

## 10.2. Análisis preliminar de la peligrosidad

Con el objetivo de conocer con más detalle los factores desencadenantes de las inundaciones, la metodología seguida se basa en un estudio meteorológico seguido de un estudio hidrometeorológico.

Tras el estudio meteorológico, se han determinado los caudales punta previstos para los diferentes periodos de retorno fijados tras el análisis estadístico de precipitaciones máximas diarias anuales.

Partiendo de los caudales punta, en función de la probabilidad de ocurrencia de las lluvias máximas, se calculan los niveles de agua alcanzables en varias secciones de los cauces de las tres quebradas. Analizando la capacidad de las secciones, podremos determinar si los caudales líquidos por si solos darían lugar a desbordamientos.

### 10.2.1. Análisis de Precipitaciones

---

El estudio de las precipitaciones es de vital importancia en la evaluación y predicción de la amenaza natural del área de estudio ya que es uno de los principales factores desencadenantes de los procesos de erosión, desbordamiento e inundaciones que afectan al volcán de Usulután. Para ello, es necesaria información sobre la magnitud de las precipitaciones ocurridas en el pasado y sobre los fenómenos meteorológicos que las producen.

En El Salvador se producen tres tipos principales de lluvias asociadas a otras tantas situaciones climáticas.

- El desarrollo de tormentas locales por movimientos de aire convectivos debidos al calentamiento del aire húmedo del océano a lo largo del día y que en la estación lluviosa (mayo-septiembre) suelen dar como resultado la precipitación de grandes cantidades de agua en poco tiempo o lo que es lo mismo, precipitaciones de alta intensidad.
- Los eventos meteorológicos asociados a la presencia continuada de bajas presiones atmosféricas, situaciones ciclónicas debidas a la zona de convergencia tropical (Perla, Alfaro y Domínguez, 1990), ocasionan periodos de lluvias prolongados en el tiempo, con duraciones de varios días que, en general, ocasionan grandes precipitaciones pero de baja intensidad relativa.
- Además, pueden existir situaciones especiales de circulación transitoria de aire tropical con la formación y entrada de fenómenos ciclónicos generados en el mar Caribe que pueden dar lugar a lluvias intensas durante varios días, como fue el caso del famoso huracán Mitch.

En el presente proyecto se ha realizado un análisis de las precipitaciones que se producen en la zona de estudio en base a datos históricos de lluvia recogida en 5 estaciones incluidas en el área. Los datos de precipitaciones de las cinco estaciones no tienen un registro completo y todas se sitúan en el área norte del volcán por debajo de los 1000 m.s.n.m. Debido a la falta de registro de precipitaciones para cada cuenca, se ha estimado un estudio en conjunto, aunque se conozcan las variaciones que supone la localización latitudinal, altitudinal y la falta de series completas para cada estación.

La falta de una estación de registro situada a una altura superior a los 1000m.s.n.m., hace que los registros analizados sean aproximados pero no característicos de toda el área. Las estaciones de registro son haciendas cafetaleras ubicadas todas en la ladera norte del volcán, única área donde se conservan las plantaciones de café actualmente. PROCAFÉ ha sido la entidad que nos ha proporcionado la mayoría de los registros que van a ser tratados. Los restantes se han conseguido a través del servicio meteorológico del SNET.

Estaciones	m.s.n.m	Coordenadas	
		Latitud Norte	Longitud oeste
<b>San Roberto</b>	660	13°26'13''	88°27'24''
<b>El Guayabal</b>	660	13°26'26''	88°28'20''
<b>San Mauricio</b>	560	13°26'18''	88°29'16''
<b>Sta Petrona</b>	640	13°25'46''	88°27'15''
<b>Santiago de María</b>	930	13°29'	88°28'

Tabla 1- Ubicación de las estaciones con registro de precipitaciones- PROCAFÉ

Toda la información ha sido introducida en una base de datos Excel para su tratamiento posterior. Los datos han sido ordenados en series mensuales para su observación detallada.

Con la intención de comprobar la insuficiencia de los registros de precipitación de las estaciones citadas anteriormente se ha comparado a lo largo del análisis, los registros obtenidos en el análisis de precipitaciones del Proyecto "Manejo integral de Amenazas y Vulnerabilidades en el Municipio de San Miguel" (2001, El Salvador) en el volcán de San Miguel. Por su ubicación próxima al área de estudio, sus características similares en cuanto al contexto geomorfológico puede servir como punto de apoyo, ya que se tienen registradas precipitaciones de estaciones pluviométricas con altitudes superiores a los 1000m.s.n.m.

## Precipitaciones anuales

Las precipitaciones anuales acumuladas recogidas en el periodo de tiempo entre 1957-2001 han sido representadas en el gráfico 1. En él se observa que las precipitaciones anuales oscilan entre los 1600 mm y los 2200 mm en el conjunto de las estaciones. Las

precipitaciones a lo largo del tiempo siguen un patrón oscilante, con máximas en los que se producen lluvias que en algunas estaciones superan la media, considerada 1900mm, con precipitaciones anuales acumuladas superior a los 2500 mm. En 1988 se produce un máximo marcado en las dos estaciones donde se tiene registro de este año con precipitaciones anuales acumuladas de casi los 4000 mm.

Debido a que todas las estaciones están situadas en la falda norte del volcán, a una altura similar y a la falta de registros completos, no se han podido analizar las diferencias existentes por orientación y altura. La serie más continua, Santiago de María, muestra valores más bajos en los años coincidentes con otras estaciones. Esta estación está ubicada a mayor altura pero no en el propio cerro. Se observan diferencias en los registros en lo que respecta a la recogida de datos, ya que registros de una misma estación y mismos años difieren en la cantidad de precipitación anual acumulada. Por tanto, aún siendo ésta la serie de registros más completa, se han considerado, para el análisis estadístico, los registros de las estaciones restantes con valores de precipitaciones más elevados.

Comparando con las estaciones ubicadas en el volcán de San Miguel, en estas se observa una tendencia de aumento a partir de 1994. Las precipitaciones anuales acumuladas para los años 1996 y 1997 son de 5000 a 6000mm. Para estos años, se cuenta únicamente con registros de la estación de Santiago de María, estación donde se observan en general valores más bajos.

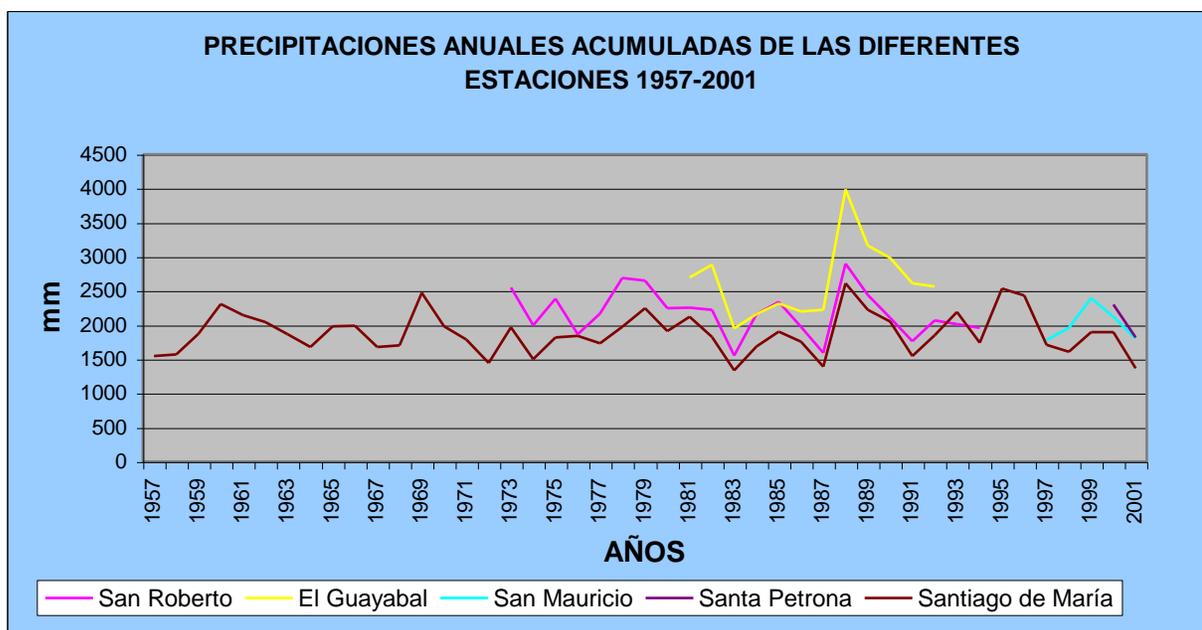


Gráfico 1. Precipitaciones anuales acumuladas de las diferentes estaciones (1957-2001). Fuente de los datos: PROCAFÉ.

