

1. UMBRALES DE INTENSIDAD DE LLUVIA PARA LA GENERACION DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA CONTRA INUNDACIONES EN EL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR

Debido a que las inundaciones en la ciudad de San Salvador, no siempre son provocadas por cantidades altas de lluvia, sino que en muchas ocasiones con bajas cantidades se presentan inundaciones, se analizaron las intensidades de las mismas, para las tres estaciones mencionadas (Procafe, Boquerón e Ilopango), para duraciones de 10 y 20 minutos, con el fin de determinar umbrales de intensidad de lluvia que generan inundación en la ciudad. Se analizaron las intensidades de lluvia cada 10 minutos, periodo en el cual cada estación registra las cantidades de lluvia, las cuales son enviadas al Centro de Pronóstico Hidrológico, CPH, del SNET. Es de mencionar que la estación PROCAFE a la fecha actual, presenta omisión en la transmisión cada 30 minutos, por lo cual los 10 minutos correspondientes a esos 30 minutos no pudieron ser analizados para dicha estación.

Es importante destacar que este análisis se basó en lluvias convectivas y rápidas, que producen inundaciones, y no en lluvias por situación de temporal, las cuales también generan inundaciones, pero no por intensidades altas, sino por cantidad de lluvia acumulada.

Los datos analizados corresponden a intensidades altas en 10 y 20 minutos, que registraron las estaciones, y a los eventos que han producido algún tipo de inundación en la ciudad de San Salvador. El Servicio Hidrológico Nacional del SNET, lleva una base de datos de las inundaciones registradas en el país, la cual se encuentra disponible en <http://mapas.snet.gob.sv/hidrologia/select.php>. Con el cruce de la información se pudo realizar el análisis, al determinar para los eventos de inundación, tanto las intensidades de lluvia para 10 y 20 minutos, como la cantidad de lluvia total, su duración, y la lluvia antecedente de 1, 6, 12, 24 y 48 horas, teniendo en cuenta las comunidades afectadas en cada evento. El análisis se realizó para cada uno de los años desde el 2004 hasta Julio de 2008, y la información se puede observar en el Anexo 1. El número total de eventos analizados en los 4.5 años, entre inundaciones e intensidades altas registradas fue de 123 casos.

Con la información recopilada, se pudieron establecer los siguientes umbrales de intensidad de lluvia que generan algún tipo de problema de inundación en el área metropolitana.

Estación PROCAFE:

Umbral de Intensidad de lluvia para 10 minutos: 10 mm.

Umbral de Intensidad de lluvia para 20 minutos: 20 mm.

Estación BOQUERON:

Umbral de Intensidad de lluvia para 10 minutos: 23 mm.

Umbral de Intensidad de lluvia para 20 minutos: 33 mm.

Estación ILOPANGO:

Umbral de Intensidad de Lluvia para 10 minutos: 20 mm.

Umbral de Intensidad de Lluvia para 20 minutos: 30 mm.

Debido a que el análisis involucró la cantidad de lluvia antecedente para diferentes horas, estos umbrales se escogieron para las condiciones más críticas, por lo que es posible que sin una lluvia antecedente, el valor del umbral establecido no genere problema de inundación.

Estos umbrales definidos se deben ir evaluando y actualizando constantemente, ya que las condiciones de cambio de uso de suelo, las cuales son permanentes en la ciudad debido a la urbanización, generan que lluvias con intensidades más bajas puedan producir inundaciones. Por otro lado también es importante tener en cuenta que las modificaciones hidráulicas que se realicen en el cauce, también modificarán los umbrales de intensidades de lluvia que producen inundación, así como los tiempos en que estas inundaciones se producen ya que lo que se genera con las obras es una mayor velocidad de crecida, que termina inundando zonas ubicadas aguas abajo, que posiblemente no tenían el problema con anterioridad.

