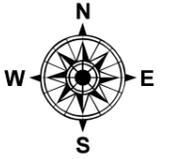


ANEXO 1

MAPAS ASOCIADOS A DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO CON DISTINTAS DURACIONES

ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS Y DURACIÓN DE 1 HORA



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

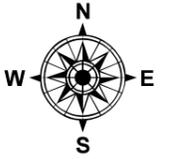
Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS Y DURACIÓN DE 1 HORA



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

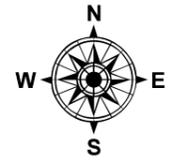
Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS Y DURACIÓN DE 1 HORA



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

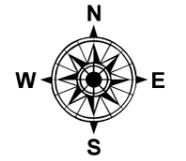
Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 2 AÑOS Y DURACIÓN DE 1 HORA



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 2000 AÑOS Y DURACIÓN DE 1 HORA



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

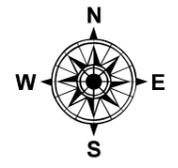
Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 1000 AÑOS Y DURACIÓN DE 1 HORA



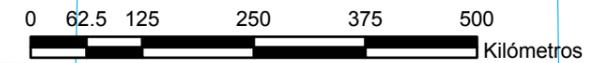
Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal



Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006
Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS Y DURACIÓN DE 1 HORA



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

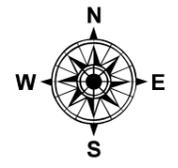


Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006
Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 250 AÑOS Y DURACIÓN DE 1 HORA



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal



Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS Y DURACIÓN DE 1 HORA



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal



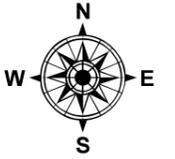
Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS Y DURACIÓN DE 1 HORA



Leyenda
— Isoyetas
□ División Estatal

Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

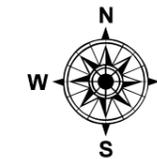
Proyección: Cónica Conforme de Lambert



0 62.5 125 250 375 500
Kilómetros



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 2 AÑOS Y DURACIÓN DE 24 HORAS



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 2000 AÑOS Y DURACIÓN DE 24 HORAS



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 1000 AÑOS Y DURACIÓN DE 24 HORAS



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

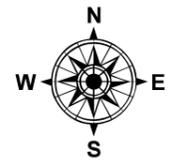
Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS Y DURACIÓN DE 24 HORAS



Leyenda

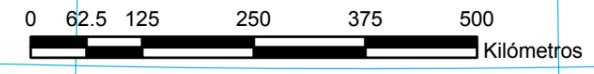
- Isoyetas
- División Estatal



Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 250 AÑOS Y DURACIÓN DE 24 HORAS



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal



Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS Y DURACIÓN DE 24 HORAS



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS Y DURACIÓN DE 24 HORAS



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS Y DURACIÓN DE 24 HORAS



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS Y DURACIÓN DE 24 HORAS



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ISOYETAS CON PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS Y DURACIÓN DE 24 HORAS



Leyenda

- Isoyetas
- División Estatal

Riesgos Hidrometeorológicos
Elaboró: Marco A. Salas S.
Fecha: Junio 2006

Fuente: Estudio hidrológico
del I. de I. - U.N.A.M.

Proyección: Cónica Conforme de Lambert



ANEXO 2

**MAPAS DE INUNDACIÓN, VULNERABILIDAD, DAÑOS Y RIESGO
PARA PERIODOS DE RETORNO DESDE 5 HASTA 2000 AÑOS**

Escenario para un periodo de retorno de 5 años

Los resultados del análisis para el periodo de retorno de 5 años, se muestran en las figuras A.1. En ellas se observa que aumenta el número de viviendas, respecto de las correspondientes para $Tr = 2$ años.



Figura A.1a Lotes inundados para $Tr = 5$ años



Figura A.1b Vulnerabilidad en los lotes inundados para $Tr = 5$ años



Figura A.1c Daños por inundación para $Tr = 5$ años



Figura A.1d Riesgo de inundación para $Tr = 5$ años

Para este caso, con una probabilidad de 0.20, los daños ascienden a \$362,757.

Escenario para periodo de retorno de 10 años

Para el escenario en el que sucede un evento con $Tr = 10$ años (figuras A.2), las viviendas afectadas son prácticamente las mismas que en el caso de los eventos menores; sin embargo, la diferencia radica en que los tirantes de agua son mayores y, por lo tanto, su vulnerabilidad aumenta.



Figura A.2a Lotes inundados para $Tr = 10$ años



Figura A.2b Vulnerabilidad en los lotes inundados para $Tr = 10$ años



Figura A.2c Daños por inundación para $T_r = 10$ años



Figura A.2d Riesgo de inundación para $T_r = 10$ años

En este caso, la probabilidad de que ocurra este escenario es 0.12, cuyos daños ascienden a \$248,798.

Escenario para periodo de retorno de 25 años

La ocurrencia de un evento con $Tr = 25$ años (figuras A.3) conlleva un aumento de más del 40% de las viviendas que pueden ser afectadas, respecto al caso antes analizado. El tirante promedio es de 1.26 m.



Figura A.3a Lotes inundados para $Tr = 25$ años

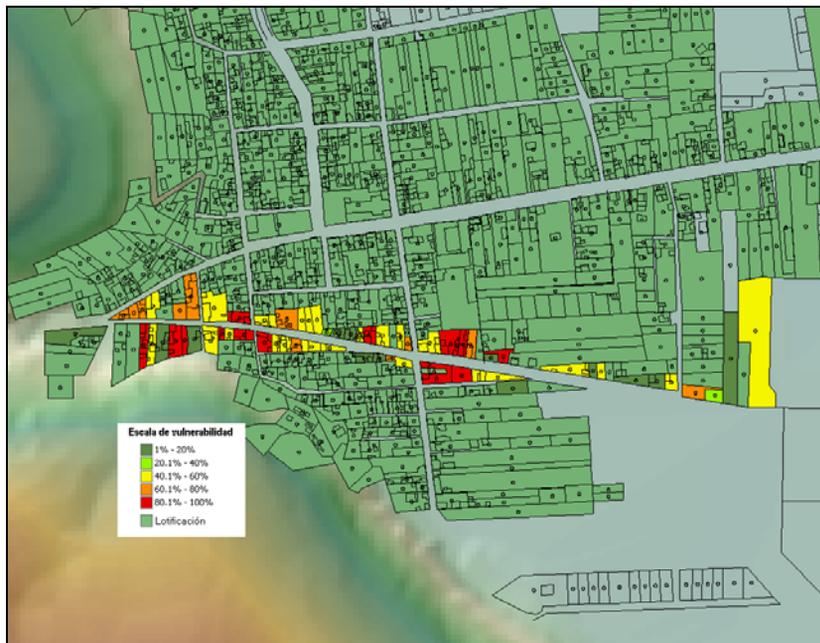


Figura A.3b Vulnerabilidad en los lotes inundados para $Tr = 25$ años

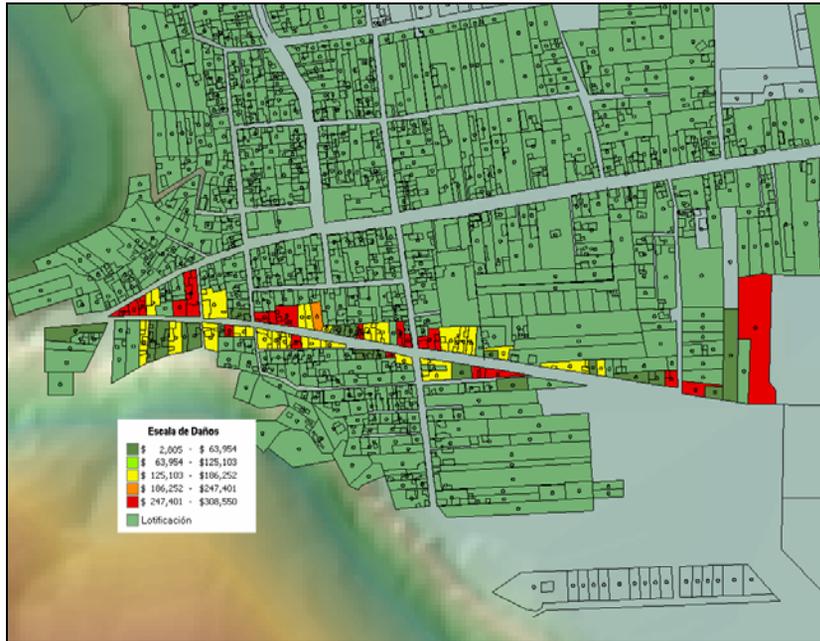


Figura A.3c Daños por inundación para $Tr = 25$ años



Figura A.3d Riesgo de inundación para $Tr = 25$ años

A partir de este escenario, el incremento de la vulnerabilidad es más lento, además el número de viviendas que son afectadas por la inundación es prácticamente el mismo y sólo cambian los daños por la magnitud del tirante promedio.

