Nombre del proyecto	**Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la República Mexicana.**
Institución Ejecutora	Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)
Persona responsable del proyecto	Dr. Carlos Miguel Valdés González Director General del CENAPRED
Informe técnico final	

SUBCUENTA DE INVESTIGACIÓN PARA LA PREVENCIÓN DEL FOPREDEN
INFORME TÉCNICO FINAL

ÍNDICE

Actividad 1

1.1. Diagnóstico de las inundaciones en México 4

1.1.1 Clasificación de las inundaciones 5

1.1.2 Inundaciones derivadas de fallas en la infraestructura hidráulica 7

1.1.3 Medidas de mitigación del riesgo de inundaciones 8

1.2. Diagnóstico de las redes de medición 9

1.3.Identificación cualitativa de las regiones más vulnerables a fenómenos hidrometeorológicos .. 10

1.4. Conclusiones 11

Actividad 2

2.1. Introducción 11

2.2 Metodología 12

2.2.1 Relaciones intensidad – duración – periodo de retorno 13

2.3. Resultados 14

2.3.1 Captura y depuración de la información 14

2.3.2 Conformación de regiones homogéneas 14

2.3.3 Funciones de distribución de las muestras regionales 15

2.3.4 Estimación para duraciones de tormenta menores que 1 día 16

2.3.5 Estimación para duraciones mayores que un día 16

2.3.6 Factores de reducción por área (FRA) 17

2.4 Discusión 18

2.5 Conclusiones y recomendaciones 19

Actividad 3

3.1 Elaboración de modelos regionales para estimar la media de los gastos máximos anuales 21

3.1.1 Ecuaciones regionales de media del gasto máximo instantáneo en función de características fisiográficas. 21

Actividad 4

4.1 Estimación Regional 27

4.1.1 Introducción 27

4.1.1.1 Antecedentes 28

4.2 Objetivos 29

4.3 Metodología 30

4.3.1 Estimación características fisiográficas 30

4.3.2 Pruebas de homogeneidad e independencia 32

4.3.3 Pruebas de homogeneidad entre muestras 32

4.3.4 Funciones de distribución de probabilidad 32

4.3.5 Estimación regional de gastos máximos instantáneos de diseño 33

4.3.6 Recopilación y análisis de información 33

4.4 Pruebas de homogeneidad e independencia 34

4.5 Factores regionales de diseño 35

4.5.1 Resumen factores regionales 38

Nombre del proyecto	**Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la República Mexicana.**
Institución Ejecutora	Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)
Persona responsable del proyecto	Dr. Carlos Miguel Valdés González Director General del CENAPRED
Informe técnico final	

SUBCUENTA DE INVESTIGACIÓN PARA LA PREVENCIÓN DEL FOPREDEN
INFORME TÉCNICO FINAL

1. Resumen Ejecutivo del Informe Técnico Final (Metas y Actividades programadas, Metas y Actividades alcanzadas, Indicadores de cumplimiento en términos porcentuales, etc.)

Durante el periodo comprendido entre el 31 de agosto de 2016 al 10 de octubre de 2017, se brindó continuidad a las gestiones administrativas correspondientes para la ejecución del Proyecto.

DESCRIPCIÓN DE AVANCE PARA CADA UNO DE LOS RUBROS DEL PROGRAMA DE ACTIVIDADES PLAZOS Y COSTOS (PAPC)			
Nombre de la actividad	**Breve descripción de la actividad desarrollada durante el trimestre.**	ENTREGABLE	% AVANCE
1. Diagnóstico de las inundaciones en México, así como de la disponibilidad y confiabilidad de la información hidrómetrica y pluviométrica	**1.1. Diagnóstico de las inundaciones en México** Los fenómenos hidrometeorológicos tienen un efecto muy importante en las actividades socioeconómicas. En todo el mundo, y durante las distintas épocas del año, se presentan fenómenos extremos del clima como las inundaciones o las sequías. Las inundaciones se asocian con tormentas tropicales, huracanes, nevadas, lluvias torrenciales o avenidas súbitas. A nivel mundial, la frecuencia de las inundaciones está aumentando más	1.1 Diagnóstico de las inundaciones en México.	

rápidamente que la de cualquier otro desastre. México, por su situación geográfica, orografía e hidrología, está expuesto a la ocurrencia de diversos eventos extremos. En los principales ríos se producen crecientes que causan inundaciones de gran magnitud en las planicies y en las poblaciones situadas en las partes bajas. En las cuencas pequeñas, sobre todo en zonas urbanas, las crecientes son muy rápidas y la velocidad del agua puede causar incluso la muerte de personas.

1.1.1 Clasificación de las inundaciones

Por su origen, las inundaciones pueden clasificarse principalmente en inundaciones fluviales y en inundaciones locales; se pueden deber al almacenamiento de agua de lluvia en zonas con escaso drenaje, a mareas de tormenta o mareas de viento, o bien al desbordamiento de ríos y arroyos (Maza y Franco, 1997). Las inundaciones fluviales se presentan cuando la capacidad de un río es rebasada y el agua se desborda inundando los terrenos aledaños; las inundaciones locales se presentan cuando las inundaciones afectan a un barrio, una localidad o alguna comunidad.