Es importante destacar como la estación PROCAFE la cual tiene influencia sobre zona más urbana, contrario a lo que sucede con la estación BOQUERON, presenta umbrales de intensidad de lluvia más bajos que BOQUERON, lo cual indica que con cantidades de lluvia menores, la afectación debido a las zonas urbanas es mayor o igual que con intensidades mayores cuando la lluvia cae sobre zonas con mayor cantidad de vegetación.

En el Anexo 1, igualmente se puede observar las comunidades afectadas en cada caso, y cuál de las estaciones telemétricas registró la lluvia que provocó la inundación, o si por el contrario ninguna de las tres estaciones registró la lluvia que la provocó, lo cual indica las zonas descubiertas de la red telemétrica, en las cuales es necesario la colocación de las estaciones para tener una cobertura total para el Sistema de Alerta Temprana por inundaciones en la ciudad de San Salvador. Principalmente hay dos zonas que necesitan ser cubiertas con estaciones telemétricas, las cuales corresponden a la parte alta del Arenal de Mejicanos, la quebrada El Garrobo.

Aunque los registros que se presentan en este informe datan del 2004 como se mencionó anteriormente, de la base de datos de inundaciones se pudo observar como comunidades que no se afectaban antes de los años 2005 y 2006 comenzaron a verse afectadas a partir de esta época, junto con las comunidades que tradicionalmente presentan este problema, lo cual se evidencia en las comunidades afectadas presentadas en el Anexo mencionado.

2. DISTRIBUCION TEMPORAL DE LAS TORMENTAS

Con el objeto de determinar las lluvias de diseño para diferentes periodos de retorno, se analizaron las tormentas registradas en las tres estaciones con el fin de establecer el patrón de distribución temporal promedio en cada una de ellas para diferentes duraciones. En total se analizaron 133 eventos de lluvia, de los cuales, 16 en la estación PROCAFE (en esta estación solo se pudo analizar el año 2004 debido a la falla en la transmisión de los datos de cada 30 minutos en los años posteriores), 72 en la estación BOQUERON y 45 en ILOPANGO. Las distribuciones temporales se pueden observar en el Anexo 2, para cada uno de las tormentas registradas, así como la distribución promedio para diferentes duraciones.

Es importante destacar, que generalmente la máximas cantidades de lluvia, sin importar la duración total de la lluvia, se presentan entre lo 10 a 20 minutos desde que comienza la lluvia, o en su defecto entre los 20 a 30 minutos.

3. CURVAS INTENSIDAD FRECUENCIA DURACION

La información de las intensidades máximas de lluvia para diferentes duraciones, con que cuenta el SNET, presentan registros hasta los años 80, y no han sido actualizadas desde esa fecha, excepto la estación ILOPANGO la cual tiene información hasta el año 2005. Actualmente está en proceso de realización la actualización de esta información en las estaciones SANTA TECLA, BOQUERON e ILOPANGO hasta el año 2007, a través de las bandas pluviográficas. Con base en la información de las estaciones telemétricas se ha realizado en este trabajo la actualización de la información de las Intensidades de lluvia en la estación BOQUERON en los años de 2004 a 2007, lo cual no pudo realizarse en las otras dos estaciones debido a información satelital perdida.

A partir de la información de las intensidades máximas, se realizó el análisis probabilístico con tres funciones de distribución, Gumbel, Normal y Log Normal II, y se realizó la prueba de ajuste de Smirnov – Kolmogorov, para determinar cuál de las distribuciones presentaba mejor ajuste, y se determinaron las intensidades máximas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años para las diferentes duraciones de la lluvia. En el Anexo 3 se presenta el modelamiento probabilístico para la estación SANTA TECLA y en el Anexo 4 el de la estación BOQUERON. En las tablas 1 y 2 y Figuras 2 y 3 se presentan las curvas IDF de las dos estaciones.