## Precipitaciones mensuales

Las precipitaciones mensuales se concentran en la estación húmeda que abarca los meses de Mayo a Noviembre, mientras que en el resto de los meses la precipitación es escasa o nula. En el gráfico 2 se ha representado la distribución de lluvias mensuales para el año 1990 (con una precipitación anual elevada de 2986mm) en la que se observa claramente esta distribución estacional. Se pueden observar dos picos de precipitación en los meses de Mayo y Septiembre. Este comportamiento se repite en la mayoría de los años estudiados, observándose picos también en Junio y Agosto.

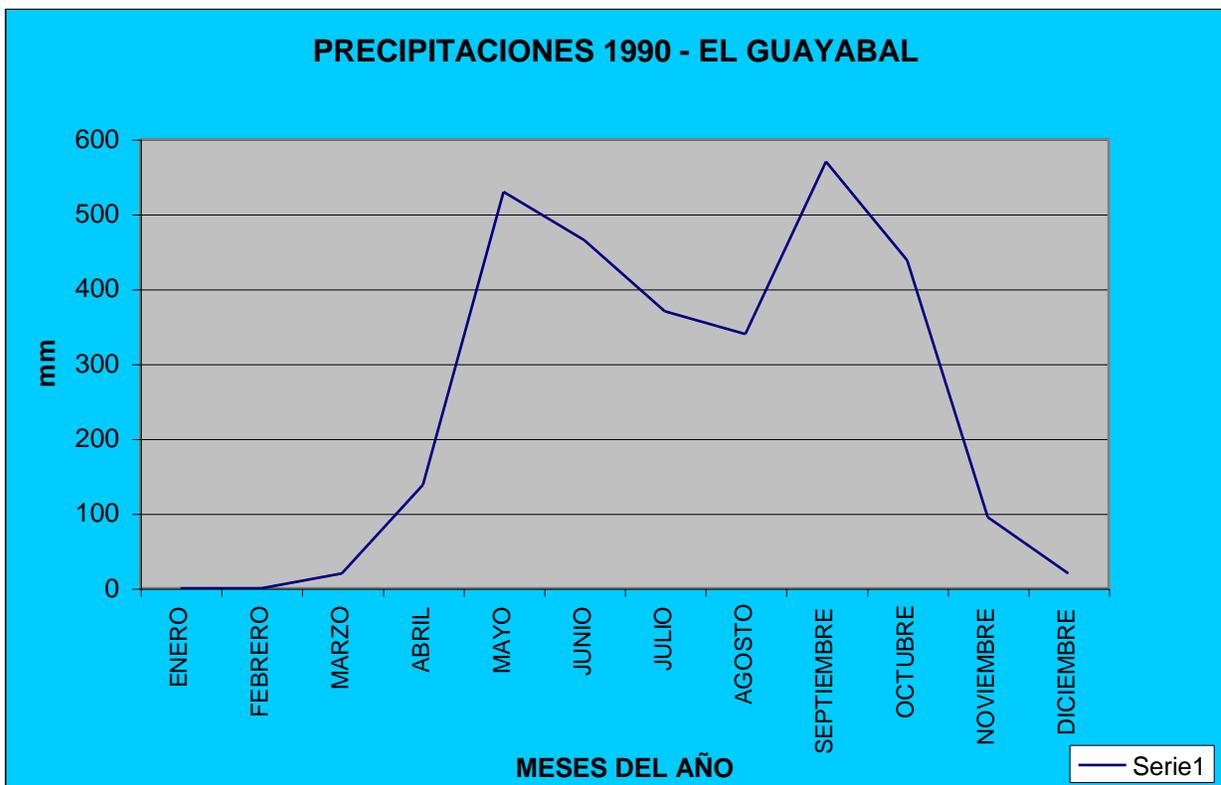


Gráfico 2. Precipitaciones 1990- El Guayabal. Fuente de los datos: PROCAFÉ

Las lluvias recogidas durante los meses más lluviosos oscilan entre los 250mm y 600mm, pudiendo llegar hasta 700, 800, 900 e incluso superiores a 1000mm (para Agosto 1988 y Septiembre de 1989). En los registros de las estaciones del volcán de San Miguel, se obtienen valores similares.

## Precipitaciones diarias

Las precipitaciones diarias, más concretamente su intensidad, son las que van a condicionar la ocurrencia o no de la amenaza de inundaciones y van a determinar su magnitud. Debido a la ausencia de datos disponibles de intensidades horarias se ha recurrido a procesar las precipitaciones diarias acumuladas. Relacionando estas con la tipología de lluvias características de la región y los datos facilitados de forma directa por parte de la población, aunque no de forma tan precisa, se relaciona la lluvia con la ocurrencia de eventos que posibiliten o no la amenaza por inundación y su magnitud.

Las altas acumulaciones diarias de lluvia suelen tener la peculiaridad de estar asociadas a fenómenos tormentosos de gran intensidad, que pueden llegar a precipitar todo el agua en una o dos horas. Esto provoca una situación de aumento repentino de escorrentía superficial que moviliza las masas de terreno en la zona superior. Así pues del estudio estadístico de las máximas lluvias diarias podremos calcular cada cuánto podría repetirse una lluvia de magnitud determinada y así estimar la peligrosidad de desbordamientos e inundaciones que puedan afectar a áreas habitadas.

Se han extraído los datos de las máximas precipitaciones diarias ocurridas en cada uno de los años de las series estudiadas que después serán utilizados en un cálculo estadístico de probabilidad de ocurrencia.

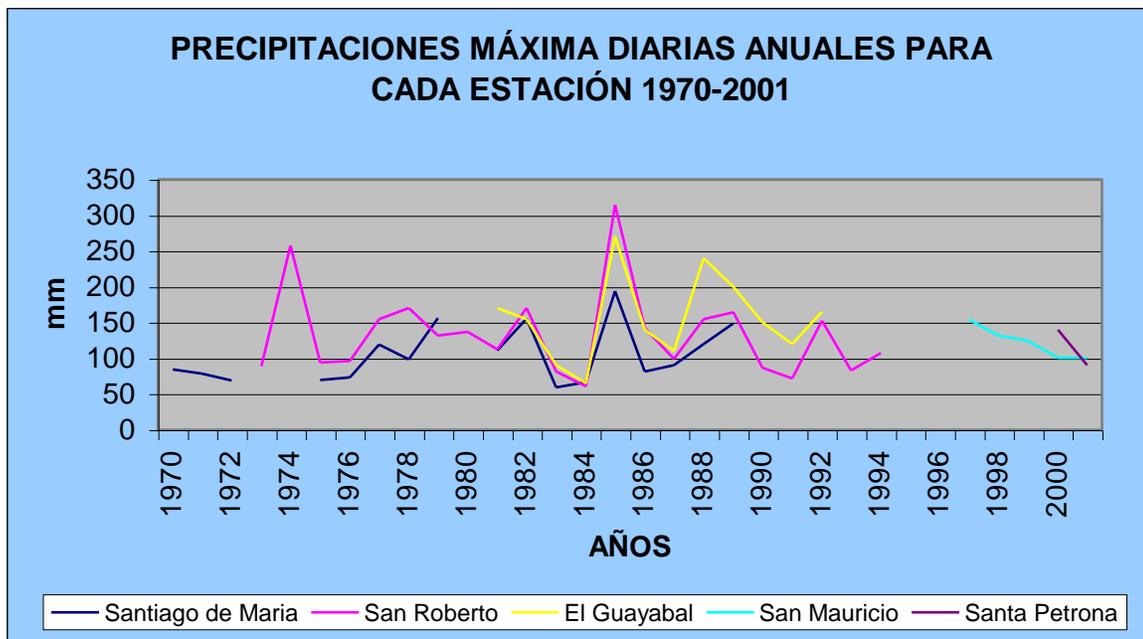


Gráfico 3. Precipitaciones máximas diarias anuales para cada estación 1970-2001. Fuente de datos: PROCAFÉ

En el gráfico 3, se observa un comportamiento cíclico de las precipitaciones máximas en el tiempo, al igual que se observaba en los datos anuales, si bien en los diarios este comportamiento es más marcado. Los ciclos suelen ser de tres a cuatro años con dos o tres años relativamente secos seguidos de un pico de precipitaciones anual. Si se comparan los picos de máximas lluvias anuales y diarias, no se corresponden en su totalidad. Esto puede ser debido a que los fenómenos meteorológicos que dan origen a las lluvias máximas diarias, suelen ser fenómenos de alta intensidad, abundantes y de corta duración. Estos, no son los que siempre aportan la mayoría del volumen de lluvias anual. No obstante son los que a efectos de amenaza de inundaciones más interesa conocer y predecir.

ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS – PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS ANUALES (mm)					
AÑOS	Santiago de Maria	San Roberto	El Guayabal	San Mauricio	Santa Petrona
1970	84.2				
1971	78.2				
1972	69.1				
1973		89			
1974		257.8			
1975	69.6	94			
1976	73	96			
1977	119	155			
1978	98.3	170			
1979	156.3	132			
1980		136.8			
1981	111	112.6	170		
1982	155.3	170	155		
1983	59.4	81.5	90		
1984	66.6	60.5	65		
1985	194.1	314.2	270		
1986	81.6	142	140		
1987	90.3	99	110		
1988	119.6	154.8	240		
1989	148.7	164	200		
1990		86.5	150		
1991	76.4	71.5	120		
1992		152.2	165		
1993		83.2			
1994		107.2			
1995					
1996					
1997				154	
1998				132	
1999				124	
2000				101	140
2001				100.8	90

Tabla 2. Precipitaciones máximas diarias anuales para las diferentes estaciones (1970-2001). Fuente de datos: PROCAFÉ

En la tabla 2 se muestra en detalle la serie registrada de 1970-2001, siendo la máxima de 314mm (amarillo) en noviembre de 1985, seguido de 257.8mm en Septiembre de 1974.

A principios de la estación lluviosa del 2001, hubo inundaciones en los tres municipios. Las lluvias para todo el periodo de la estación lluviosa fueron inferiores a 100mm/día. Las condiciones de la quebrada del año 2001 al 2002 apenas han variado, considerando que para la recuperación de una quebrada, en cuanto a evacuar el material en cauce, se ha estimado en un periodo mínimo de cinco años, periodo que va a depender del régimen de precipitaciones que se de durante estos años, pudiéndose alargarse si las estaciones lluviosas tienden a ser de precipitaciones de baja intensidad y escasas. (Ver apartado 10.2.3.).

Estos registros, nos indican a priori una alta probabilidad de que puedan producirse inundaciones en la zona, ya que en 21 de los 30 años la precipitación diaria máxima anual es igual o superior a 100mm, siempre dependiendo de la intensidad con la que sucedan estas lluvias. En muchos de los años donde se iguala o supera los 100mm existen lluvias cercanas o superiores a este valor, caídas con frecuencia a finales de la estación lluviosa donde el suelo está más saturado y con menos capacidad de infiltración. Por tanto, en un 70% de los años se alcanza este umbral de precipitación que en la actualidad puede provocar inundaciones y avenidas más importantes.

Las máximas precipitaciones diarias para el volcán de San Miguel se alcanzaron en 1985 y en 1998 superándose el umbral de los 400 mm en varias estaciones del área. Estos registros pueden mostrarnos la posibilidad de que se cuadruple los 100mm de lluvia que en su momento causó estragos a la población.

### **Análisis probabilístico de ocurrencia de precipitaciones**

Con objeto de estimar la probabilidad de ocurrencia de lluvias en la zona de estudio se han analizado las series de precipitaciones máximas diarias anuales, únicos datos disponibles y que pueden proporcionar información en este tipo de fenómenos.

En su estudio se requiere que la serie posea una extensión mínima, considerándose ésta del orden de 20 años de registro, con el objeto de que los datos obtenidos en el análisis estadístico sean lo más precisos posible (Ferrer, 1993, Ferrer y Ardiles, 1995). Para poder tratar este mínimo de años, se han utilizado los datos de precipitación máxima diaria recogidos durante los últimos 30 años (1970-2001-serie incompleta) de las cinco estaciones, para conseguir una serie continua.

A partir de la función de distribución de Gumbel se han obtenido los cuantiles (periodos de retorno T) correspondientes a las precipitaciones máximas. La distribución de Gumbel obtiene buenos resultados para el estudio de frecuencias de valores extremos. Se han

calculado las precipitaciones tipo para diferentes periodos de retorno, que se reflejan el siguiente cuadro:

PRECIPITACIÓN TIPO (mm)	PERIODO DE RETORNO (años)
128.5	2
177.6	5
210.2	10
251.3	25
281.8	50
312	100
382	200
412	500

Tabla 2- Relaciones precipitaciones tipo y periodos de retorno.

Según la observación de las distribuciones probabilísticas de otros estudios realizados, la función de distribución Gumbel refleja mal los periodos de retorno a partir de los 25 años, infravalorando los resultados de las precipitaciones. Las funciones que mejor reflejan estos eventos extraordinarios sin amplificar el periodo de retorno son GEV y SQRT-ET máx. Comparando con los resultados obtenidos en el análisis probabilístico con los del estudio hidrológico de “Manejo integral de Amenazas y Vulnerabilidades en el Municipio de San Miguel”, se observan unos resultados similares para los periodos de retorno 2, 5, 10 y 25 con la distribución de GEV. Para periodos de retorno superiores a 25 años, se observan valores mayores. Para 50, 100, 200 y 500 corresponden valores de 400, 500, 700 y entre 800-900mm respectivamente.

Para un periodo de retorno de 2 años las lluvias pueden superar los 128.5mm, lo que indica que existe una probabilidad del 50% en un año, de que se produzcan precipitaciones superiores a 128.5mm en un día.

Para los periodos de retorno de 5,10 y 25 años, considerados como valores válidos para la distribución de Gumbel, con probabilidad de que ocurran en un año del 20, 10 y 4% respectivamente, la ocurrencia de precipitaciones que puedan producir avenidas e inundaciones en el área, en las condiciones actuales en las que se encuentran las quebradas y siempre dependiendo de las intensidades de las lluvias es alta.

## 10.2.2. Estudio hidrometeorológico

La determinación del nivel alcanzado por las aguas de un cauce para diversos periodos de retorno requiere de la realización de un estudio hidrológico previo, cuyo objeto es la obtención de los caudales máximos correspondientes a dichos periodos de retorno.

Para la estimación de los caudales se han utilizado datos pluviométricos, en concreto el parámetro  $P_d$  (precipitación máxima diaria). Transformando la precipitación máxima diaria en intensidades y determinando el coeficiente de escorrentía a partir de los datos físicos de la cuenca, podemos determinar el caudal asociado a los periodos de retorno establecidos.

Dentro del estudio hidrometeorológico se han desarrollado las diferentes fases:

- Delimitación de las tres subcuencas.
- Intensidad de lluvia.
- Determinación del coeficiente de escorrentía.
- Determinación de los caudales asociados con un periodo de retorno concreto.

### **Delimitación de las subcuencas El Cargadero, La Quebradona y California Características morfológicas**

La delimitación de la subcuencas El Cargadero, La Quebradona y California se ha realizado mediante el SIG (mapa n°6 "Redes de drenaje".anexo2), a escala base 1:25.000. En el capítulo 8 están detalladas las delimitaciones de las cuencas, así como otros factores físicos condicionantes para el análisis de peligrosidad por inundación.

### **Intensidad de lluvia**

Para la estimación de la intensidad de lluvia ( $I$ ) en las subcuencas se ha utilizado la metodología expuesta por Témez (1987), adoptando las expresiones expuestas en dicha publicación, junto con los tiempos de concentración  $T_c$ , estimados para cada cuenca.

Para obtener las entradas de precipitación a la cuenca es preciso tratar la información meteorológica disponible. La serie utilizada refleja las precipitaciones máximas diarias recogidas en las estaciones pluviométricas que anteriormente se han tratado estadísticamente, obteniendo los diferentes periodos de retorno.

Así, se ha obtenido un valor final de precipitación en 24 horas para las subcuencas y para cada periodo de retorno. Este valor debe posteriormente ser convertido a intensidad de lluvia.