	En México, de acuerdo con el fenómeno meteorológico que las origina, las principales inundaciones corresponden a las precipitaciones generadas por huracanes y ondas tropicales, principalmente en el verano, mientras que las tormentas de invierno ocurren en su mayoría en el noroeste de México. Por otro lado, el crecimiento acelerado de la urbanización en el país hace que los problemas de inundación en zonas urbanas sean cada vez mayores. Las inundaciones en estas zonas pueden clasificarse en (Maza y Franco, 1997): a) Problemas derivados de lluvias intensas, aunque de corta duración, que producen flujos violentos, acompañados de lodo, piedras y escombro, en las barrancas del poniente de la Ciudad. Cuando las casas están construidas en los taludes de las barrancas o bien obstruyen el cauce, estas lluvias ponen en riesgo las vidas de quienes las habitan. b) Los encharcamientos son probablemente los más sensibles para la población, ya que ocurren con frecuencia y afectan de manera directa la vida productiva cotidiana. Se producen sobre todo en la parte		

	baja de las barrancas del poniente de la ciudad de México, aproximadamente entre las avenidas Periférico e Insurgentes, debido a que la pendiente natural del terreno se reduce en forma notable. También son comunes en los pasos a desnivel de las vialidades. c) Las inundaciones. Generalmente son provocadas por tormentas de larga duración que cubren áreas extensas de las cuencas. **1.1.2 Inundaciones derivadas de fallas en la infraestructura hidráulica** Adicionalmente hay que tomar muy en cuenta las inundaciones potencialmente más desastrosas, asociadas a la posibilidad de falla de algunas presas. Al respecto, la CONAGUA ha identificado 115 presas en peligro, entre las cuales destacan por su magnitud la de Malpaso, la de El Infiernillo y la de Venustiano Carranza. En el caso de Malpaso, afortunadamente ya se reconstruyeron los dos vertedores de manera que se garantiza la seguridad hidrológica de la presa; sin embargo, en los otros dos casos aunque se han hecho estudios para el diseño de las modificaciones		

	necesarias, no se han hecho dichas modificaciones. Otras inundaciones que se pueden presentar en infraestructura hidráulica son por fallas en bordos de protección contra inundaciones, rebase de capacidad de conducción de colectores, falla en la red de agua potable que da origen a fugas de agua visibles. **1.1.3 Medidas de mitigación del riesgo de inundaciones** Es muy común que nosotros mismos incrementemos el riesgo de inundaciones debido a que alteramos las condiciones naturales de las cuencas (por la urbanización, la deforestación, etc.) o que nos pongamos en peligro debido a que hacemos desarrollos urbanos en las zonas que naturalmente se inundan (un ejemplo es el caso de Motozintla, en Chiapas); es necesario por ello potenciar las medidas que permitan reducir el riesgo de inundaciones; algunas de ellas se comentan a continuación. **Medidas estructurales**. Están constituidas por obras que permiten regular las crecientes		

	(presas de almacenamiento) o drenarlas en forma más eficiente (desazolve, rectificación de cauces, etc.) o proteger sitios específicos (bordos). **Medidas no estructurales**. Están basadas en estudios que permitan pronosticar con anticipación las crecientes y permitan, con ayuda de una buena organización) reducir los daños dando la información oportuna a la población. **1.2. Diagnóstico de las redes de medición** Las mediciones de los escurrimientos pueden analizarse estadísticamente para establecer las probabilidades de que las crecientes alcancen a superen determinada magnitud. Para ello se requieren registros confiables, con la mayor longitud (número de años de registro) posible. Se establecen entonces estaciones hidrométricas, cada una asociada a una cuenca, que deben contar al menos con un registro continuo de los niveles en el cauce y con mediciones periódicas que permitan estimar la relación entre dichos niveles y los gastos que conduce el río.		

	Se requiere entonces de la medición de la lluvia a lo largo de todo el país. Estas mediciones (junto con las de las características fisiográficas de las cuencas) ayudan a estimar las características estadísticas de los escurrimientos en todos aquellos sitios en los que no se cuenta con una estación hidrométrica. Adicionalmente, tienen la muy importante función de poder estimar las variaciones temporales y espaciales de la lluvia, a partir de las cuales se pueda hacer un pronóstico adecuado de los escurrimientos. **1.3. Identificación cualitativa de las regiones más vulnerables a fenómenos hidrometeorológicos** Utilizando el Índice Nacional de inundaciones estimado por Agroasemex para 25 años de periodo de retorno, se establecen las zonas inundables de México. El área de zonas inundables a nivel nacional se estima en 161,510 km2, es decir del 8.2 % del territorio continental.		