Los daños estimados para este evento son del orden de \$320,492.

Escenario para periodo de retorno de 50 años

En este caso (figuras A.4) el tirante promedio alcanza los 1.70 m y las viviendas afectadas son prácticamente las mismas que en el caso anterior, con la diferencia que la vulnerabilidad promedio es de 0.72 (5% más, respecto al caso anterior).



Figura A.4a Lotes inundados para $Tr = 50$ años

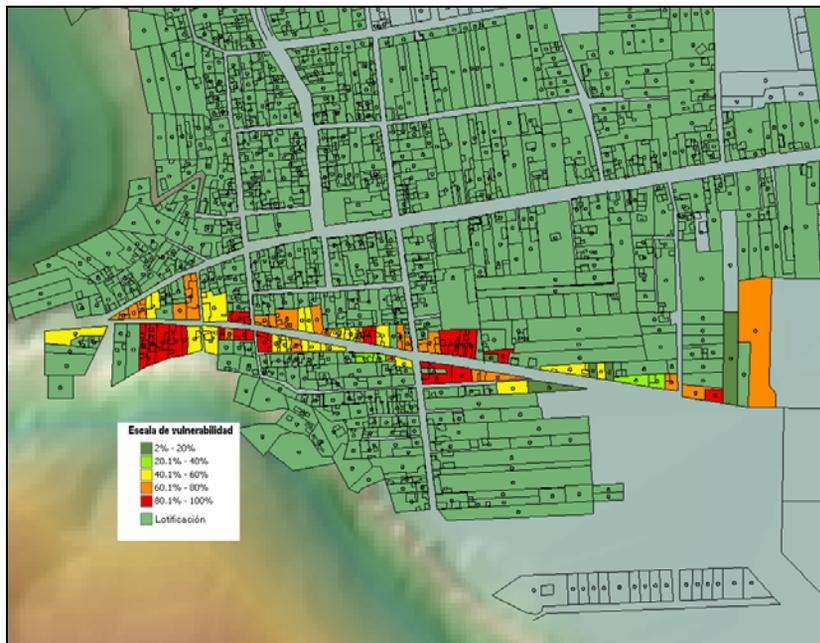


Figura A.4b Vulnerabilidad en los lotes inundados para $Tr = 50$ años

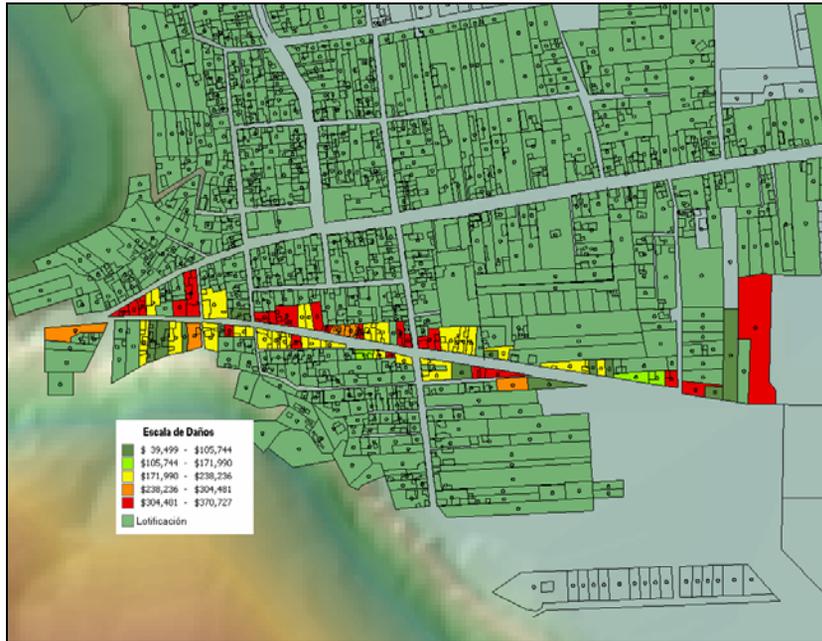


Figura A.4c Daños por inundación para $T_r = 50$ años

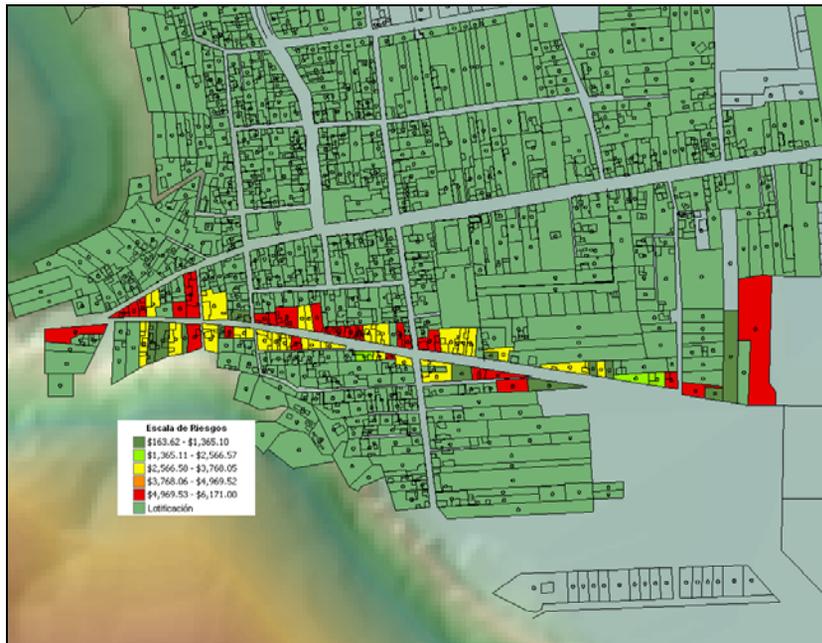


Figura A.4d Riesgo de inundación para $T_r = 50$ años

En este caso, la totalidad de la viviendas que cuentan con sobreelevación en su entrada ya han sido afectadas.

Los daños alcanzan los \$169,545.

Escenario para periodo de retorno de 250 años

Este escenario (figuras A.5) provoca que el tirante promedio alcance los 2.55 m y una vulnerabilidad media de 0.77, es decir un incremento del 10% en la primera variable y de 5% en la segunda.



