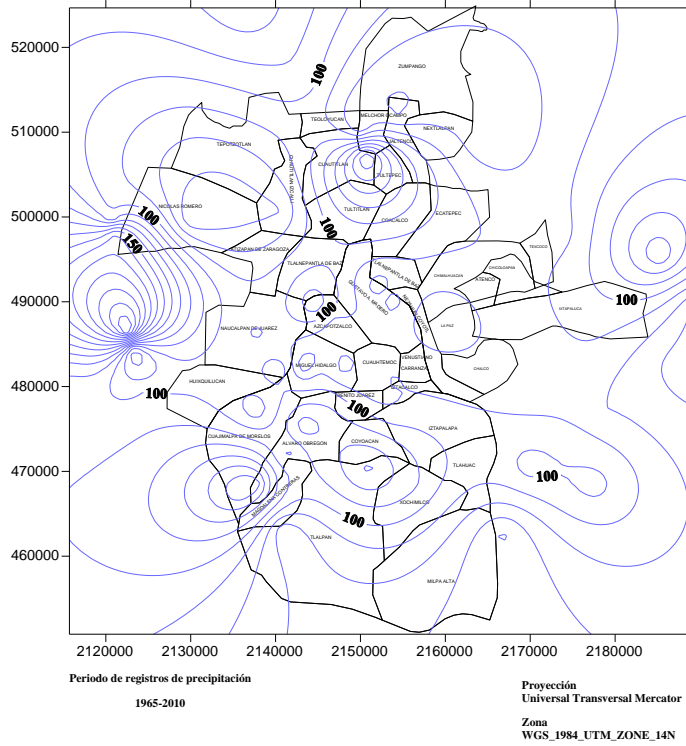


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 50 minutos y periodo de retorno de 5000 años

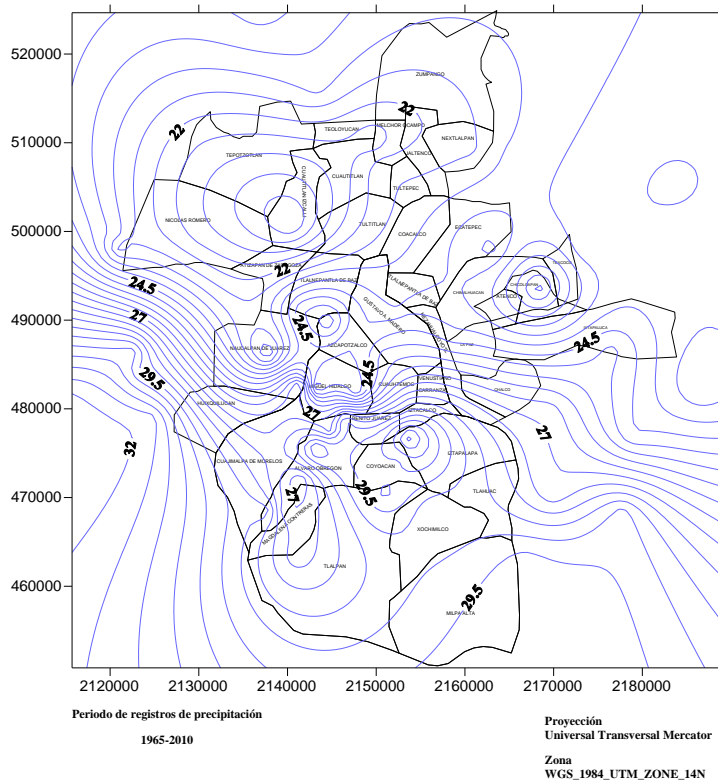


Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 50 minutos y periodo de retorno de 10 000 años