	1.4. Conclusiones El diagnóstico que se presenta en la primera actividad muestra claramente la importancia de avanzar en el estudio de las inundaciones en México. En particular, mejorar la estimación de los riesgos por inundaciones en todo el país, particularmente en lo que se refiere a la estimación del peligro por inundaciones; es decir que la posibilidad de estimar el caudal máximo asociado a distintos periodos de retorno (objetivo principal de este trabajo) es un insumo indispensable para la estimación del riesgo.		
2. Análisis estadístico regional de las precipitaciones máximas anuales registradas en más de 2000 estaciones pluviométricas	**2.1. Introducción** En la República Mexicana existe información de lluvias diarias medidas en más de 5000 estaciones; el análisis de estos registros muestra que en muchas estaciones los datos disponibles son escasos, de manera que los análisis estadísticos que se realicen individualmente no resultan confiables (de hecho la CONAGUA utiliza solamente 1064 estaciones para el cálculo de las normales)	2.1 Isoyetas máximas anuales para diferentes periodos de retorno y mapa de regiones homogéneas.	

(CONAGUA, 2015). En el caso de los registros pluviográficos la situación es peor, tanto por lo limitado del número de estaciones como por la calidad y accesibilidad de esa información.

Se han hecho varios intentos para estimar lluvias asociadas a distintas duraciones y periodos de retorno (SCT, 1990; Conde et al., 2014), pero en ellas se hace un análisis individual, estación por estación, lo que frecuentemente da lugar a inconsistencias en los resultados.

2.2 Metodología

Se analizaron los datos de un total de 2380 estaciones, las cuales cumplieron con los siguientes requisitos:

- Estaciones operando por al menos 20 años.
- Estaciones que efectivamente contaran con información completa para los 20 años.
- En el caso de las zonas centro y sur del país se incluyeron estaciones en las que los

datos faltantes corresponden a la temporada de estiaje. En el noroeste, por la presencia de lluvias intensas en época invernal, sólo se incluyeron estaciones con registro completo.

Para cada una de las estaciones se obtuvieron los valores diarios máximos anuales y se calculó su media, desviación estándar, coeficiente de variación, valor máximo, y valor mínimo.

Con los valores depurados y tomando en cuenta tanto los coeficientes de variación como la conformación topográfica (particularmente en relación con la incidencia de fenómenos meteorológicos extremos como los huracanes o las lluvias extremas de invierno), se definieron regiones homogéneas desde el punto de vista de las precipitaciones diarias máximas anuales.

2.2.1 Relaciones intensidad – duración – periodo de retorno

La estimación de gastos de diseño para cuencas pequeñas o medianas requiere conocer las precipitaciones medias asociadas a duraciones menores que un día, es decir,

obtener las curvas intensidad-duración-período de retorno.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las diferentes estaciones analizadas Baeza dividió la República en tres regiones, dependiendo del sitio o la cuenca que se desea estudiar se recomienda usar los valores del factor R.

2.3. Resultados

2.3.1 Captura y depuración de la información

Como se indicó en la metodología, se trabajó únicamente con estaciones con registro de más de 20 años.

2.3.2 Conformación de regiones homogéneas

Considerando por un lado los coeficientes de variación de los valores máximos anuales, pero por otro la cercanía entre los sitios de medición, las características del relieve en el entorno de dichos sitios y el tipo de fenómeno meteorológico que provoca las precipitaciones extremas, se buscó un compromiso entre definir regiones con muchas estaciones, de manera que la muestra que se obtiene al suponer que provienen de la misma población

resulte muy grande y, por lo tanto, las extrapolaciones a periodos de retorno grandes más confiables, con lo que se tendría más confianza en la aceptación de la hipótesis de homogeneidad. De esta manera se definieron en total las 66 regiones.

2.3.3 Funciones de distribución de las muestras regionales

Una vez definidas las 66 regiones, en cada una de ellas los valores máximos anuales de precipitación diaria de cada estación se normalizaron dividiéndolos entre su media, de tal manera que, al agruparlos, se obtuvieron muestras con un gran número de elementos para cada una de las 66 regiones. A cada una de las 66 muestras ampliadas se les ajustó una función de distribución de probabilidades (se consideraron sólo dos alternativas; la función Gumbel o la doble Gumbel) y se estimaron los valores asociados a distintos periodos de retorno.

De esta forma, con los mapas de precipitaciones medias se obtiene el valor correspondiente para cualquier sitio de la República, y multiplicándolo por los factores

	por periodo de retorno correspondientes a la región en la que se encuentre el sitio de estudio, se estima la precipitación diaria asociada a cualquier periodo de retorno. **2.3.4 Estimación para duraciones de tormenta menores que 1 día** Para estimar precipitaciones de diseño asociadas a duraciones menores que un día, se recomienda utilizar la teoría de Chen, los resultados se concentran en una tabla, en la que se muestran los valores obtenidos para duraciones entre 10 minutos y 24 h y distintos valores del factor R. **2.3.5 Estimación para duraciones mayores que un día** Con alguna frecuencia, cuando los estudios se realizan para cuencas grandes o para los ingresos a presas con capacidad de regulación significativa, se requiere contar con tormentas de diseño de varios días. Por ello, se realizó el análisis de los datos históricos de las precipitaciones medias máximas anuales asociadas a duraciones de 2, 3,…. 30 días consecutivos.		