Para la estimación de  $I = I_t$ , intensidad de lluvia en el tiempo  $t$ , que será la intensidad determinante del caudal punta, se utiliza la expresión:

$$I/I_d = (11 - I_d) (28^{0.1} - T_c^{0.1}) / (28^{0.1} - 1) \quad (a)$$

Esta expresión se propone como universal para cualquier curva "intensidad-duración", es decir, la curva resultante de unir puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno.

Esta ley, debido a su carácter adimensional, es independiente de los valores absolutos de la lluvia, lo cual permite su aplicación a cualquier período de retorno, e incluso extrapolar eligiendo como valor de referencia el relativo a lluvia diaria:

$$I = P / 24 \quad (b)$$

I = intensidad de precipitación (mm/h) asociada a intervalos de duración D (h).

P = precipitación máxima diaria (mm)

P se obtiene a partir de la expresión  $P = P_d \times ARF$ , siendo:

$P_d$  = la máxima precipitación diaria, obtenida para la subcuenca y para cada uno de los periodos de retorno considerados.

ARF: es un coeficiente reductor dependiente del área de la cuenca, el cual se calcula a partir de la expresión:

$$ARF = 1 - \log A / 15$$

donde A es el área de la cuenca ( $Km^2$ )

El cociente  $I_1/I_d$ , relación entre la intensidad horaria y diaria, es un parámetro característico de cada región, independiente del período de retorno y se ha estimado un valor de 11 para el área de estudio, en base a la comparación con los valores utilizados en las áreas más lluviosas de la Península Ibérica. Este valor es apropiado para regímenes donde la lluvia cae de manera intensa en pocas horas.

Uno de los factores fundamentales que influyen de forma decisiva en el proceso de inundación es el tiempo de concentración,  $T_c$ . Este factor depende de las características físicas de la cuenca, y se define como el tiempo necesario que tarda una gota de agua, que cae en el punto más alejado de la cuenca, en llegar al lugar de salida, siguiendo el curso de los cauces superficiales (BENITEZ, 1972).

## Tiempo de Concentración

El tiempo de concentración es característico de cada cuenca y, por tanto, independiente de la configuración y magnitudes del aguacero. Este tiempo ha sido calculado para la estimación de caudales líquidos, es decir en el supuesto de que no existiera carga sólida sólo bajase agua por los cauces utilizando varias fórmulas para determinar cuál se adapta mejor.

**fórmula de Témez:**  $T_c = 0,3 ( L / J^{1/4} )^{0,76}$

**fórmula desarrollada para El Salvador:**  $T_c = \frac{\sqrt{A} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H_{\max} - H_{\min}}}$

**Giandotti:**  $T_c = (4 \cdot \sqrt{A} + 1.5L) / (0.8 \cdot \sqrt{H})$   
**En cuencas menores de 50km<sup>2</sup>:**  $T = ((0.871 \cdot L^3) / H)^{0.385}$

T<sub>c</sub> = Tiempo de concentración (h)

L= Longitud del cauce principal en km

J= Pendiente media del curso principal

H<sub>max</sub> , H<sub>min</sub> = H; son los desniveles máximo y mínimo de la cuenca.

S = superficie de la cuenca en km<sup>2</sup>

Cuencas	Cargadero	Quebradona	California
<b>Tc Temez</b>	1.11	1.17	0.64
<b>Fórmula el Salvador</b>	0.25	0.28	0.13
<b>Tc Giandotti</b>	0.39	0.45	0.29
<b>Tc cuencas &lt; 50km<sup>2</sup></b>	0.25	0.31	0.16

Tabla3- Tiempos de concentración

De entre las fórmulas con valores más próximos, la fórmula desarrollada para El Salvador, basada en la fórmula de Giandotti, con la variación de restarle importancia al área por tratarse de cuencas pequeñas, es junto con las expresiones (a) y (b) la utilizada para deducir la intensidad de lluvia, en cada subcuenca, para los diferentes períodos de retorno.

Para poder calcular el caudal asociado a la intensidad de lluvia mediante el método de caudales máximos es necesario conocer la lluvia neta que pasará a formar parte de la escorrentía superficial.

## Determinación del coeficiente de escorrentía

Para conocer la lluvia neta que pasará a formar parte de la escorrentía superficial, se calcula el coeficiente de escorrentía, dependiente de la precipitación y de las llamadas abstracciones iniciales, o cantidad de agua que va a ser retenida, y por lo tanto, no es efectiva para producir caudales. Para estimar este parámetro se debe contemplar, no sólo las características físicas de la cuenca, sino también el punto de vista climático.

Si contemplamos el factor climático, es decir, los regímenes de precipitaciones anuales, en termino medio, son abundantes, se caracterizan por concentrarse en los meses de Mayo-Octubre, y suelen ser intensas. Durante la estación lluviosa, buena parte del agua de precipitación no tiene la posibilidad de infiltrarse, ya que con lluvias continuas e intensas el suelo queda saturado impidiendo que la infiltración sea efectiva. Esto hace que se haya decidido plantear dos escenarios para el cálculo de del coeficiente de escorrentia, ya que este va a depender de la capacidad máxima de retención. Escenario en condiciones de saturación del suelo y de no saturación del suelo. Obteniendo dos coeficientes de escorrentia, obtendremos dos caudales punta diferentes según las condiciones en las que se produzcan las precipitaciones, en suelo seco, finales de la estación seca, o en suelos saturados, durante o después de la estación lluviosa.

Para condiciones de suelo totalmente seco, Según LÓPEZ CADENAS Y MINTEGUI (1986), “ ante cualquier aguacero, inicialmente, la capacidad de infiltración es alta, pero en poco tiempo sufre un descenso rápido debido al efecto combinado de una serie de factores: La compactación de la superficie por el impacto de las gotas, el taponamiento de huecos por las partículas terrosas que transporta el agua al escurrir por la superficie, el cierre de las grietas superficiales y el incremento del contenido de humedad del suelo que lleva consigo una notable reducción de las fuerzas capilares cuya succión hace descender las aguas. Esto supone que la capacidad de infiltración disminuye muy rápidamente en condiciones de sequedad extrema, como al final de la estación seca o condiciones de sequía.

En condiciones donde el suelo ha superado su capacidad de almacenaje, se genera un importante escurrimiento. Es una situación habitual a finales de la estación lluviosa donde pueden producirse situaciones especiales de circulación transitoria de aire tropical con la formación y entrada de fenómenos ciclónicos generados en el mar Caribe, que pueden dar lugar a lluvias intensas durante varios días, como fue el caso del famoso huracán Mitch. En estas épocas el suelo está saturado en extremo y cada pequeño aguacero, aún sin ser torrencial, produce importantes ondas de avenidas. En estos tipos de aguacero pueden generarse inestabilidades en la ladera y posibles modificaciones de los cauces.

Para poder definir los factores que influyen en la determinación del coeficiente de escorrentia, nos basamos en los dos escenarios anteriormente citados. En el primer

escenario, las precipitaciones se dan de manera más moderada, donde el suelo no se encuentra saturado pero tampoco reseco por fuertes sequías, correspondiendo con el inicio de la estación lluviosa. El coeficiente de escorrentía resultante varía en un intervalo, del que se ha tomado el valor menos favorable con respecto a la infiltración para la estimación del caudal asociado a las lluvias anteriormente calculadas para los diferentes periodos de retorno. El segundo escenario muestra condiciones que reflejan los periodos finales de la estación de lluvias, donde el suelo se encuentra saturado y su capacidad de infiltración es muy poca o nula. Bajo estas condiciones, unas precipitaciones de fuerte intensidad provocarían un coeficiente de escorrentía muy alto.

Con la finalidad de obtener las condiciones que pueden dar lugar a problemáticas, hemos tomado como coeficientes, los valores más altos de los intervalos para el cálculo de caudales, reflejando así, las condiciones más perjudiciales en lo que respecta a las inundaciones que pueden darse en la parte baja de las cuencas. A continuación se muestra la tabla de factores determinantes para el cálculo del coeficiente de escorrentía.

<b>Relieve del terreno</b>	Muy accidentado, pendientes superiores al 30%	Muy accidentado, pendientes superiores al 30%
<b>Permeabilidad del suelo</b>	Bastante permeable	Bastante permeable
<b>Vegetación</b>	Bastante. Hasta el 50% de la superficie	Bastante. Hasta el 50% de la superficie
<b>Capacidad de Almacenaje de agua</b>	Bastante	Nula
<b>Coeficiente de Escorrentía</b>	0,5 – 0.65	0.65 - 0,80

Tabla 4 Valores del coeficiente de escorrentía. Utilizados por la Instrucción de Carreteras Españolas.