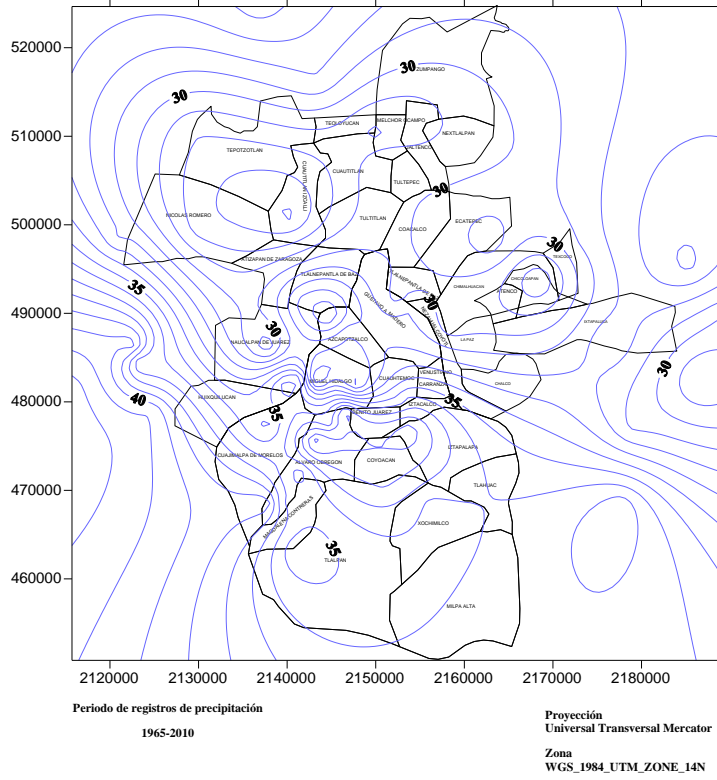


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 2 años

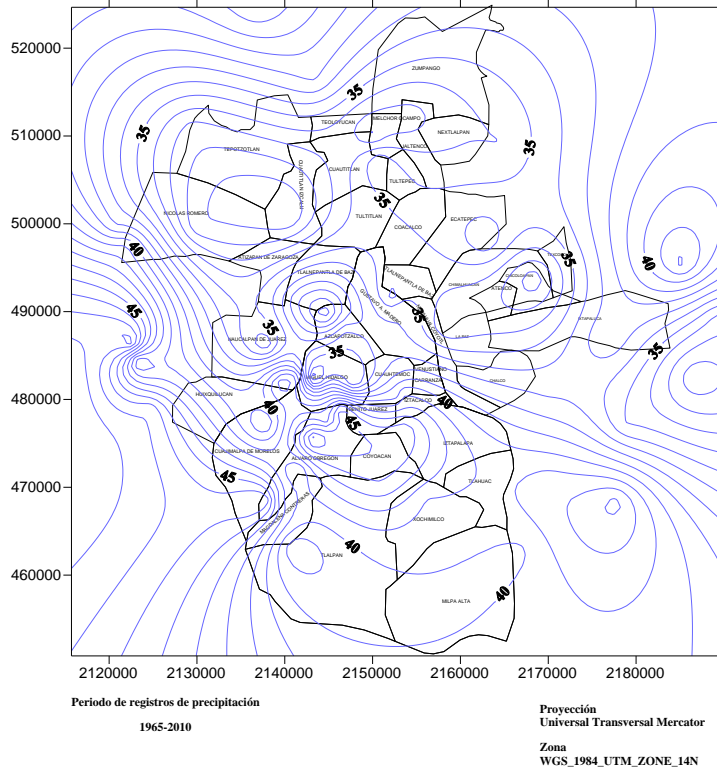


# Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 5 años



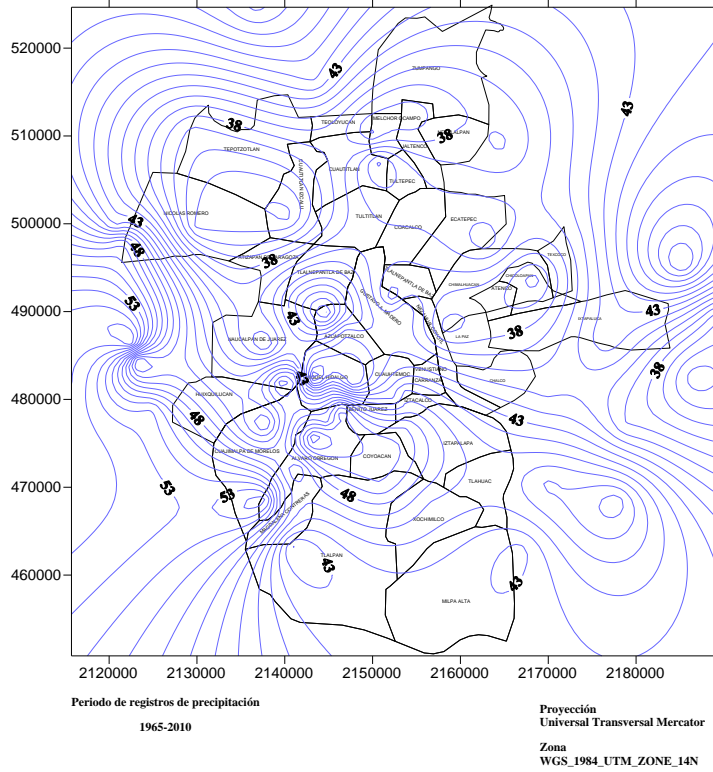
Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 10 años