En resumen, los resultados obtenidos permiten obtener, para cualquier sitio de la República, valores de precipitación media asociados a distintos periodos de retorno, para duraciones entre 15 minutos y 30 días.

2.3.6 Factores de reducción por área (FRA)

Para la aplicación de modelos lluvia-escurrimiento es necesario conocer la tormenta de diseño presentada en la cuenca, asociada a los diferentes periodos de retorno. En estos casos la precipitación asociada a un periodo de retorno de 100 años, no correspondería a la calculada como el promedio de las precipitaciones puntuales para el mismo periodo de retorno, en cuencas grandes, debido a la extensión territorial de la cuenca los eventos no se presentan en forma simultánea en ésta, es decir, no es frecuente que se presenten eventos hidrometeorológicos simultáneos en toda la cuenca, y menos probable es que en un evento dado, las precipitaciones en los distintos puntos de la cuenca correspondan a periodos de retorno similares.

	El promedio areal de las precipitaciones correspondientes a un periodo de retorno de 100 años tiende a sobreestimar la precipitación de diseño. Por ello, se recomienda aplicar un factor de reducción areal FRA al promedio anterior. El FRA es un coeficiente que sirve para convertir precipitaciones puntuales con una duración y un período de retorno a precipitaciones areales de la misma duración y período de retorno, de una región específica. **2.4 Discusión** Los resultados obtenidos permiten estimar de manera robusta y espacialmente consistente, lluvias para cualquier sitio de la república, cualquier periodo de retorno y cualquier duración. Con esos resultados se pueden construir también hietogramas de diseño. Para comprobar el comportamiento estadísticamente homogéneo de los datos de precipitaciones máximas en una región, se usa tradicionalmente la prueba de Fisher, mediante la que se comparan los cocientes de las varianzas correspondientes a los distintos		

	sitios con los límites de la función de distribución de Fisher para una probabilidad de ser superados de, por ejemplo, el 5%. Adicionalmente, considerando que se trata de eventos extremos cuya distribución de probabilidades no es Normal, se realizaron pruebas mediante la comparación entre los coeficientes de variación de las muestras y los que se obtienen al generar números aleatorios con la distribución de probabilidades ajustada a las muestras regionales. Para profundizar en el análisis, en las regiones donde el cociente fue mayor a 10, se realizaron pruebas mediante la comparación entre los coeficientes de variación de las muestras y los que se obtienen al generar números aleatorios con la distribución de probabilidades ajustada a las muestras regionales. Para estas regiones la distribución que mejor se ajusto fue la distribución Doble Gumbel y fueron las que se usaron para generar las series sintéticas. **2.5 Conclusiones y recomendaciones** El análisis de los registros de las 2380 estaciones que cumplieron con las condiciones		

	planteadas permitió llegar a resultados con los que se pueden obtener, de manera confiable, los valores de precipitación asociados a cualquier periodo de retorno tanto para duraciones menores que un día como para duraciones entre uno y treinta días, para cualquier sitio de la República Mexicana. El método utilizado se basa en obtener un mapa con los valores de las medias de las precipitaciones máximas anuales, medias que se consideran muy confiables porque en todos los casos fueron calculadas con al menos 20 años de registro. Para obtener los valores correspondientes a distintos periodos de retorno, los valores de las medias se multiplican por factores regionales obtenidos para 66 regiones homogéneas. La delimitación de las 66 regiones consideradas como homogéneas en relación con las precipitaciones máximas anuales es también central en el método, dado que a partir de ella se pudieron obtener factores regionales que multiplicados por las medias conducen a una estimación muy robusta de las		

3-. Elaboración de modelos regionales para estimar la media de los gastos máximos anuales	precipitaciones diarias asociadas a cualquier periodo de retorno. En el caso de las lluvias asociadas a duraciones mayores que un día (que se requieren para el análisis de cuencas grandes) se lograron obtener, para todas las regiones, factores que las relacionan las lluvias de diferentes duraciones con las de un día, de manera que pueden obtenerse hietogramas de diseño para cuencas grandes. Los factores de reducción por área FRA, se emplean para convertir precipitaciones puntuales en areales, y es una forma práctica de considerar la no simultaneidad de las lluvias máximas en las estaciones dentro del área.3.1 Elaboración de modelos regionales para estimar la media de los gastos máximos anuales **3.1.1 Ecuaciones regionales de media del gasto máximo instantáneo en función de características fisiográficas.** En este capítulo se determinaron ecuaciones potenciales que relacionan la media de los gastos máximos instantáneos de cada cuenca,	3.1 Modelos de ecuaciones regionales para cada Región Hidrológica	

en función de las características fisiográficas y de precipitación de sus cuencas.	con indicadores de las características fisiográficas y de precipitación correspondientes. La media de los máximos anuales se considera un parámetro estable, y las características fisiográficas son indicadores (área, altura de precipitación, número de curva, pendiente, tiempo de concentración etc.) del proceso de tránsito de la lluvia efectiva hasta la salida de la cuenca, y por ello, de la forma de los hidrogramas. Se seleccionaron distintas características fisiográficas y la precipitación media, de diferentes estaciones de las Regiones Hidrológicas, o grupos de regiones, como variables independientes para estimar ecuaciones regionales de la media de los gastos máximos instantáneos como variable dependiente. Para cada Región Hidrológica se muestra la localización de las estaciones y sus cuencas respectivas. Como primera propuesta se realizaron diferentes combinaciones para una, dos o tres variables, proponiéndose funciones potenciales cuyos parámetros fueron determinados con el algoritmo de		