Figura A.5a Lotes inundados, $Tr = 250$ años



Figura A.5b Vulnerabilidad en los lotes inundados, $Tr = 250$ años

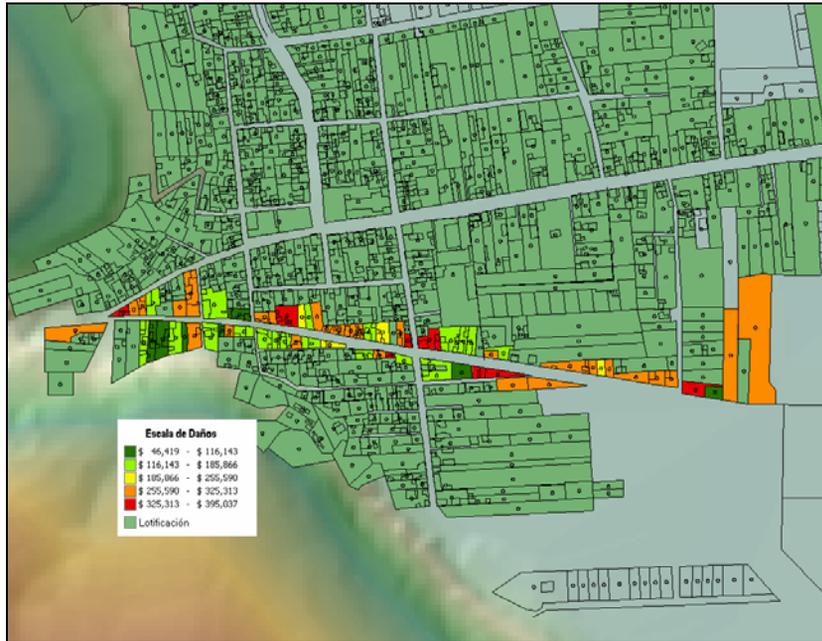


Figura A.5c Daños por inundación, $Tr = 250$ años



Figura A.5d Riesgo de inundación, $Tr = 250$ años

Desde aquí y hasta el último escenario analizado, la variación del riesgo no va más allá de un 2%. El daño calculado alcanza los \$36,778.

Escenario para periodo de retorno de 500 años

El incremento de las variables: gasto, tirante promedio, vulnerabilidad y daños, continúa paulatinamente (figuras A.6).



Figura A.6a Lotes inundados, $Tr = 500$ años



Figura A.6b Vulnerabilidad en los lotes inundados, $Tr = 500$ años

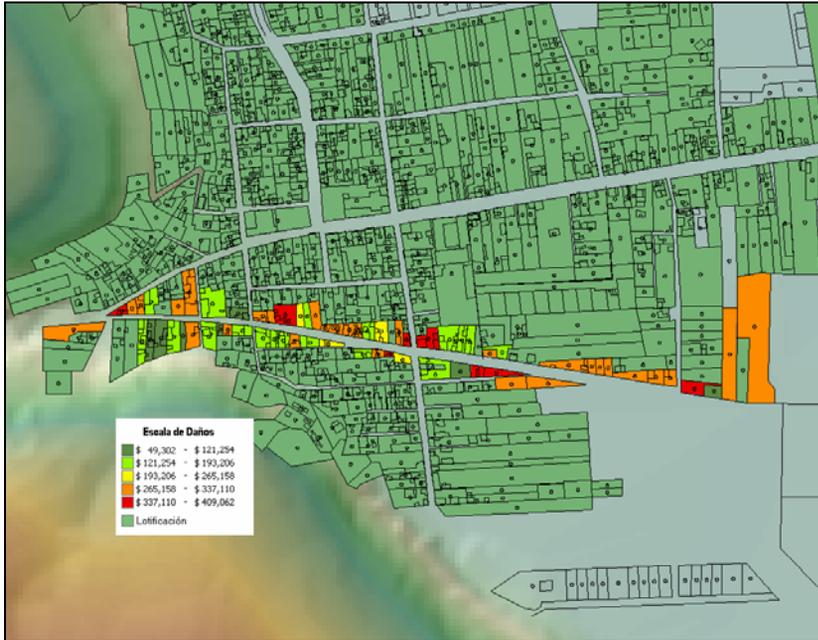


Figura A.6c Daños por inundación, $Tr = 500$ años

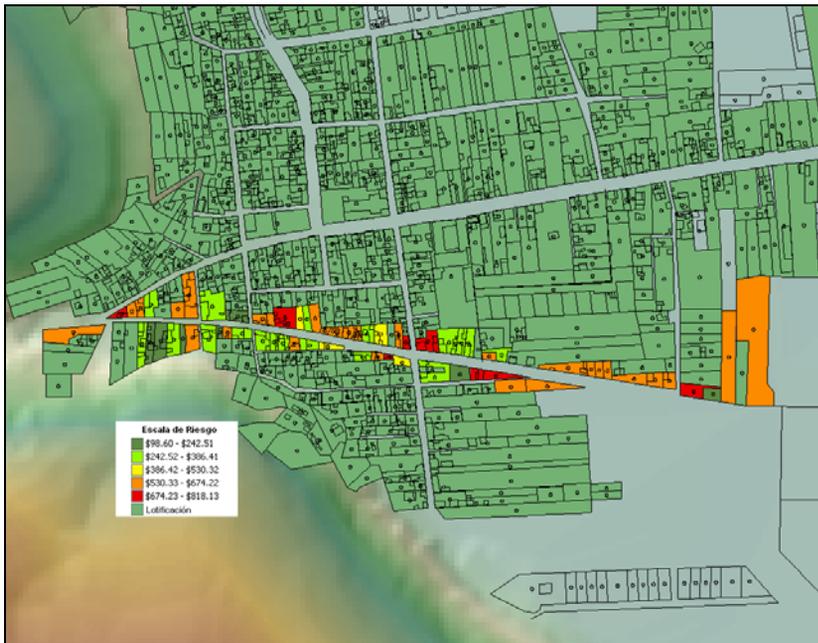


Figura A.6d Riesgo de inundación, $Tr = 500$ años

Los daños estimados para este evento son de \$19,288.00 (-48% respecto al $Tr=100$ años) para una probabilidad muy baja de que ocurra el mismo de 0.002.

Escenario para periodo de retorno de 1000 años

Para este evento (figuras A.7) el tirante promedio alcanza los 2.81 m y los daños calculados en las viviendas pasan los 10,000,000.