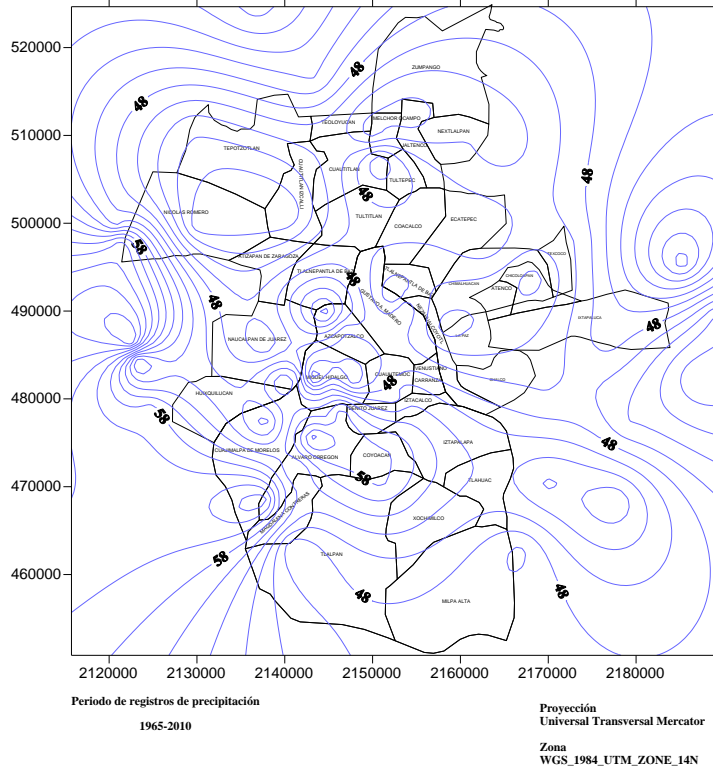


## Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 20 años

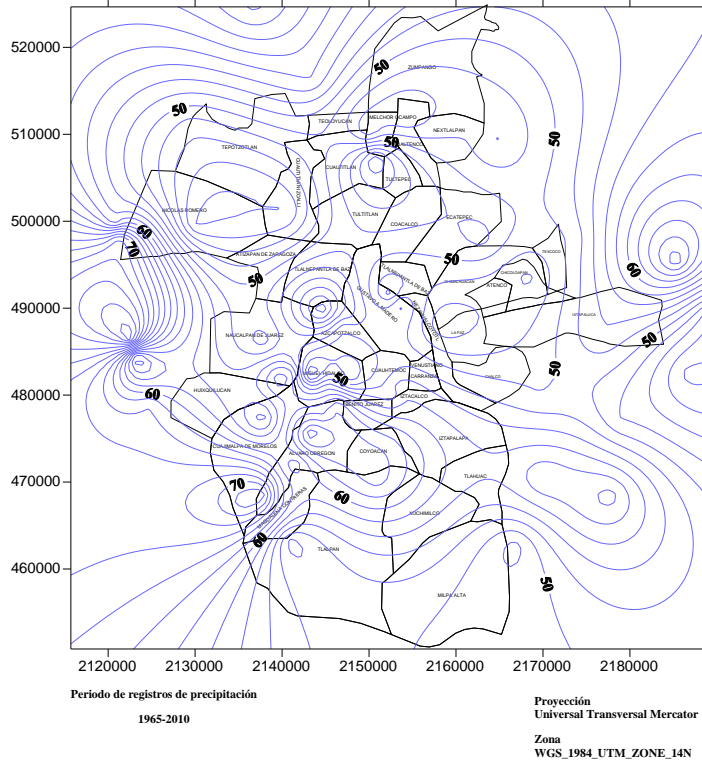


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 50 años

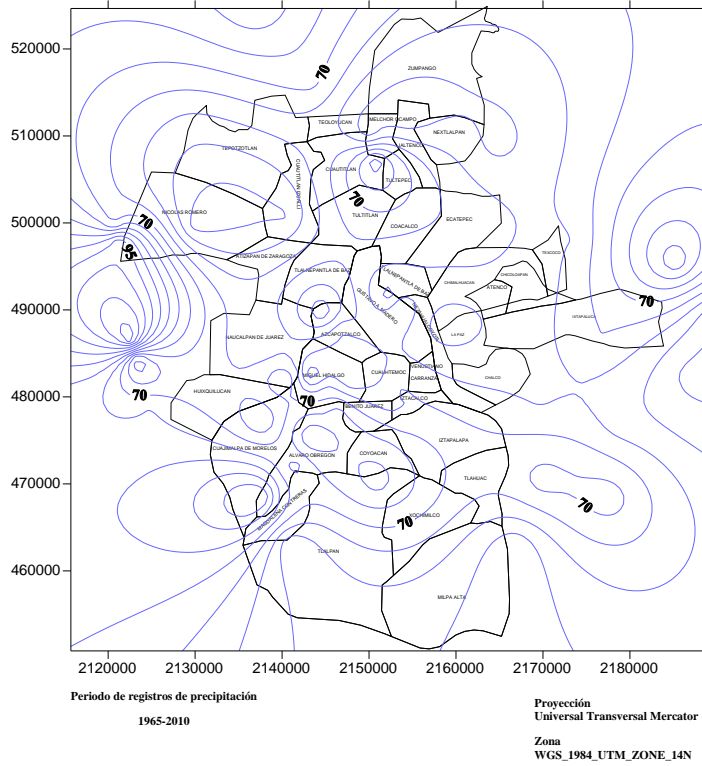


Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 100 años

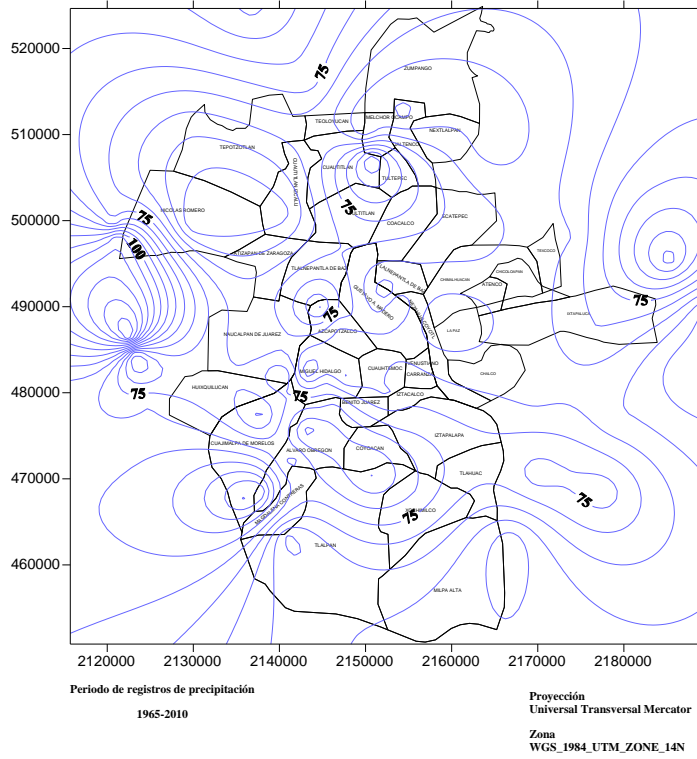


Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 500 años

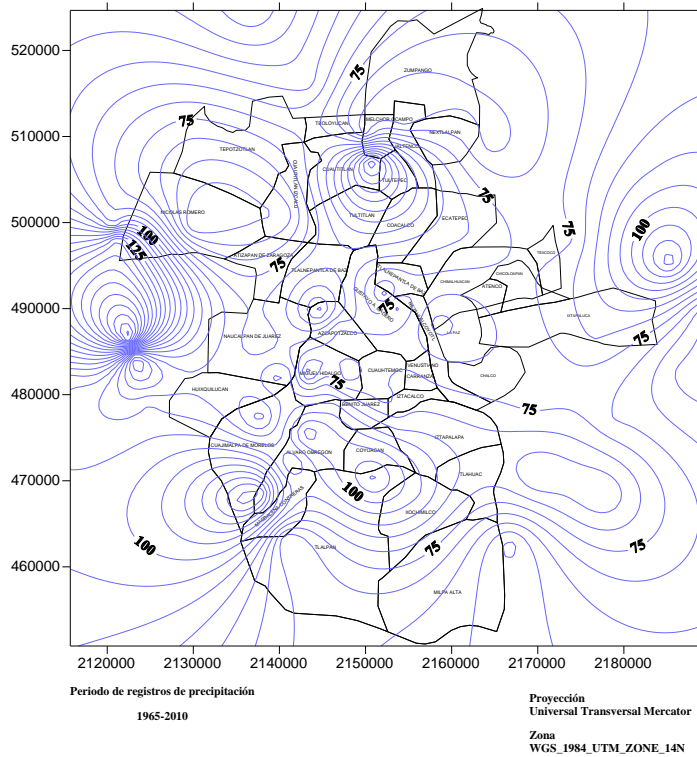


# Anexo C

Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 1000 años



Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 5000 años



Isoyetas de Intensidad de Precipitación (mm/hr) para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 10 000 años