	optimización GRG non linear de la aplicación Solver© de Excel© y el algoritmo genético simple (SGA) codificado en Matlab. Se obtuvieron las ecuaciones con mayor coeficiente de determinación, así como el método utilizado; en cada uno de los casos se consideró que existiera un sentido lógico en los exponentes. Para cada uno de los modelos mencionados anteriormente, se realizó la revisión del porcentaje de diferencia respecto de los gastos máximos instantáneos registrados. Los porcentajes de diferencia se indican en Tablas donde además se observa la representación gráfica de los datos medidos y calculados. En el caso de las lluvias extremas, se analizaron las precipitaciones diarias máximas anuales registradas en 2380 estaciones, las cuales se agrupan en 65 regiones diferenciadas fundamentalmente por su situación geográfica, su relieve y su exposición a la incidencia de los grandes fenómenos meteorológicos. Al modular los valores máximos registrados en cada estación, hidrométrica o pluviométrica,		

	dividiéndolo entre su respectiva media, se forman muestras cuya media es 1.0 y cuya desviación estándar es igual al coeficiente de variación (CV) de la muestra original, de manera que cuando los CV son "similares" puede suponerse que las muestras moduladas provienen de la misma población. Bajo esa hipótesis se construyeron una muestra ampliada de tantos datos como la suma de los registrados en cada una de las estaciones que forman la región, a cada muestra ampliada se le ajustó una función de distribución de probabilidad con la que se obtienen los valores asociados a distintos periodos de retorno. Para probar la hipótesis de homogeneidad se generaron 10 muestras sintéticas de valores aleatorios con la función de distribución encontrada, cada una de las muestras sintéticas contiene el mismo número de datos que las muestras originales de cada estación, de tal manera que si el CV de alguna(s) de las muestras históricas se sale del rango de los CV de las muestras sintéticas, se rechaza la hipótesis de que pertenece(n) a la misma región. En los casos en que esto ocurrió se		

	revisaron los datos de la estación recurriendo a las mediciones originales de manera que o se encontraba un error en los valores que aparecen en la base de datos o se modificaba la conformación de la región y se repetía el proceso. De esta forma, con un plano que contiene las isoyetas de las medias de las lluvias diarias máximas anuales y los factores por periodo de retorno obtenidos para las 62 distintas regiones, se puede estimar de manera confiable la precipitación asociada a distintos periodos de retorno en cualquier sitio del país. En el caso de los escurrimientos, las variables que se consideraron de interés fueron los gastos máximos anuales registrados en alrededor de 300 estaciones hidrométricas (EH) asociadas a cuencas sin regulaciones o derivaciones significativas. A diferencia del caso de las lluvias, el análisis para conformar cuencas homogéneas se basa en las regiones hidrológicas definidas por la CONAGUA, y toma también en cuenta el relieve de toda la cuenca de aportación. Se definieron así 33 grupos de EH, para cada uno de los cuales se		

	realizó el ajuste de la función de distribución de probabilidades y se obtuvieron factores que permiten pasar de la media de los gastos máximos anuales al gasto asociado a distintos periodos de retorno. Dado que la media de los gastos máximos anuales no es un valor que pueda interpolarse espacialmente como en el caso de las lluvias, se requirió estimarlo en función de indicadores de las características fisiográficas y de precipitación correspondientes a cada cuenca. La media de los máximos anuales se considera un parámetro estable, y las características fisiográficas son indicadores del proceso de tránsito de la lluvia efectiva hasta la salida de la cuenca, y por ello, de la forma de los hidrogramas. Se formaron entonces 34 grupos de cuencas con características similares, para cada uno de los cuales se estimaron ecuaciones potenciales.		

4. Estimación Regional	**4.1 Estimación Regional** **4.1.1 Introducción** La estimación de la función de distribución de los gastos máximos anuales para cualquier sitio de un cauce, es de gran importancia, debido a que con ello es posible diseñar y revisar diversas obras hidráulicas. La estimación de valores correctos influye directamente en todo un proyecto, debido a la dificultad y lo costoso de medir el escurrimiento en muchas cuencas en la que no existen datos. Para efectuar la regionalización de escurrimientos, se emplearon en principio la información de 310 estaciones hidrométricas, cuyos escurrimientos no se encuentren regulados por obras hidráulicas importantes localizadas aguas arriba. En este estudio se actualizaron los datos de los gastos máximos anuales de estaciones hidrométricas pertenecientes a las 37 regiones hidrológicas consideradas por la Comisión Nacional del Agua para su estudio; se realizó una depuración de los gastos máximos anuales registrados haciendo una revisión de los	Ajustes regionales, factores regionales, series sintéticas, mapas con ubicación, coeficiente de variación (CV) y número de cada estación analizada	