### Determinación de los caudales asociados a un periodo de retorno concreto

Una vez calculado el coeficiente de escorrentía, podemos pasar a calcular los caudales asociados a las lluvias máximas de un periodo de retorno determinados, mediante el método Racional, modificado por Témex en 1987, con la expresión:

$$Q = (C I A / 3.6) K$$

- Q; caudal punta en m<sup>3</sup>/s  
 I; intensidad máxima media en el intervalo T<sub>c</sub> (mm/h)  
 A; superficie de la cuenca (Km<sup>2</sup>)  
 C; coeficiente de escorrentía  
 K; coeficiente de uniformidad

El Coeficiente de Uniformidad K. varía de unos episodios lluviosos a otros, pero su valor medio en una cuenca determinada depende fundamentalmente de su tiempo de concentración, y además de forma tan prevalente que a efectos prácticos puede despreciarse la influencia de las restantes variables tales como la torrencialidad del clima, etc. Para su estimación, en valores medios, se aplica la expresión:

$$K = 1 + (T_c^{1.25} / T_c^{1.25} + 14)$$

## Quebrada El Cargadero

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	ARF	Precipitación Corregida = Pd*ARF (mm)	Tc (h)	$I_1/I_d$	$I_2/I_d$	$I_d = P/24$	$I = I_d * 14.43$	Area Km <sup>2</sup>	Coefficiente de escorrentia C	K	Método Racional Caudal Q (m3/s)
2	128.5	0.988	126.9	0.25	11	14.43	5.29	76.35	1.49	0,65	1.025	20.8
2	128.5	0.988	126.9	0.25	11	14.43	5.29	76.35	1.49	0.80	1.025	25.6
5	177.6	0.988	175.5	0.25	11	14.43	7.31	105.48	1.49	0,65	1.025	29.1
5	177.6	0.988	175.5	0.25	11	14.43	7.31	105.48	1.49	0.80	1.025	35.8
10	210.2	0.988	207.7	0.25	11	14.43	8.65	124.82	1.49	0,65	1.025	34.5
10	210.2	0.988	207.7	0.25	11	14.43	8.65	124.82	1.49	0.80	1.025	42.4
25	251.3	0.988	248.3	0.25	11	14.43	10.3	148.63	1.49	0,65	1.025	41
25	251.3	0.988	248.3	0.25	11	14.43	10.3	148.63	1.49	0.80	1.025	50.4
50	281.8	0.988	278.4	0.25	11	14.43	11.6	167.39	1.49	0,65	1.025	46.2
50	281.8	0.988	278.4	0.25	11	14.43	11.6	167.39	1.49	0.80	1.025	56.8
100	312	0.988	308.3	0.25	11	14.43	12.8	184.7	1.49	0,65	1.025	50.9
100	312	0.988	308.3	0.25	11	14.43	12.8	184.7	1.49	0.80	1.025	62.6
200	382	0.988	377.4	0.25	11	14.43	15.7	226.55	1.49	0,65	1.025	62.5
200	382	0.988	377.4	0.25	11	14.43	15.7	226.55	1.49	0.80	1.025	76.9
500	412	0.988	407.1	0.25	11	14.43	16.9	243.87	1.49	0,65	1.025	67.2
500	412	0.988	407.1	0.25	11	14.43	16.9	243.87	1.49	0.80	1.025	82.8

Tabla 5-Obtención de caudales punta a partir de periodos de retorno de las precipitaciones máximas diarias anuales. Quebrada El Cargadero.

## Quebrada La Quebradona

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	ARF	Precipitación Corregida = Pd*ARF (mm)	Tc (h)	$I_1/I_d$	$I_t/I_d$	$I_d = P/24$	$I = I_d * 14.16$	Area $Km^2$	Coefficiente de escorrentia C	K	Método Racional Caudal Q (m3/s)
2	128.5	0.974	125.2	0.28	11	14.16	5.2	73.63	2.42	0.65	1.014	32.6
2	128.5	0.974	125.2	0.28	11	14.16	5.2	73.63	2.42	0.80	1.014	40.2
5	177.6	0.974	173	0.28	11	14.16	7.2	101.95	2.42	0.65	1.014	45.2
5	177.6	0.974	173	0.28	11	14.16	7.2	101.95	2.42	0.80	1.014	55.6
10	210.2	0.974	204.7	0.28	11	14.16	8.5	120.36	2.42	0.65	1.014	53.3
10	210.2	0.974	204.7	0.28	11	14.16	8.5	120.36	2.42	0.80	1.014	65.6
25	251.3	0.974	244.5	0.28	11	14.16	10.2	144.43	2.42	0.65	1.014	64
25	251.3	0.974	244.5	0.28	11	14.16	10.2	144.43	2.42	0.80	1.014	78.8
50	281.8	0.974	274.5	0.28	11	14.16	11.4	161.42	2.42	0.65	1.014	71.5
50	281.8	0.974	274.5	0.28	11	14.16	11.4	161.42	2.42	0.80	1.014	88
100	312	0.974	303.9	0.28	11	14.16	12.7	179.83	2.42	0.65	1.014	79.7
100	312	0.974	303.9	0.28	11	14.16	12.7	179.83	2.42	0.80	1.014	98.1
200	382	0.974	372.1	0.28	11	14.16	15.5	219.48	2.42	0.65	1.014	97.24
200	382	0.974	372.1	0.28	11	14.16	15.5	219.48	2.42	0.80	1.014	119.7
500	412	0.974	401.3	0.28	11	14.16	16.7	236.47	2.42	0.65	1.014	104.8
500	412	0.974	401.3	0.28	11	14.16	16.7	236.47	2.42	0.80	1.014	128.9

Tabla 6- Obtención de caudales punta a partir de periodos de retorno de las precipitaciones máximas diarias anuales. Quebrada La Quebradona.

## Quebrada California

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	ARF	Precipitación corregida = Pd*ARF (mm)	Tc (h)	$I_1/I_d$	$I_t/I_d$	$I_d = P/24$	$I = I_d * 15.95$	Area Km <sup>2</sup>	Coeficiente de escorrentia C	K	Método Racional Caudal Q (m3/s)
2	128.5	1.01	129.8	0.13	11	15.95	5.4	86.13	0.74	0,65	1.005	11.57
2	128.5	1.01	129.8	0.13	11	15.95	5.4	86.13	0.74	0.80	1.005	14.2
5	177.6	1.01	179.4	0.13	11	15.95	7.47	119.15	0.74	0,65	1.005	16
5	177.6	1.01	179.4	0.13	11	15.95	7.47	119.15	0.74	0.80	1.005	19.7
10	210.2	1.01	212.3	0.13	11	15.95	8.8	140.36	0.74	0,65	1.005	18.9
10	210.2	1.01	212.3	0.13	11	15.95	8.8	140.36	0.74	0.80	1.005	23.2
25	251.3	1.01	253.8	0.13	11	15.95	10.6	169.07	0.74	0,65	1.005	22.7
25	251.3	1.01	253.8	0.13	11	15.95	10.6	169.07	0.74	0.80	1.005	27.9
50	281.8	1.01	284.6	0.13	11	15.95	11.9	189.8	0.74	0,65	1.005	25.48
50	281.8	1.01	284.6	0.13	11	15.95	11.9	189.8	0.74	0.80	1.005	31.4
100	312	1.01	315	0.13	11	15.95	13.1	208.94	0.74	0.65	1.005	28.1
100	312	1.01	315	0.13	11	15.95	13.1	208.94	0.74	0.80	1.005	34.5
200	382	1.01	385.8	0.13	11	15.95	16.1	256.79	0.74	0.65	1.005	34.5
200	382	1.01	385.8	0.13	11	15.95	16.1	256.79	0.74	0.80	1.005	42.4
500	412	1.01	416	0.13	11	15.95	17.3	275.93	0.74	0.65	1.005	37.1
500	412	1.01	416	0.13	11	15.95	17.3	275.93	0.74	0.80	1.005	45.6

Tabla 7- Obtención de caudales punta a partir de periodos de retorno de las precipitaciones máximas diarias anuales. Quebrada California.

## Estimación del Caudal máximo soportable

Para poder analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca, determinamos en diferentes secciones su capacidad o caudal máximo soportable. El cálculo del caudal máximo soportable es fundamental para estimar la inundabilidad de los terrenos próximos. En cauces encajados, este valor puede alcanzar límites improbables, sin embargo, en áreas menos encajadas, donde se pierden los taludes laterales de los cauces, como en llanuras de inundación, la probabilidad de que una avenida ocupe de nuevo estas áreas deposicionales permanece latente.