Figura A.7a Lotes inundados, $Tr = 1000$ años



Figura A.7b Vulnerabilidad en los lotes inundados, $Tr = 1000$ años

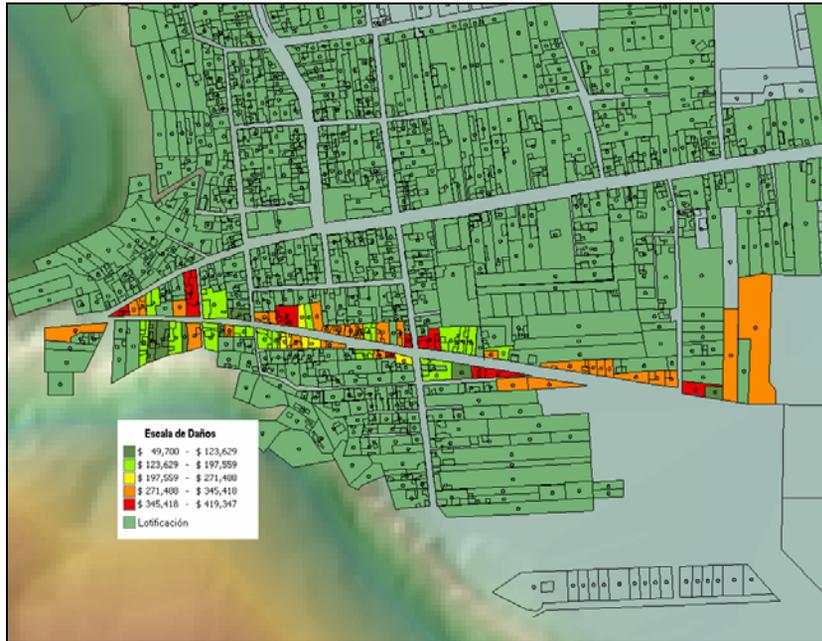


Figura A.7c Daños por inundación para $Tr = 1000$ años

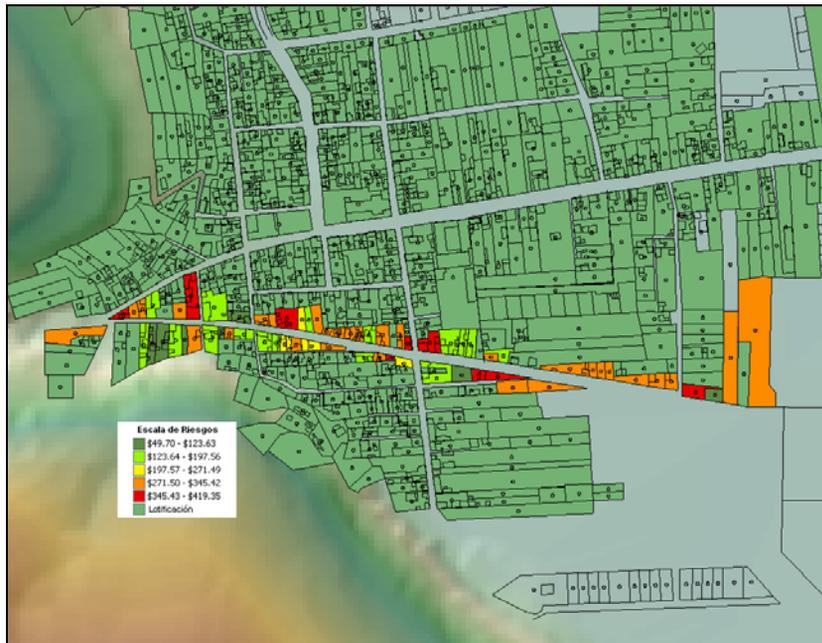


Figura A.7d Riesgo de inundación para $Tr = 1000$ años

Dado que la probabilidad de que este evento se presente es muy baja (0.001) el riesgo calculado a penas rebasa los \$10,000.

Escenario para periodo de retorno de 2000 años

De manera similar al caso anterior (figuras A.8), el tirante ronda los 2.95 m, produciendo una vulnerabilidad media de 0.86.



Figura A.8a Lotes inundados, $Tr = 2000$ años



Figura A.8b Vulnerabilidad en los lotes inundados, $Tr = 2000$ años

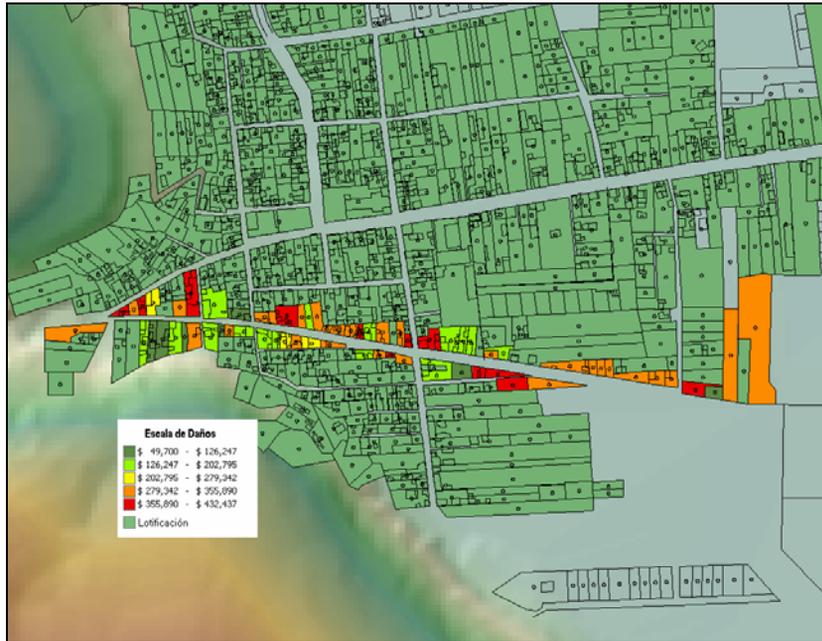


Figura A.8c Daños por inundación, $T_r = 2000$ años

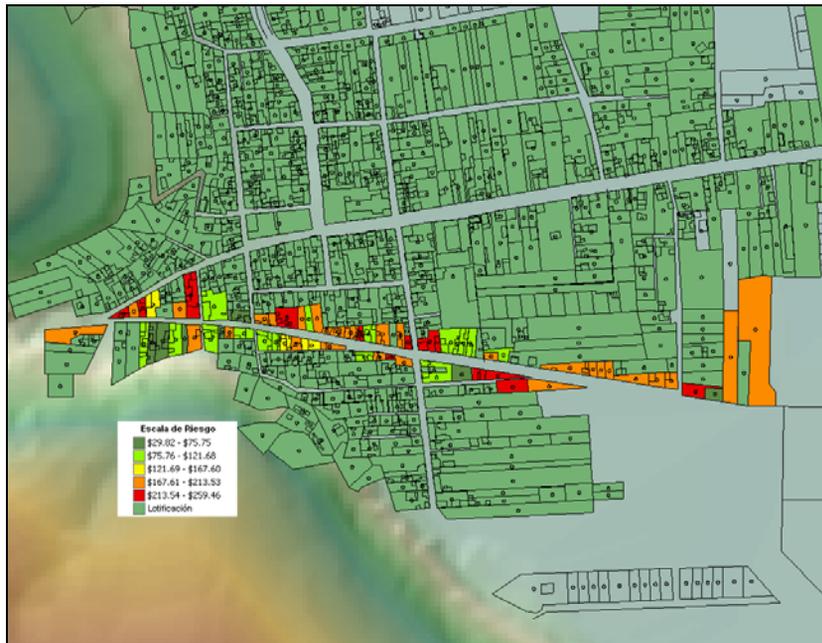


Figura A.8d Riesgo de inundación, $T_r = 2000$ años

La tabla 1.46 muestra los resultados del análisis de riesgo para cada uno de los periodos de retorno estudiados.

Los daños calculados son apenas de \$6,300.

ANEXO 3
OBTENCIÓN DE MEDIDAS DE RIESGO

RIESGO

Desde el punto de vista de pérdida, el riesgo puede verse como el movimiento de tres factores importantes entre sí: el costo o valor de los bienes expuestos a un evento, por su nivel de vulnerabilidad o daño ante el evento en acción, por la probabilidad de que el evento ocurra. De lo anterior podemos expresar al riesgo como:

$$R=CPV \quad (1)$$

donde **C**=Valor de los bienes expuestos, **P**=Peligro, y **V**=Vulnerabilidad

El valor de los bienes expuestos

Entendemos por el valor de los bienes expuestos (C en la ecuación 1) a la cuantía de lo que es susceptible de afectarse durante la ocurrencia de un fenómeno perturbador. En muchos casos C tiene unidades monetarias; sin embargo, habrá ocasiones en que se necesite expresar a C de otra forma, por ejemplo, si lo susceptible de afectarse son vidas humanas.

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es una medida de qué tan susceptible es un bien expuesto a ser dañado ante la ocurrencia de un fenómeno perturbador. De dos bienes expuestos uno es más vulnerable si, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad, sufre mayores daños. La vulnerabilidad suele expresarse como un número entre 0 y 1. 0 implica que el daño sufrido ante un evento de cierta intensidad es nulo, y 1 implica que este daño es igual al valor del bien expuesto. La vulnerabilidad puede representarse con una función matemática o en forma de una tabla llamada matriz de vulnerabilidad.

Medidas del peligro

En el contexto de este trabajo, se dirá que evaluar el peligro significa cuantificar, en términos de probabilidades, la ocurrencia, en un lapso dado, de fenómenos potencialmente dañinos para los bienes expuestos. Para evitar ambigüedades en la definición del acontecimiento potencialmente dañino, conviene medir su potencial con una cantidad que llamaremos su intensidad.

La caracterización del fenómeno, entonces, sólo es completa si se especifica su intensidad. Idealmente, ésta debe ser una cantidad (o un vector de cantidades) que pueda ser asociada mediante relaciones físicas con los efectos del fenómeno sobre los bienes expuestos.