	registros de gastos medios y de los gastos máximos reportados entre estaciones cercanas así como de eventos hidrometeorológicos importantes registrados en cada zona; se obtuvieron áreas de la cuenca de algunas hidrométricas que no se reportaban en los boletines originales; se recalcularon las características fisiográficas con un modelo digital de elevaciones con mayor resolución y se utilizó información pluviométrica actualizada. **4.1.1.1 Antecedentes** En varias partes del mundo se han llevado a cabo estudios de regionalización que utilizan diversas técnicas para agrupar cuencas, tomando en cuenta datos conocidos (características fisiográficas) o fáciles de medir, datos de uso de suelo y datos climatológicos; se han propuesto modificaciones a las ecuaciones de estimación del gasto a partir de características fisiográficas del Flood Studies Report, se ha realizado también identificación de cuencas regionalmente homogéneas en Suecia y Australia, respectivamente a partir del análisis de los		

escurrimientos, usando análisis de componentes principales y regresiones no lineales múltiples.

En México se realizaron estudios de regionalización de escurrimientos máximos en 1975, dentro del Plan Nacional Hidráulico. En el año 2014 se realizó la tesis "Nuevos modelos para el cálculo de los escurrimientos en la República Mexicana" en donde se plantean dos metodologías (algoritmos genéticos y regresión lineal usando los logaritmos naturales de los datos) para relacionar los variables conocidas de un grupo de cuencas, con la media del gasto máximo instantáneo correspondiente, con ayuda de ecuaciones de tipo ecuación potencial.

4.2 Objetivos

Analizar gastos máximos instantáneos anuales de estaciones hidrométricas agrupadas considerando el coeficiente de variación y, con la técnica de estaciones año, obtener funciones de distribución regionales con las que se calculan factores de diseño para distintos periodos de retorno.

Obtener ecuaciones que relacionan a la media de los gastos máximos instantáneos con características fisiográficas sencillas de medir y datos de precipitación media.

4.3 Metodología

4.3.1 Estimación características fisiográficas

Hidrológicamente, la cuenca funciona como un gran colector que recibe las precipitaciones y las transforma en escurrimientos. Esta acción es función de una gran cantidad de parámetros geomorfológicos que influyen en el comportamiento hidrológico de la cuenca.

La cuenca está delimitada por el parteaguas, que es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor elevación topográfica y las separa de las áreas vecinas. Las características estimadas para este estudio fueron: Área drenada (A), Longitud cauce principal (L), Pendiente media del cauce principal (SCP) ,Tiempo de concentración (Tc), Número de curva (NC), Espesor del suelo (S en cm),

	Precipitación media de la cuenca (hp) y la Pendiente media de la cuenca (Smc). Para la delimitación de las cuencas se usó el modelo digital de elevaciones de la NASA (ASTER Global Digital Elevation Model V002) de 30x30m de resolución. Se obtuvo el área drenada, la longitud y pendiente del cauce principal, la pendiente media de la cuenca, el tiempo de concentración, el número de curva y el espesor del suelo para cada cuenca. El número de curva y el espesor del suelo se obtuvieron con los mapas de uso (Uso de suelo y vegetación, INEGI 2013) y tipo (Conjunto de datos vectoriales Perfiles de suelos, INEGI 2014) del suelo. A partir del mapa de distribución de las medias de las precipitaciones diarias máximas anuales en la República Mexicana se obtuvo la precipitación media de cada una de las cuencas. Se verificó la localización de las estaciones hidrométricas de acuerdo con el área reportada en los boletines.		

	4.3.2 Pruebas de homogeneidad e independencia Se describen las pruebas de uso más común para verificar la hipótesis de homogeneidad como la Prueba estadística de Helmert, la Prueba t de Student, la Prueba estadística de Cramer, las Pruebas de independencia de eventos. **4.3.3 Pruebas de homogeneidad entre muestras** De igual forma se describieron las principales pruebas de homogeneidad como la Prueba de Fisher y la Prueba de homogeneidad mediante la generación de registros sintéticos. **4.3.4 Funciones de distribución de probabilidad** Para este trabajo se utilizaron las funciones Gumbel y doble Gumbel, cuyas principales características se describen de forma detallada.		

4.3.5 Estimación regional de gastos máximos instantáneos de diseño

El procedimiento propuesto para la estimación de gastos máximos de diseño consta de dos partes fundamentales:

La primera del cálculo de factores de diseño regionales y la segunda de la determinación de ecuaciones para obtener la media de los gastos máximos instantáneos en función de características fisiográficas y de la precipitación de la cuenca correspondiente.