Para su cálculo se utiliza fórmula propuesta por MANNING

$$Q = S \cdot R^{0.67} \cdot i^{0.5} / n$$

S; sección mojada del cauce en m<sup>3</sup>

R; radio hidráulico (m)

I; pendiente del lecho del río en m/m

n; coeficiente de rugosidad de Manning

En las salidas de campo realizadas durante el periodo de elaboración del mapeo, se han realizado varios perfiles a lo largo de las quebradas donde además de medidas geométricas del cauce se han anotado características del lecho y sus alrededores.

Las capacidades máximas soportables analizadas en las secciones donde el cauce se encuentra encajado, son mayores que los caudales estimados a partir de la ecuación del método racional. En estas secciones se ha estimado el coeficiente de Manning como 0.05 asociado a ríos de montaña con lecho de gravas o cantos y algunos bloques y 0.07 para lecho con abundantes piedras y grandes bloques.

La estimación de las capacidades máximas en las partes altas de cauce, tenía la finalidad principalmente de calcular mediante marcas de erosión, depósitos de terrazas, etc, el caudal máximo que habían transportado las aguas el último invierno. Las posibles variaciones de la sección, por encajamiento o deposición de flujos posteriores al caudal máximo que se quiere calcular, hace que estos valores puedan dar caudales erróneos, ya que una variación, por pequeña que sea de la sección del cauce, hace variar notablemente el caudal calculado.

Estimado únicamente el caudal líquido, habría que añadirle la carga sólida que estos pueden transportar. Estimado el volumen de material en forma de depósitos de inestabilidades, terrazas y depósitos torrenciales que se encuentra en el cauce (capítulo 9.1.3) podemos pensar que la carga sólida que transporta es importante. Por tanto, a los caudales líquidos hay que sumarle el volumen de material potencialmente susceptible de ser

transportado. Este volumen va a depender principalmente de las intensidades de las precipitaciones y del momento en que se den en cuanto a saturación del suelo.

En las primeras lluvias de este año, 2002, 6 de los 17 gaviones ubicados en la parte alta del cauce de la quebrada *El Cargadero* han quedado azolvados, estimado el volumen del material en 1000m<sup>3</sup>, de los 6000m<sup>3</sup> capaces de retener por el total de los gaviones. Estimados durante la realización de este proyecto 18.000m<sup>3</sup> de material susceptibles de ser transportado, únicamente una tercera parte del material estimado quedará retenido por los gaviones.

La problemática se observa en la parte más baja de los cauces, a partir del fuerte cambio de pendiente, donde los cauces, consecuencia de esta cambio brusco pierden su capacidad erosiva y de transporte dejando de encajarse y perdiendo los taludes. (ver apartado 10.1)

La estimación de los caudales máximos soportables en las secciones calculadas a partir de este punto, varían sustancialmente. Como secciones para cada quebrada, hemos seleccionado algunos de los puntos críticos donde se podían tomar medidas, ya que en varios puntos contiguos a estas, la pérdida de taludes hacia imprecisas tales mediciones. Cabe destacar, que las secciones han sido medidas después de haber sufrido un cambio sustancial debido a los procesos que de erosión y sedimentación que tuvieron lugar el año 2001, año donde tuvieron lugar dos terremotos y una continua sismicidad que aunque la estación de lluvias fuera escasa, la intensidad de las precipitaciones fue importante.

Cuencas	Secciones	S (m <sup>2</sup> )	R (m)	i (m/m)	n	Q (m <sup>3</sup> )
<b>El Cargadero</b>	Sección1- Casa familia Ribas	12.32	1.12	0.069	0.04	87.72*
	Sección2- Puente, crta. a Santiago de Maria	7.4	0.536	0.057	0.03	38.85
	Sección3- Casco Urbano	12.75	1.17	0.049	0.03	104.5
<b>La Quebradona</b>	seccion1- Antes del Perol	11	1.17	0.08	0.04	86.4
	seccion2- Casa los Perol	4.2	0.45	0.066	0.04	15.8
	seccion3- Cañeria	16.5	1.18	0.05	0.04	103
<b>California</b>	seccion1- Vertedero	2.3	0.65	0.06	0.03	21.1

Tabla 8-Estimación caudales máximos soportables. \* Cauce ensanchado con taludes poco definidos.

Teniendo en cuenta que los datos no son del todo representativos, por la falta de series continuas y representativas de registros de las estaciones pluviométricas, debido a las variaciones de las secciones de los cauces por encajamiento o deposición, por falta de datos de aforos para el cálculo de la escorrentia superficial no podemos afirmar si la capacidad de la quebrada soporta o no el caudal líquido esperado.

Dadas estas carencias de registros, los valores obtenidos son aproximaciones de lo que podría esperarse. Podríamos decir que varias de las secciones que se reflejan en la tabla 8 soportarían los caudales líquidos esperados según el cálculo realizado a partir de las lluvias máximas en los periodos de retorno relativamente altos. Pero queda sumar a estos caudales el importante aporte de material que las quebradas arrastran en su recorrido. La carga sólida transportada por el caudal líquido ocupa un volumen importante que no se ha podido estimar. Las evidencias del transporte de material se pueden ver en muchos de los puntos a lo largo de las quebradas, donde los bloques en ocasiones superan los dos metros de diámetro, importante carga de bloques de menores dimensiones y aporte de troncos, que además de ocupar el volumen del cauce, lo taponan produciendo presas naturales, desbordamientos e inundaciones.

La sección 2 de la quebrada *El Cargadero*, correspondiente a la sección del puente de la carretera que va a Santiago de María desde la Litoral, es uno de los puntos críticos de esta quebrada. Su sección es insuficiente para los caudales líquidos estimados para los periodos de retorno igual o superior a 10 años, es decir, existe un 10% de probabilidad en un año de que la sección no soporte el caudal esperado, más aún si la carga sólida es importante, como sucede con especial importancia después de los sucedidos terremotos del 2001. La carga sólida de mayores dimensiones taponan la sección haciendo que el caudal que fluye por la quebrada se vea obligado a desbordarse, pasando por encima de la carretera y poniendo en peligro las viviendas ubicadas próximas a la quebrada. Secciones contiguas a esta, en quebradas no tan evolucionadas, presentan capacidades insignificantes para los caudales líquidos y con carga sólida que estas transportan.

Las secciones mostradas de la quebrada *La Quebradona*, también presentan una variabilidad importante. Puede observarse, la capacidad en puntos relativamente cerca de diferentes secciones, donde la capacidad soportable de la quebrada varía de un 50% hasta un 2% de probabilidad de que no soporte el caudal líquido esperado. Sumado a la importante carga sólida transportada principalmente durante las lluvias intensas, la capacidad de la quebrada disminuye, siendo insuficiente en varios de sus puntos donde se encuentran ubicados caseríos.

La sección 1 de la quebrada *California*, de escasa capacidad, representa una situación más que habitual, pasado el cambio de pendiente. La probabilidad de que la quebrada no soporte el caudal líquido esperado supera el 50% en un año. La poca definición del cauce provoca una desviación de este, fluyendo por el camino que se dirige al casco urbano, reteniendo parte de la carga sólida, por un portón que queda en la calle.

Estimado para cada quebrada el importante aporte de material (capítulo 9.1.3), las capacidades de los cauces se ven reducidos e insuficientes, una vez pasado el cambio brusco de pendiente, donde las quebradas pierden sus taludes, su capacidad de erosión y de

transporte de material. Por tanto, dadas las condiciones de las quebradas actualmente, la probabilidad de que vuelvan a repetirse inundaciones aún con precipitaciones escasas es muy elevada.

### **10.2.3. Mapa de áreas inundables**

---

La capacidad de los cauces, determinados los caudales líquidos asociados a los periodos de retorno de las precipitaciones máximas diarias anuales, ha sido determinada como insuficiente en diferentes puntos a lo largo de la parte baja de las quebradas. El importante aporte de carga sólida que transportan los flujos principalmente asociados a periodos de continuas lluvias o fuertes intensidades, hace aumentar en estas áreas la susceptibilidad al desbordamiento e inundaciones.