Como herramienta para medir el peligro, se utiliza la tasa de excedencia de eventos con intensidad i , $v(i)$, definida como el número medio de veces en que, por unidad de tiempo, ocurre un evento que excede tal intensidad. La tasa de excedencia es una función decreciente con la intensidad. En vista de su definición, la densidad de probabilidades de la intensidad, $p(i)$, puede obtenerse derivando $v(i)$ de derecha a izquierda y normalizando posteriormente:

$$p(i) = -k \frac{dv(i)}{di} \quad (2)$$

Donde la constante k es tal que $p(i)$ integra 1. Nótese que $dv(i)/di$ es proporcional al número de eventos con intensidad igual a i o, más rigurosamente, con intensidad entre i e $i+di$.

A partir de $\nu(i)$, suponiendo ocurrencias aleatorias con distribución exponencial, es posible calcular la probabilidad que cierto valor de intensidad sea excedido en un lapso T , que no es más que la probabilidad que haya que esperar menos de T años para que se produzca un evento en que se exceda la intensidad i . Puesto que el tiempo entre eventos con intensidad igual o superior a i tiene distribución exponencial:

$$Pe(i, T) = \int_0^T \nu(i) e^{-\nu(i)t} dt = 1 - e^{-\nu(i)T} \quad (3)$$

$Pe(i, T)$, conocida como la probabilidad de excedencia de la intensidad i en un lapso T , es una medida de peligro adecuada para todo proceso de ocurrencia, mientras que $\nu(i)$ lo es sólo para el modelo de ocurrencias aleatorias de Poisson.

La expresión (1), nos da el riesgo ante la ocurrencia de un evento con cierta intensidad, sin embargo, para medir el riesgo será preferente tomar el promedio de daños esperados cuando ocurra un evento, es decir, obtener el riesgo ante el próximo evento.

El riesgo ante el próximo evento

El riesgo ante el próximo evento es la suma de los asociados a los diferentes niveles de intensidad. De la ecuación (1) sumamos los riesgos para cada intensidad, y llegamos a:

$$R_p = C \sum_{i=1}^n P(i) V(i) \quad (5)$$

El riesgo anual

Ahora bien, si se desea obtener el riesgo anual, se deberá multiplicar la ecuación de riesgo por el valor esperado de huracanes que ocurren al año, que para este caso es 0.3333.

$$R_a = \nu(1)(R_p) = \nu(1) \left(C \sum_{i=1}^n P(i) V(i) \right) \quad (6)$$

CÁLCULO DEL RIESGO A TRAVÉS DE PERIODOS DE RETORNO

Función periodo de retorno $Tr(i)$

Una forma de medir la excedencia de intensidad de un fenómeno a través del tiempo es por medio de periodos de retorno. El periodo de retorno es definido como el tiempo promedio entre las ocurrencias de un evento que excede cierta intensidad.

El periodo de retorno puede verse como la función $Tr(i)$, cuyo dominio son los diferentes niveles de intensidad i , y la imagen es el lapso promedio de tiempo entre ocurrencias de eventos con intensidad i , generalmente dada en años. La función $Tr(i)$ es creciente con la intensidad, es decir, a mayor magnitud o grado de un evento, aumenta el tiempo entre excedencias.

Tabla 1 Periodos de retorno

i	$Tr(i)$
1	2
2	5
3	10
4	25
5	50
6	100
7	250
8	500
9	1000
10	2000

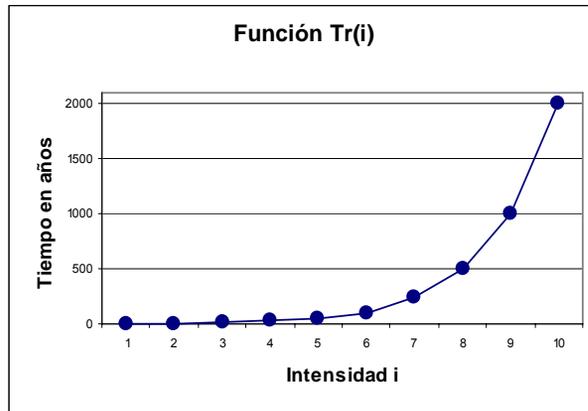


Figura 1 Representación de diferentes periodos de retorno

En particular, nos interesará conocer el periodo de retorno de eventos máximos anuales, dado que es la manera más común de trabajar con series hidrológicas.

Se puede decir que la función de periodo de retorno de máximos anuales no aprovecha toda la información disponible. Es importante señalar que la varianza de las observaciones del fenómeno del cual se obtuvieron los periodos de retorno para cada nivel de intensidad, permitirá la estimación el error de la función $Tr(i)$.

Si una excedencia ocurre en promedio cada $Tr(i)$ años, entonces la probabilidad de que un evento exceda la intensidad i en cualquier año es ¹

$$Pe = \frac{1}{Tr(i)} \quad (7)$$

siempre que $Tr(i) > 1$.

¹ Statistical Methods in Hydrology. Charles T. Haan, 6ª Edición, 1994. Página 3.

En la tabla 2 se muestran las probabilidades de excedencia para cada periodo de retorno.

Tabla 2 Probabilidad de excedencia en un año

Intensidad i	Pe
1	0.5000
2	0.2000
3	0.1000
4	0.0400
5	0.0200
6	0.0100
7	0.0040
8	0.0020
9	0.0010
10	0.0005

El peligro a través de periodos de retorno

A pesar de que se puede obtener la probabilidad de excedencia de intensidad de un fenómeno para un tiempo determinado por medio del periodo de retorno, ésta no resulta suficiente para medir el peligro ante la existencia de un próximo evento.

Recordemos que de (2), la expresión $\nu(i)$ es la tasa de excedencia de intensidad i , definida como el número medio de veces en que, por unidad de tiempo ocurre un evento que excede tal intensidad. La tasa de excedencia es una función decreciente con la intensidad.

Como se podrá observar, por su definición, la función de peligro requiere de la existencia de una tasa de excedencia de intensidad, de tal forma que si solamente contamos con la información estadística de los periodos de retorno, se deberá construir la función $\nu(i)$ partiendo de la función $tr(i)$.

Un método para obtener la tasa de excedencia de un fenómeno, partiendo de sus periodos de retorno para diferentes intensidades, consiste en realizar una proyección del número de eventos que ocurrirán en promedio durante un intervalo de tiempo.

Por ejemplo, de la tabla 1, el periodo de retorno asociado a la intensidad 1 es 2 años, es decir $Tr(1) = 2$, por lo que en promedio, durante los próximos dos años, la intensidad 1 será excedida una vez. Ahora bien, en los siguientes 2000 años, el número de eventos que excederán la intensidad 1 será $2000/2 = 1000$ eventos en promedio. Esta proyección nos da como resultado una estimación de la tasa de excedencia. En general, podremos obtener $\nu(i)$ con la siguiente expresión

$$\nu(i) = \frac{t}{Tr(i)} \quad (8)$$

donde t es el número de años proyectado.

La siguiente tabla nos muestra las proyecciones del número de eventos que exceden cierta intensidad hasta 2000 años.

Tabla 3 Número de eventos con cierta intensidad por año

Intensidad	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10
Años/Tr(i)	2	5	10	25	50	100	250	500	1000	2000
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0
25	12	5	2	1	0	0	0	0	0	0
50	25	10	5	2	1	0	0	0	0	0
100	50	20	10	4	2	1	0	0	0	0
250	125	50	25	10	5	2	1	0	0	0
500	250	100	50	20	10	5	2	1	0	0
1000	500	200	100	40	20	10	4	2	1	0
2000	1000	400	200	80	40	20	8	4	2	1

Tomando t =2000 años de proyección, se trasladan los valores para las intensidades 1 a 10 en la siguiente tabla.

Tabla 4 Número de eventos por intensidad en 2000 años

Intensidad <i>i</i>	<i>v(i)</i>
1	1000
2	400
3	200
4	80
5	40
6	20
7	8
8	4
9	2
10	1
11	0

El evento en que se excede una intensidad de 11, tiene una probabilidad igual a cero, únicamente se agrega para efectos de calcular la función de peligro, como se indica a continuación.