4.3.6 Recopilación y análisis de información

Para todas las estaciones elegidas se realizó una depuración de datos, debido a que la información con la que se cuenta de cada una de las diferentes regiones hidrológicas, puede presentar inconsistencias. La primera actividad fue revisar cada uno de los datos de escurrimiento, obtenidos de la base de datos BANDAS de CONAGUA, para destacar valores extraños; que pueden ser valores demasiado grandes o pequeños. Teniendo estos, se procedió, en el caso de los valores

	altos, a justificar el porqué de su valor; se revisó el historial de eventos extraordinarios, es decir algún fenómeno hidrometeorológico (tormenta tropical, huracán), y se verificó si alguno de estos eventos coincidió con la fecha en que se presentó el escurrimiento, si esto es correcto, se justifica que el valor estuvo influenciado por este evento y por tanto sí se presentaron escurrimientos grandes. Para los valores pequeños, se hizo una comparación con la media de los valores de la estación y si son demasiados pequeños respecto a la media, simplemente se eliminan. Adicionalmente, se utilizaron las pruebas de independencia y homogeneidad para verificar la pertinencia de la serie obtenida o, en su caso la eliminación de valores extraños adicionales o incluso de la serie completa. **4.4 Pruebas de homogeneidad e independencia** Se hicieron pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia de las series de tiempo de gastos máximos instantáneos anuales de todas las estaciones hidrométricas		

	consideradas de las regiones y conjunto de regiones. Se realizó un conteo del total de pruebas de homogeneidad y tendencia que cumplía cada estación, así como de la prueba de independencia. Cuando las estaciones satisfacían al menos cinco pruebas de homogeneidad, las pruebas de tendencia y la prueba de independencia, se consideraba que la estación cumplía el criterio para ser utilizada sin reservas. En caso contrario se hizo alguna revisión adicional de los datos registrados. Se observa que en varias regiones (particularmente la 1, la 23 y la 26) se presentan problemas relativos a la homogeneidad; el análisis detallado y las adecuaciones que se realizaron se presentan en los capítulos correspondientes a cada una de las regiones. **4.5 Factores regionales de diseño** Se realizó una descripción general de cada Región o Grupo de Regiones Hidrológicas indicando la ubicación, el área, y el número de cuencas en la región.		

	Se recopilaron los datos de gastos máximos instantáneos anuales de las estaciones hidrométricas de las regiones hidrológicas que tuvieran al menos 20 años de registros, a partir de los archivos DA del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se hizo una depuración de los datos, verificando algunos de ellos con estaciones cercanas, con los reportes de gastos mensuales (archivos DM), con la posible ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos (tormenta tropical, huracán) revisando registros históricos o notas periodísticas de eventos ocurridos en fechas donde se apreciaban datos dudosos. Los gastos máximos anuales registrados en cada estación hidrométrica se dividieron entre su respectiva media para formar series moduladas, las series moduladas se juntaron para formar una muestra ampliada cuyo tamaño es igual a la suma del de las series individuales.		

	Para la muestra ampliada, se realizó el ajuste de la función de distribución de probabilidades más adecuada. A algunos grupos de hidrométricas se le realizó un análisis estadístico con ayuda del programa AX, obteniéndose ajustes con funciones de distribución Doble Gumbel. Los parámetros de la función de distribución obtenida se indican en Tablas. Se obtuvieron eventos de diseño para diferentes periodos de retorno que representan factores regionales que se pueden aplicar al valor de la media de los gastos máximos instantáneos en un sitio con información, o bien aplicar a un valor de la media de los gastos máximos calculado a partir de ecuaciones regionales obtenidas con ayuda de las características fisiográficas de la cuenca. Con la finalidad de comprobar la homogeneidad entre las estaciones se generaron series de números aleatorios con distribuciones iguales a las de las muestras ampliadas; posteriormente se seleccionaron números aleatorios atendiendo al total de años de cada estación hidrométrica formando un registro		

	sintético con igual número de años por estación; a estos registros se les obtuvo el coeficiente de variación, para poder realizar una comparación entre los datos históricos y los sintéticos. **4.5.1 Resumen factores regionales** Se presenta un resumen de los factores obtenidos para el conjunto de regiones hidrológicas analizadas y los grupos generados en cada una de ellas.		

Describir cada uno de los resultados alcanzados, indicando de manera cuantitativa en qué medida cubre lo comprometido en la Ficha Técnica.
Los productos presentan el análisis de caudales de las 37 regiones hidrológicas del país, la identificación de grupos de cuencas estadística e hidrológicamente homogéneas, y la determinación de factores regionales para el cálculo de caudales correspondientes a doce períodos de retorno. Se determinaron ecuaciones potenciales que relacionan la media de los gastos máximos instantáneos de cada cuenca, con indicadores de las características fisiográficas y de precipitación correspondientes, de esta forma, con un plano que contiene las isoyetas de las medias de las lluvias diarias máximas anuales y los factores por periodo de retorno obtenidos para las distintas regiones, se puede estimar de manera confiable la precipitación asociada a distintos periodos de retorno en cualquier sitio del país.