Con la finalidad de determinar un grado de amenaza asociado a los diferentes factores que desencadenan la amenaza por avenidas e inundaciones, se han determinado dos grandes escenarios partiendo del factor desencadenante principal, la sismicidad. Incluidos en estos escenarios, se asocian los diferentes regímenes de precipitaciones.

#### **Determinación de los Escenarios**

Para determinar las diferentes amenazas y áreas de posible afectación, se han caracterizado dos escenarios basados en las condiciones de sismicidad que determinan la cantidad de material susceptible de ser transportado.

Se consideran escenarios en condiciones de terremoto, aquellos comprendidos en un periodo mínimo de cinco años tras la ocurrencia de un terremoto. Este periodo ha sido estimado como el tiempo de recuperación de las quebradas para evacuar el material aportado al cauce por inestabilidades consecuencia de los sismos. Este periodo va a depender del régimen de precipitaciones comprendido en este intervalo. Por tanto, los escenarios determinados como “no” terremotos, son aquellos en los cuales no ha ocurrido un terremoto en un periodo mínimo de cinco años, tiempo en el cual el aporte de material en cauce ha disminuido considerablemente.

Para cada escenario, se determina la magnitud de la amenaza con respecto al régimen de precipitaciones característico de las estaciones lluviosas: secas, normales y copiosas. Teniendo en cuenta que las precipitaciones sufren fuertes oscilaciones en cuanto a la distribución y a la intensidad dentro de una misma estación lluviosa, se han definido unos parámetros con la finalidad de determinar el grado de amenaza para cada estación.

Se entiende por invierno seco, aquel en el que la precipitación total anual es menor de 2000mm y en el que la relación entre intensidad horaria y diaria de las precipitaciones es baja, es decir, las precipitaciones se distribuyen uniformemente en el tiempo, sin dar lugar a fuertes tormentas. Si las intensidades en un invierno seco fueran altas, la amenaza considerada bajo estas circunstancias aumentaría de grado. El efecto de “El Niño” y “La Niña”, ocasiona un retraso en la aparición de la estación lluviosa pero un elevado registro de precipitaciones respecto a las medias anuales, por lo que la apariencia de un invierno seco puede traducirse en tormentas tropicales concentradas en pocos meses. El efecto de sequía ocasionado por el retraso en la aparición de las lluvias ocasiona importantes volúmenes de agua en forma de escorrentía superficial (Ver apartado 10.2.2.) ocasionando un aumento del grado de amenaza.

Se entiende por invierno normal, aquel en el que la precipitación total anual ronda los 2.500mm y en los que las intensidades de las precipitaciones son de moderadas a altas. En estos escenarios, la capacidad de infiltración del suelo disminuye a medida que avanza la estación, generando volúmenes de escorrentía elevados.

Se entiende por invierno copioso, aquel en el que la precipitación total anual es mayor de 2.500mm y en los que las precipitaciones se distribuyen con elevadas intensidades. La acumulación de las sucesivas lluvias sumado a las elevadas intensidades da lugar a un terreno donde la capacidad de infiltración puede ser poca o nula, por tanto, se genera un volumen de escorrentía similar a la cantidad de agua precipitada. La formación de huracanes, característico de los climas tropicales, coincide con el primer máximo de precipitaciones, en junio, y dura hasta finales de noviembre. La ocurrencia de huracanes no sigue un patrón fijo, por lo que se puede esperar a lo largo de toda la temporada. La amenaza de estos fenómenos se intensifica si se presentan a finales de la estación lluviosa.

A continuación se muestra la determinación de la amenaza para cada escenario asociada a los diferentes regímenes de precipitaciones característicos de la región, pudiendo variar en función de las intensidades de precipitación y del estado de saturación del suelo. La amenaza se ha dividido en: Baja (B), Media (M), Alta (A) y Muy Alta (MA), en función de la magnitud de los eventos, que van a depender del volumen del caudal líquido y la carga sólida asociada.

<b>TERREMOTOS</b>		<b>B</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>MA</b>
Inviernos copiosos					
Inviernos normales					
Inviernos secos					

<b>NO TERREMOTOS</b>		<b>B</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>MA</b>
Inviernos copiosos					
Inviernos normales					
Inviernos secos					

## Mapa de áreas inundables

El mapa de áreas inundables ha sido elaborado con el objetivo de caracterizar esta amenaza (mapa n°14. "áreas inundables".anexo2). La determinación de las distintas áreas se ha visto dificultada por la falta de registros de eventos anteriores que puedan correlacionarse con unas condiciones de precipitaciones y actividad sísmica determinadas. Esta relación sería de gran utilidad ya que, según el principio del actualismo, lo que ha sucedido en el pasado puede volver a ocurrir en el futuro si se presentan las mismas condiciones. A falta de esta información, se ha elaborado el mapa de áreas inundables teniendo en cuenta la información facilitada por los habitantes de los municipios en los que se ha realizado el estudio (información no siempre precisa en cuanto a fechas o magnitud de los procesos), observaciones de campo, de fotografía aérea y del mapa topográfico. Por tanto la metodología empleada para el análisis en cada quebrada ha variado en función de la disponibilidad de datos facilitados por la población y de las características de cada quebrada. Sin embargo, no se ha podido determinar un cálculo para obtener una aproximación cuantitativa de la superficie que puede ser afectada debido a la problemática asociada a morfologías de conos de deyección detallada en este mismo apartado.

Se han detallado únicamente las zonas de inundación correspondientes a las tres quebradas estudiadas. Es importante señalar que el resto de áreas de la ladera baja del volcán, aunque no estén caracterizadas, por sus características morfológicas similares aunque no tan desarrolladas, no carecen de peligrosidad por inundaciones. Debe hacerse especial atención a toda zona habitada que se encuentre en las proximidades de cualquier quebrada. Por pequeña que ésta sea, debido a la intensidad de los eventos meteorológicos y las condiciones de saturación del suelo, puede evolucionar de manera relativamente rápida. Es importante que se tenga en cuenta este hecho ya que no son pocas las viviendas que se ubican próximas a estas formas, asociadas a peligro potencial por inundaciones, que son las quebradas.

La amplitud de las zonas potencialmente inundables es función del grado de desarrollo de las quebradas asociadas, en cuanto a sus dimensiones y en cuanto al número de inestabilidades identificadas. Un mayor desarrollo de la cuenca implica una mayor capacidad de captación de agua y mayor aporte de materiales que pueden incorporarse al flujo hídrico como carga sólida.

En las tres áreas en las que se ha realizado un análisis más detallado encontramos una característica común, la existencia de una misma unidad geomorfológica al pie de las quebradas: los conos de deyección. Estas son estructuras a priori potencialmente inundables. Según explica en *"La inundación torrencial catastrófica del camping "las nieves" del 17 de Agosto de 1996 en el cono de deyección del Arás"* (Ayala-Carcedo, F.J. Bisecas, Pirineo Aragonés): "La carga del torrente comienza a depositarse al producirse la caída de pendiente, bien en la parte final del torrente, bien en el ápice del cono, taponando su propio cauce y

acabando por abrir otro nuevo tras desbordarse como una inundación en manta no confinada (sheet-flood). Esta característica estructural migratoria del cauce en los conos de deyección, tiene gran importancia con vistas a la delimitación de zonas inundables. Dado que no puede garantizarse que con lluvias menores de un periodo de retorno de 500 años no existe migración del cauce, y que esta puede producirse casi en cualquier dirección, la conclusión inmediata es: todo el cono de deyección es zona potencialmente inundable”.

Ciertas observaciones pueden corroborar este hecho. Comprobamos que algunas quebradas de menores dimensiones se encuentran fuertemente encajadas hasta en zonas de suave pendiente. Cabría esperar que las quebradas principales tuvieran un potencial erosivo más fuerte, ya que contienen un mayor caudal y mayor aporte de carga sólida. Se observa sin embargo que los encajamientos ladera abajo de las tres quebradas, California, El Cargadero y La Quebradona, no guarda una relación con sus respectivas dimensiones en las cabeceras. Esto puede ser una prueba de que estos cursos de la ladera baja no son permanentes.

### Área inundable 1

La primera área delimitada, corresponde a las zonas del cauce. No se refiere al cauce que puede observarse en campo, representativo del área que ocupa el caudal en la actualidad en regímenes normales de precipitaciones, sino a todo el área que en el mapa topográfico puede observarse formada por canales de pequeña envergadura, pero que constituyen los espacios que el curso de la quebrada ha ido desarrollando. Aunque el flujo hídrico transcurra actualmente por un cauce más reducido que el área englobada en este escenario, este flujo puede cambiar de cauce, ocupando otros creados por la misma dinámica de la quebrada o necesitar todo su cauce en momentos de crecidas.