Usando la ecuación (2), obtenemos la probabilidad de excedencia $P(i)$ de que un evento sea de intensidad i , integrando de i a $i+1$

$$P(i) = -\frac{1}{v(1)} \int_i^{i+1} \frac{dv(i)}{di} di = -\frac{1}{v(1)} [v(i+1) - v(i)]$$

Tabla 5 Función de peligro

Intensidad i	$P(i)$
1	0.6
2	0.2
3	0.12
4	0.04
5	0.02
6	0.012
7	0.004
8	0.002
9	0.001
10	0.001
11	0

Comparaciones entre las funciones de peligro y periodo de retorno

¿Cuál es la relación entre la función de peligro y el periodo de retorno?

La función de peligro da la probabilidad de que un evento exceda cierta intensidad y no avance a la siguiente. El periodo de retorno proporciona el tiempo esperado entre excedencias de cierta intensidad.

Matemáticamente se tiene la siguiente expresión.

De (2) y (8) se obtiene que

$$p(i) = -\frac{1}{v(1)} \frac{dv(i)}{di} = -\frac{Tr(1)}{t} \frac{d}{di} \frac{t}{Tr(i)} = -Tr(1) \frac{dTr(i)^{-1}}{di} \quad (9)$$

Integrando $p(i)$ de i a $i+1$ se llega a

$$P(i) = \int_i^{i+1} p(i) di = -Tr(1) \int_i^{i+1} \frac{dTr(i)^{-1}}{di} di = -Tr(1) \left[\frac{1}{Tr(i+1)} - \frac{1}{Tr(i)} \right] = \frac{Tr(1)}{Tr(i)} - \frac{Tr(1)}{Tr(i+1)} \quad (10)$$

La expresión (10) se puede interpretar como el número de eventos promedio que exceden la intensidad i al tiempo $Tr(1)$, que no llegaron a intensidad $i+1$, es decir, $Tr(1)/Tr(i)$ es la probabilidad de que un evento exceda la intensidad i durante el tiempo $Tr(1)$.

De igual forma, $Tr(1)/Tr(i+1)$ es la probabilidad de que un evento exceda la intensidad $i+1$ durante el tiempo $Tr(1)$, entonces la expresión (12) da la probabilidad de que un evento exceda la intensidad i sin que avance a la intensidad $i+1$ durante el tiempo $Tr(1)$.

En el ejemplo aquí tratado, en la tabla 2, y en la tabla 4, hemos obtenido Pe y $P(i)$ respectivamente. En este caso, se podrá comprobar que la relación numérica de las probabilidades obtenidas para cada método tienen un estrecho parecido entre si. El coeficiente de correlación entre Pe y $P(i)$ es 0.997885, lo cual significa que ambas series son parecidas en un 99.78 %.

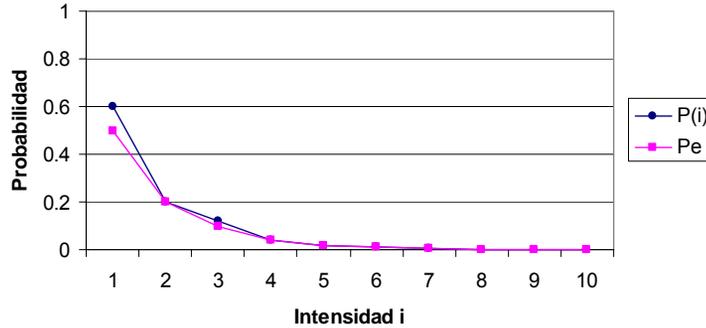


Figura 2 Comparación entre P(i) y Pe

Es importante recordar las diferencias que tienen los distintos métodos, tanto Pe como P(i) manejan un concepto diferente. El resultado de la correlación puede decirse que es muy significativo ya que se está obteniendo P(i) y Pe partiendo ambas de Tr(i). Para nuestro ejemplo, en que Tr(1)=1, tenemos que

$$P(i) = \frac{1}{Tr(i)} - \frac{1}{Tr(i+1)} \tag{11}$$

Si Tr(i+1) es un valor muy grande, de tal forma que 1/Tr(i+1) converge a cero, entonces

$$\frac{1}{Tr(i)} - \frac{1}{Tr(i+1)} \approx \frac{1}{Tr(i)} \tag{12}$$

es decir,

$$P(i) \approx Pe$$

Se puede observar que en Tr(6) (ver tabla 6), la diferencia entre P(6) y Pe=1/ Tr(6), se hace más pequeña. Para Tr(7), las probabilidades P(i) y Pe ya son iguales, sin embargo, en Tr(10), P(i) y Pe cambian pues Tr(11), es decir, Tr(i+1) no existe.

Tabla 6 Medidas de excedencia y peligro

Intensidad i	Tr(i)	v(i)	P(i)	Pe
1	2	1000	0.6	0.5
2	5	400	0.2	0.2
3	10	200	0.12	0.1
4	25	80	0.04	0.04
5	50	40	0.02	0.02
6	100	20	0.012	0.01
7	250	8	0.004	0.004
8	500	4	0.002	0.002
9	1000	2	0.001	0.001
10	2000	1	0.001	0.0005
11	-	0	0	0

Aparentemente se puede usar como función de peligro P(i) la probabilidad de excedencia Pe, aunque para periodos de retorno pequeños el error es grande.

La consideración de agregar una intensidad “ficticia” aumenta un poco el error para el Tr mayor.

Variaciones de $P(i)$ ante el registro de más periodos de retorno

Suponiendo que se obtiene el registro de periodos de retorno de intensidades mayores a las que se tenían antes, ¿qué tanto varían las probabilidades de excedencia $P(i)$? Para observar los cambios, hagamos experimentos numéricos con más periodos de retorno a los que se tienen en la tabla 1.

Tabla 7 Variaciones de $P(i)$ con más periodos de retorno

Intensidad i	$Tr(i)$	$P(i)_1, t=2000$	$P(i)_2, t=5000$	$P(i)_3, t=10000$	$P(i)_4, t=20000$	$P(i)_5, t=25000$
1	2	0.600	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000
2	5	0.200	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
3	10	0.120	0.1200	0.1200	0.1200	0.1200
4	25	0.040	0.0400	0.0400	0.0400	0.0400
5	50	0.020	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200
6	100	0.012	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120
7	250	0.004	0.0040	0.0040	0.0040	0.0040
8	500	0.002	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020
9	1000	0.001	0.0012	0.0010	0.0010	0.0010
10	2000	0.001	0.0004	0.0006	0.0006	0.0006
11	5000	-	0.0004	0.0002	0.0002	0.0002
12	10000	-	-	0.0002	0.0001	0.0001
13	20000	-	-	-	0.0001	0.0000
14	25000	-	-	-	-	0.0001

En la tabla anterior se muestran diferentes probabilidades $P(i)$ para los periodos de retorno de hasta 25,000 años. En el caso de la tercera columna, se tiene una $P(i)_1$ con intensidad máxima $i=10$ y una proyección $t=2000$ años. En la cuarta columna, se tiene una $P(i)_2$ con intensidad máxima $i=11$ y una proyección $t=5000$ años. Y así sucesivamente hasta llegar a $P(i)_3$ con intensidad máxima $i=14$ y proyección $t=25000$ años.

En este ejemplo, se nota que a partir de la intensidad $i=10$ se muestran variaciones en $P(i)_2$. En $k=11$, e $k=12$, se ven mayores diferencias entre casi todas las $P(i)$. Como se puede observar, solo hay variaciones en las últimas intensidades.

Para tener probabilidades más acertadas siempre es conveniente tomar el número máximo de registros disponibles, por lo que es mejor tomar $P(i)_5$, ya que cuenta con la mayor cantidad de periodos de retorno registrados.

Medidas del riesgo con periodos de retorno

En la tabla 8, se muestra un ejemplo de medidas de peligro, vulnerabilidad y riesgo, asignando a la primera intensidad un valor asociado a un periodo de retorno de dos años.