Los resultados, ¿de qué forma abonan a la parte preventiva del proyecto?
Los productos del proyecto constituyen una herramienta preventiva porque los factores regionales facilitarán y harán más robusto el cálculo de los caudales en futuros análisis de peligro por inundación fluvial en cuencas. Adicionalmente, la base proporcionada de caudales por cuenca que fueron revisados y en su caso corregidos también contribuirá a simplificar dichos análisis. Los resultados permiten estimar de manera confiable las lluvias asociadas a cualquier periodo de retorno y duración en cualquier sitio de la República Mexicana. Utilizando los factores de reducción por área se pueden estimar precipitaciones medias para cualquier área de cuenca. Se generaron mapas de ubicación, esquemas y topografía con clave de estaciones analizadas y coeficientes de variación para cada una de ellas.
Señalar el proceso o la metodología empleada para la obtención de los productos reportados
Para verificar y replantear la conformación de grupos de cuencas homogéneas estadística y geográficamente, se empleó la metodología estaciones-año y pruebas de homogeneidad; para determinar los factores regionales se utilizó el análisis de frecuencias. Al modular los valores máximos registrados en cada estación, hidrométrica o pluviométrica, dividiéndolo entre su respectiva media, se forman muestras cuya media es 1.0 y cuya desviación estándar es igual al coeficiente de variación (CV) de la muestra original, de manera que cuando los CV son "similares" puede suponerse que las muestras moduladas provienen de la misma población.

2. Descripción detallada, en su caso, de las características de los bienes adquiridos de acuerdo al PAPC y lo comprometido dentro de la Ficha Técnica. Si se trata de equipo, incluir especificaciones técnicas y los mapas que se entreguen deberá tener formato shape.

No.	Concepto	Descripción
1	Isoyetas	Se elaboraron 17 mapas de isoyetas asociadas a doce períodos de retorno.
2	Regiones Homogéneas Ecuaciones Regionales	Se definieron 33 grupos de Estaciones Hidrométricas y se obtuvieron ecuaciones que permiten pasar de la media de los

		gastos máximos anuales al gasto asociado a distintos periodos de retorno.
3	Factores Regionales	El factor que permite estimar el caudal de una cuenca de estudio ubicada en una región o grupo homogéneo. Se presenta un resumen de los factores regionales obtenidos para el conjunto de regiones hidrológicas analizadas y los grupos generados en cada una de ellas. Respecto a los gastos máximos anuales, se obtuvieron sus valores medios para 250 estaciones hidrométricas, y, para cada una de ellas se obtuvieron factores que permiten pasar de los valores medios a los correspondientes a distintos periodos de retorno

3. **Productos que se tienen al momento del reporte.**

No.	Producto utilizable	Mecanismo de integración con la CNPC o el CENAPRED
1	Isoyetas medias con intervalos de 2 mm.	Estos productos ya están incorporados en el Atlas Nacional de Riesgos en su versión pública.
2	Isoyetas con duración de una hora, asociadas a un periodo de retorno de 2 años, en intervalos de 1 mm.	
3	Isoyetas asociadas a un periodo de retorno de 2 años, en intervalos de 2 mm.	
4	Isoyetas con duración de una hora, asociadas a un periodo de retorno de 5 años, en intervalos de 1 mm.	

	Isoyetas asociadas a un periodo de retorno de 5 años, en intervalos de 2 mm.	
5	Isoyetas con duración de una hora, asociadas a un periodo de retorno de 10	
6	años, en intervalos de 2 mm.	
	Isoyetas asociadas a un periodo de retorno de 10 años, en intervalos de 5 mm.	
7	Isoyetas con duración de una hora, asociadas a un periodo de retorno de 20	
8	años, en intervalos de 2 mm.	
	Isoyetas asociadas a un periodo de retorno de 20 años, en intervalos de 5 mm.	
9	Isoyetas con duración de una hora, asociadas a un periodo de retorno de 50	
10	años, en intervalos de 2 mm.	
	Isoyetas asociadas a un periodo de retorno de 50 años, en intervalos de 5 mm.	
11	Isoyetas con duración de una hora, asociadas a un periodo de retorno de 100	
12	años, en intervalos de 5 mm.	
	Isoyetas asociadas a un periodo de retorno de 100 años, en intervalos de 10 mm.	
13	Isoyetas con duración de una hora, asociadas a un periodo de retorno de 200	
14	años, en intervalos de 5 mm.	

15	Isoyetas asociadas a un periodo de retorno de 200 años, en intervalos de 10 mm.	
16	Isoyetas con duración de una hora, asociadas a un periodo de retorno de 500 años, en intervalos de 5 mm.	
17	Isoyetas asociadas a un periodo de retorno de 500 años, en intervalos de 10 mm.	
18	Delimitación de regiones homogéneas de lluvia	
19	Ubicación de estaciones hidrométricas	
20	Cuencas delimitadas a partir de las estaciones hidrométricas	

4. Comentarios

El Comité Interno de la Subcuenta de Investigación para la Prevención, aprobó el informe técnico final de este proyecto, mediante acuerdo RO/26/01/2018, con fundamento en el artículo 30 de los Lineamientos para la operación del Comité Interno de la Subcuenta de Investigación, en el marco del Acuerdo por el que se establecen las Reglas de Operación del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales.

Los productos finales del proyecto pueden ser visualizados en la siguiente liga:
URL: http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/app/fenomenos/

Menú: Capas/Datos Básicos/Climatología/Precipitación/Nacional (2017)