Según los datos proporcionados por los habitantes sobre las zonas alcanzadas por el caudal en el invierno del año 2001, coincidirían dichas zonas con el área delimitada para este escenario. Esto nos permite identificar las condiciones asociadas a este escenario: Invierno seco tras la ocurrencia de un terremoto, por tanto resultaría una amenaza media. El hecho de que las precipitaciones fueran intensas provocó un aumento de carga sólida en los flujos, por tanto, un aumento del potencial erosivo por lo que la amenaza se puede considerar alta. El área delimitada puede asociarse a un escenario de “no” terremotos para inviernos secos e inviernos normales con amenazas baja y media respectivamente. Aunque el área de afectación para inviernos secos no ocupa todo el cauce delimitada, no dejamos de considerar este área como propia del cauce principal.

Para el caso de la quebrada *El Cargadero*, el cauce se presenta bien definido hasta llegar a un punto en el que los taludes dejan de estar tan marcados, perdiéndose incluso en algunas zonas. La delimitación de este escenario engloba los canales diferenciables en el mapa topográfico, así como el área afectada por desbordamientos en el invierno/2001.

Para la quebrada *La Quebradona* se ha delimitado este escenario del mismo modo. En el punto apical del cono de deyección la quebrada pierde prácticamente el intenso encajamiento que la caracterizaba en las zonas de ladera media y alta. Esta pérdida de encajamiento coincide con una disminución de la pendiente. El cauce presenta generalmente taludes bajos o ausencia de éstos y se presenta bifurcado en algunos tramos. En estas zonas, según la intensidad del caudal, este tenderá a circular por uno de los cauces o por la superficie existente entre ellos, en caso de mayores caudales.

En la quebrada de *California* el cauce pierde igualmente sus taludes, pero no vuelve a recuperar su forma, más que en cortos tramos y con unas dimensiones muy pequeñas, lo que hace pensar que en condiciones de fuertes precipitaciones el agua fluye de manera diseminada por la ladera baja o encajándose en los caminos que conducen al casco urbano de California. El área que engloba este escenario es por tanto más ancha que las de las quebradas anteriores y delimita las zonas por las que se produjeron desbordamientos en el invierno/2001.

## **Área inundable 2**

La segunda área, ha sido delimitado en las áreas próximas a las quebradas que se han considerado potencialmente inundables bajo las siguientes condiciones: inviernos con lluvias normales tras la ocurrencia de un terremoto con una amenaza alta y inviernos copiosos para un escenario de “no” terremotos con una amenaza asociada también alta, debido a la importancia de las intensidades de lluvias en relación a la importante carga sólida capaz de incluir en el caudal líquido. Sin embargo, la amenaza va a depender de la saturación del suelo en el momento en el que sucedan las precipitaciones.

El área que ha sido delimitada mediante observaciones de campo, foto aérea y mapa topográfico, es la que se considera puede alcanzar un caudal en el caso de producirse un desbordamiento en los puntos donde la capacidad de la quebrada se ve disminuida.

Los puntos considerados como posibles orígenes de desbordamientos, se encuentran en la parte alta de los conos de deyección con lo que, según lo explicado anteriormente sobre estas formas, una vez producido el desbordamiento es impredecible determinar el curso que tomará el caudal. Se ha de tener por tanto en cuenta este hecho y prestarse constante atención en todo el área que ha sido delimitada como zona de precaución.

En la quebrada de *El Cargadero* el área delimitada corresponde con aquellos lugares en los que han sido observadas líneas de flujo en foto aérea del año 1970, que serían líneas preferentes de circulación del agua en caso de desbordamiento. En las fotos más recientes este terreno se encuentra ocupado por un asentamiento rural, los caseríos Los Flores y El Palmital del municipio de Oztatlán. Según el principio del actualismo, y sabiendo que estas

áreas fueron inundadas en un tiempo pasado, se determina que pueden volver a serlo cuando las condiciones de la quebrada y de precipitaciones sean similares a las que hubo.

En la quebrada *La Quebradona* la totalidad del cono de deyección presenta pequeños canales. Han sido englobados en esta área los más próximos a la quebrada. Ha de tenerse en cuenta, como ya se ha indicado, que una vez producido el desbordamiento hacia áreas que no se encuentren comprendidas en el área inundable 1, no podemos predecir con exactitud qué área será afectada.

En la quebrada de *California* se ha delimitado igualmente este área según los cauces definidos en el cono de deyección más próximos al área inundable 1.

Este área además de la problemática asociada a las quebradas principales, presenta una escorrentía superficial importante en las laderas, pudiendo considerarse por las características del flujo líquido con importante carga en suspensión (lodo) como amenaza baja para inviernos normales y amenaza media para inviernos copiosos e intensidades muy altas.

### **Área inundable 3**

El área 3 corresponde a unas zonas más amplias de afectación, suponiendo que puedan ocurrir eventos extremos, que corresponderían a las siguientes condiciones: inviernos copiosos tras la ocurrencia de terremotos, asociado a una amenaza muy alta.

Es importante remarcar, que este área se correspondería con un escenario más violento que el anterior, por la magnitud de la amenaza en cuanto a desbordamiento de las quebradas principales del estudio. Sin embargo, para las áreas de la ladera, donde circula un importante volumen de escorrentía superficial la amenaza sigue siendo media debido a las características del flujo, poca carga sólida asociado principalmente, al igual que en el área inundable 2, al régimen de precipitaciones.

En el caso del municipio de Ozatlán, es la carretera que baja desde el caserío Los Flores hacia el casco urbano, la que es ocupada como cauce por esta agua de escorrentía, así como numerosas pequeñas quebradas, algunas ya no tan pequeñas, al lado de las cuales, en algunos casos sobre la misma quebrada, se emplazan viviendas.

Para las tres quebradas del estudio han sido incluidas en esta área inundable zonas más amplias, siempre dentro del cono de deyección, en las que existen canales definidos que pueden ser tomados como cauces alternativos en caso de desbordamiento, quedando una zonificación de la amenaza en función de la proximidad al punto de desbordamiento.

En el municipio de Ozatlán hemos contado con una mayor información proporcionada por parte de la población debido a que es el lugar donde existen núcleos poblados más cerca de la quebrada y por tanto donde más problemas se han ocasionado.

Aún haber considerado que los escenarios para ambas situaciones de sismicidad ocuparían las mismas áreas (factor determinado según la morfología), la probabilidad de que ocurran desbordamientos y la amenaza es más alta para un escenario tras un terremoto. Dada la importancia de la carga sólida en la ocurrencia de desbordamientos, tras un terremoto el material susceptible de ser transportado es mayor, por tanto mayor la probabilidad de ocurrencia de desbordamientos y mayor el potencial erosivo de estos flujos en forma de avenidas.

Debido a la dificultad de determinar los diferentes rangos de peligrosidad de los diferentes escenarios, terremotos y “no” terremotos, asociados a las diferentes amenazas que se generan dependientes del régimen de precipitaciones, estaciones e intensidades de lluvias, y el momento de la ocurrencia (grado de saturación del terreno), se analiza una peligrosidad para la ocurrencia de la mayor amenaza en el análisis cualitativo del riesgo por avenidas e inundaciones.

Como conclusión, debemos remarcar que nos encontramos ante unas quebradas de grandes dimensiones, con una gran cantidad de material susceptible de ser transportado y en un clima en el que los procesos meteorológicos se caracterizan por la intensidad con que se manifiestan, generando procesos torrenciales que pueden alcanzar una gran envergadura y en consecuencia con un peligro asociado que puede extenderse, para las quebradas de estudio, a toda la superficie del cono de deyección. Han sido de este modo delimitadas estas formas como zonas de precaución, **área inundable 4**. Por otra parte, debido a la capacidad migratoria de los cauces, no se descarta la posibilidad de que, a largo plazo, cambien su ubicación dentro del cono de deyección. En este caso, los escenarios delimitados para el momento actual, migrarían igualmente con el cauce.

De igual manera y como ya se ha indicado, no debe olvidarse que todas las zonas próximas a todo tipo de quebradas son áreas con un peligro potencial y que es importante realizar un seguimiento de la evolución de las mismas, así como mantener el cauce en unas condiciones óptimas para mitigar, en la medida de lo posible, los efectos de esta amenaza.