Tabla 8 Medidas de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo

Medidas de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo						
Intensidad <i>i</i>	<i>Tr(i)</i>	<i>Pe</i>	<i>v(i)</i>	<i>P(i)</i>	<i>V(i)</i>	<i>R(i)</i>
1	2	0.5	1000	0.6	0.04	0.0240
2	5	0.2	400	0.2	0.24	0.0480
3	10	0.1	200	0.12	0.32	0.0384
4	25	0.04	80	0.04	0.44	0.0176
5	50	0.02	40	0.02	0.53	0.0106
6	100	0.01	20	0.012	0.74	0.0089
7	250	0.004	8	0.004	0.81	0.0032
8	500	0.002	4	0.002	0.94	0.0019
9	1000	0.001	2	0.001	0.98	0.0010
10	2000	0.0005	1	0.001	1	0.0010
11	-	-	0	-	-	-
Σ	-	-	-	1	-	0.1546

R(i) es un índice de riesgo para cada intensidad *i* que se obtiene de operar la expresión (1) haciendo a *C* igual a \$1.00

$$R(i) = P(i)V(i) \tag{13}$$

El riesgo anual por intensidad, *Ra(i)*, es el riesgo para cada intensidad *i* que se tendrá para el inicio del año; se obtiene de multiplicar el promedio *n_i* de eventos que superan la intensidad *i* por la expresión (13)

$$R(a, i) = n_i P(i)V(i) \tag{14}$$

El riesgo ante el próximo evento

De la expresión (5), si *C*= \$1.00, el riesgo es la suma de las *R(i)*, de donde *R_p*=\$0.1546

$$R_p = C \sum_{i=1}^n P(i)V(i) = \$0.1546$$

El riesgo anual del próximo evento

Para obtener el riesgo anual *Ra*, bastara con multiplicar (7) por el promedio *N* de eventos que superan la mínima intensidad capaz de causar daños al año.

$$R_a = CN \sum_{i=1}^n P(i)V(i) \tag{15}$$

Se verifica que para nuestro caso si *N* = 4 y *C* = \$1.00, entonces, *Ra* = \$0.61832

Como se puede observar, el riesgo ante el próximo evento R_p expresa la pérdida promedio por evento, mientras que el riesgo anual R_a lo podemos ocupar para realizar un fondo anual para resarcir el promedio de pérdidas causadas durante un año por eventos dañinos. R_a y R_p se pueden ver como índices de riesgo para el caso en que $C=\$1.00$.

Observaciones acerca de la metodología

A pesar de que se ha descrito una metodología para medir el riesgo a través de obtener funciones de peligro con periodos de retorno, cabe señalar que no es la mejor forma de obtener una buena medición del riesgo, pues los periodos de retorno registran solamente la ocurrencia de un evento con intensidad máxima durante un periodo de tiempo, sin tomar en cuenta los eventos con menor intensidad que también causaron daño.

En la figura 4 se observan las desventajas que muestra tomar medidas solamente de eventos máximos durante cierto intervalo de tiempo. En la parte izquierda de la figura se muestra sólo el registro de 4 eventos x_2 , x_5 , x_7 y x_{11} durante los periodos 1, 2, 3 y 4. Mientras que en la parte derecha se muestra el registro de todos los eventos ocurridos que excedieron la intensidad u , que es la intensidad mínima que causa daño, obteniéndose un registro más detallado de la naturaleza de la frecuencia de eventos dañinos. Un ejemplo de este tipo de registros es la VMS de ciclones tropicales, pues se cuentan el número total de eventos, y no solamente los de máxima intensidad alcanzada en un periodo de tiempo.

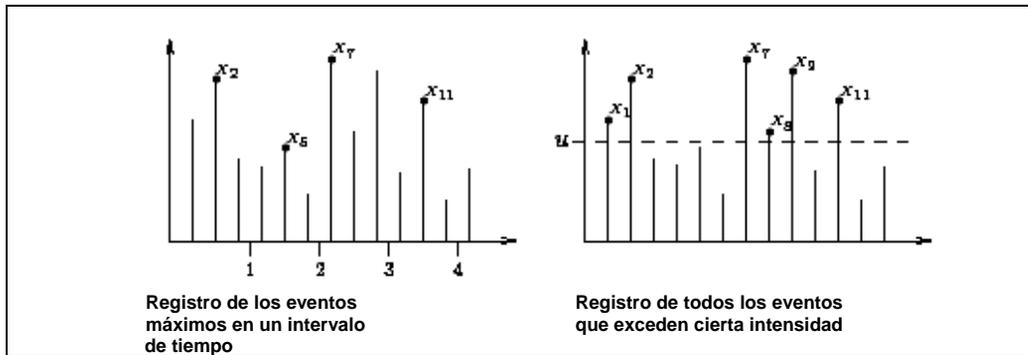


Figura 4 Registro de eventos con intensidad máxima

Concluyendo, podemos decir que es recomendable usar todos los registros de los eventos que exceden cierta intensidad. Desafortunadamente, no todas las veces se cuenta con dicha información, para este caso, se puede usar la metodología anteriormente descrita.

BIBLIOGRAFÍA

Statistical Methods in Hydrology. Charles T. Haan, 6ª Edición, 1994.

Algunos conceptos del análisis de riesgos. Mario Ordaz. Revista Prevención N° 14, Mayo – 1996. CENAPRED.

Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Versión 2004. CENAPRED.

Ciclones Tropicales. Martín Jiménez Espinosa, Lucía Guadalupe Matías Ramírez, Óscar A. Fuentes Mariles, Ricardo Prieto González. Serie Fascículos. 1ª Edición, diciembre 2003, CENAPRED.

An Application of Extreme Value Theory for Measuring Risk. Manfred Gilli, Evis Këllezi, Department of Econometrics, University of Geneva and FAME CH-1211 Geneva 4, Switzerland.

Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales. Michel Rosengaus Moshinsky, Martín Jiménez Espinosa, Maria Teresa Vázquez Conde. 1ª Edición, diciembre de 2002. CENAPRED, IMTA.

ANEXO 4
PROPUESTA DE CONSTRUCCIÓN DE TERRAZAS PARA SANTA MARÍA
JAALPA, EDO. DE MÉXICO

De lo desarrollado en este trabajo, se observó que el volumen de agua arrastrado por la calle-canal “Vicente Guerrero” trae consigo una gran cantidad de sedimento, el cual proviene de las laderas en la parte alta de la cuenca. Debido a la configuración del terreno se han construido represas, dentro de la barranca principal, con poca capacidad para retener los sedimentos, que incluso en la actualidad ya están azolvadas. Aún si se considerara la construcción de nuevas represas, por la topografía del lugar, éstas serían de poca capacidad y en cuestión de unos años también quedarían azolvadas y su función de retener sedimentos ya no se estaría cumpliendo. Lo que se recomienda es atacar el problema desde su raíz, donde empieza el proceso de erosión que es precisamente en las laderas; para ello existen varias técnicas de protección contra la erosión, éstas son:

- Reforestación.- Se aplica cuando las actividades humanas en las laderas son mínimas o nulas (en zonas boscosas).
- Sembrar pastos.- Estas se aplican en parques, jardines o incluso en zonas boscosas
- Construcción de terrazas.- Se aplican en campos de cultivo.

La principal actividad económica de la población en Santa María Jajalpa es la agricultura. Más del 90% de la superficie de la cuenca son campos de cultivo, así entonces las recomendaciones para evitar la erosión en las laderas estarán enfocadas en la construcción de terrazas.

La erosión hídrica es un fenómeno que desgasta y empobrece los suelos, empieza desde el golpe de las gotas de lluvia sobre el suelo desnudo, después, las partículas de suelo disgregadas son arrastradas por el escurrimiento superficial y cuando las velocidades del fluido son muy grandes se pueden llegar a formar canalillos o cárcavas acelerando así el proceso de erosión, figura 1.

Los factores más importantes que favorecen la aparición y desarrollo de los canalillos son:

Lluvias intensas y concentradas

Suelos blandos (poco compactos)

Pendiente fuerte de la superficie del suelo (con ángulos mayores a los 8°)



Figura 1 Formación de canalillos en una ladera en Jajalpa

De estos tres factores el único donde el hombre puede ingerir es en el cambio de pendiente del suelo, esto se puede lograr, precisamente, con la construcción de terrazas, las cuales pueden ser de mampostería o incluso de concreto. Consisten en pequeños muros trapeciales de dimensiones no tan grandes (altura promedio de entre uno y dos metros), figura 2.

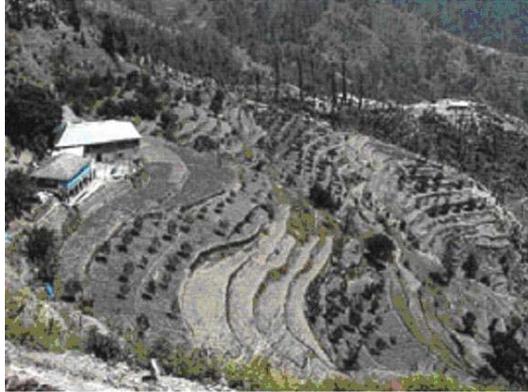


Figura 2 Construcción de terrazas en una ladera

De los datos obtenidos en campo se determinó que el ángulo promedio de inclinación de las laderas es de 17° . Con este valor, además de estudios hechos al suelo, y tomando una lluvia con un periodo de retorno de 5 años y duración de 24 horas, al usar un modelo matemático de erosión (García F, 1995) se obtuvo que para un área de un metro cuadrado de superficie del suelo se erosionan 0.0134 metros cúbicos lo que representa un espesor de erosión de 1.34 centímetros, además, el modelo arrojó que el 90% de la superficie del suelo es susceptible para que se formen canalillos.

Si se recomienda la construcción de terrazas de 1.5 metros de altura, perpendiculares al sentido del flujo del agua, con una separación entre ellas de 25 metros, ver figura 3, hechas de mampostería (por lo económico que esto resulta) se obtiene que el ángulo de inclinación de las laderas se disminuye a 14° en promedio. Al volver a usar el modelo matemático de erosión se obtiene que por cada metro cuadrado se erosionan 0.0013 metros cúbicos, lo que representa un espesor de erosión de 0.13 centímetros. Además, el modelo indica que en la superficie del suelo ya no hay áreas susceptibles de formación de canalillos.

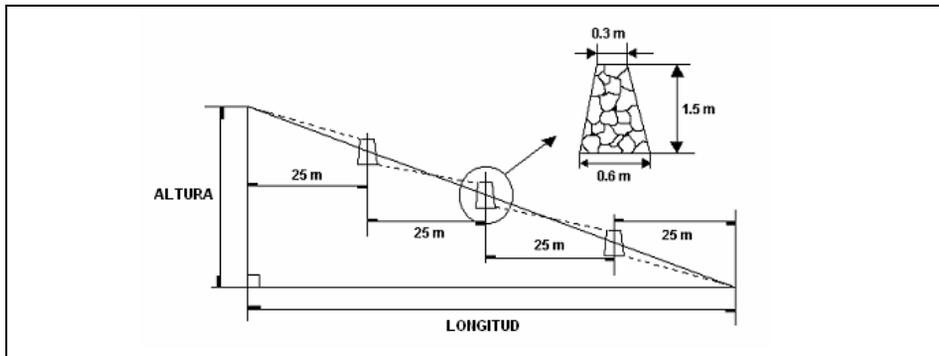


Figura 3 Esquema con separación entre terrazas de 25 metros

Como un segundo esquema de solución se propone ahora la construcción de terrazas con una separación entre ellas de 14 metros, ver figura 4, con las mismas dimensiones del caso anterior y del mismo material de construcción. Con esta propuesta se obtiene ahora que el ángulo de inclinación de las laderas se reduce a 12° en promedio. Al volver a usar el modelo matemático de erosión se obtiene que por cada metro cuadrado se erosionan 0.00039 metros cúbicos, lo que representa un espesor de erosión de 0.039 centímetros. Además el modelo indica que ya no hay áreas susceptibles de formación de canalillos.

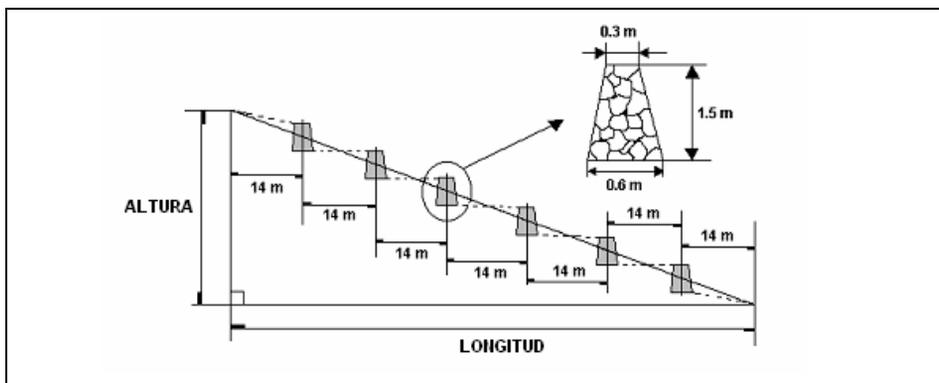


Figura 4 Esquema con separación entre terrazas de 14 metros

Al comparar el esquema de erosión para el caso donde no hay terrazas y las dos propuestas de solución, tabla 1, se observa lo siguiente:

Tabla 1 Esquema de comparación de las propuestas

Ladera de superficie unitaria (1m ²)	Pérdida de suelo (m ³)	Espesor de erosión (cm)	Área susceptible de formación de canalillos
Sin obras de protección	0.0134	1.34	90 %
Primera propuesta	0.0013	0.13	0 %
Segunda propuesta	0.00039	0.039	0 %

La cantidad de material erosionado se reduce considerablemente al proponer la construcción de terrazas, tanto en la primera propuesta como en la segunda, además de que las áreas susceptibles de formación de canalillos son nulas en ambos casos, por lo que las dos propuestas son viables de llevarse a cabo. En el aspecto económico se puede decir que la segunda opción requeriría la construcción de mayor número de terrazas que en la primera propuesta y por consiguiente de mayor inversión, además, debido a que la zona está catalogada como grado de marginación media, figura 5, entonces la primera propuesta es la más viable.

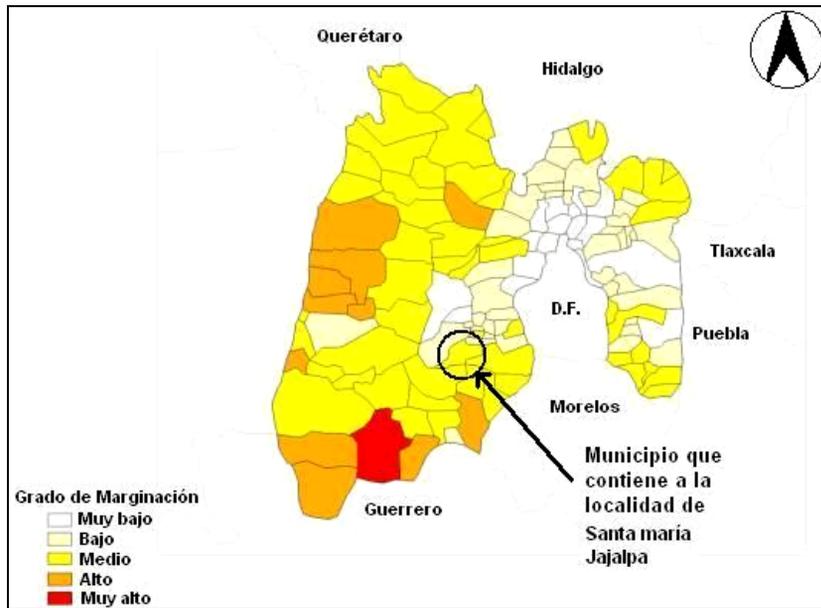


Figura 5 Grado de marginalización en el Estado de México Fuente: CONAPO, 1995