| PERIODO DE RETORNO | DURACION (MINUTOS) | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 180 | 240 | 360 |
| 2 años | 2.61 | 2.13 | 1.85 | 1.65 | 1.35 | 1.05 | 0.81 | 0.60 | 0.47 | 0.32 | 0.25 | 0.17 |
| 5 años | 3.03 | 2.45 | 2.16 | 1.95 | 1.63 | 1.28 | 1.03 | 0.75 | 0.58 | 0.40 | 0.33 | 0.23 |
| 10 años | 3.26 | 2.62 | 2.32 | 2.10 | 1.77 | 1.41 | 1.17 | 0.85 | 0.64 | 0.44 | 0.37 | 0.27 |
| 15 años | 3.37 | 2.71 | 2.41 | 2.18 | 1.84 | 1.47 | 1.24 | 0.90 | 0.68 | 0.47 | 0.39 | 0.29 |
| 20 años | 3.44 | 2.76 | 2.46 | 2.24 | 1.89 | 1.51 | 1.29 | 0.94 | 0.71 | 0.48 | 0.40 | 0.30 |
| 25 años | 3.49 | 2.80 | 2.50 | 2.27 | 1.92 | 1.53 | 1.33 | 0.96 | 0.72 | 0.50 | 0.41 | 0.31 |
| 50 años | 3.65 | 2.92 | 2.61 | 2.38 | 2.02 | 1.62 | 1.45 | 1.05 | 0.78 | 0.54 | 0.44 | 0.33 |
| 100 años | 3.78 | 3.02 | 2.71 | 2.48 | 2.11 | 1.69 | 1.57 | 1.13 | 0.84 | 0.58 | 0.47 | 0.35 |

Tabla 1. Valores de Intensidad Frecuencia Duración de la estación Santa Tecla. Periodo 1954 - 1984

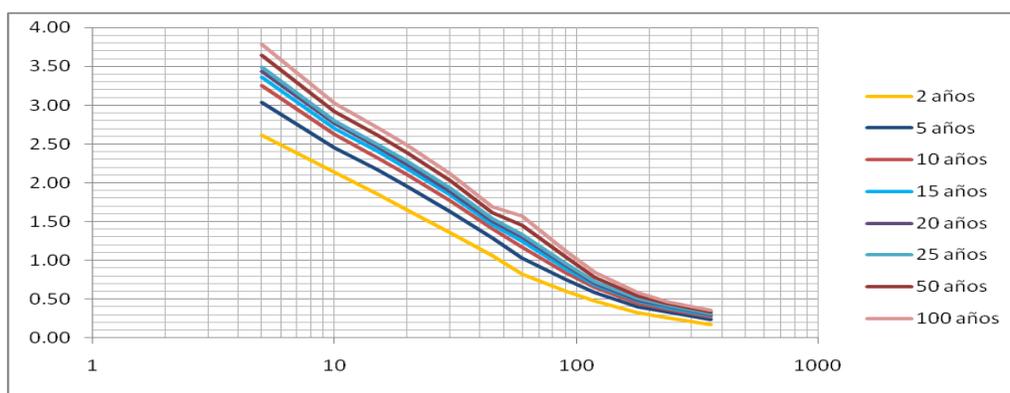


Figura 2. Curvas Intensidad Frecuencia Duración de la estación Santa Tecla. Periodo 1954 - 1984

| PERIODO DE RETORNO | DURACION (MINUTOS) | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 240 | 360 |
| 2 años | 3.11 | 2.28 | 1.88 | 1.70 | 1.37 | 1.04 | 0.85 | 0.61 | 0.48 | 0.39 | 0.34 | 0.25 | 0.19 |
| 5 años | 3.69 | 2.63 | 2.13 | 1.97 | 1.57 | 1.17 | 0.96 | 0.70 | 0.56 | 0.47 | 0.41 | 0.31 | 0.25 |
| 10 años | 3.99 | 2.81 | 2.25 | 2.11 | 1.68 | 1.24 | 1.02 | 0.74 | 0.60 | 0.51 | 0.44 | 0.35 | 0.28 |
| 15 años | 4.14 | 2.90 | 2.32 | 2.18 | 1.73 | 1.27 | 1.05 | 0.76 | 0.62 | 0.53 | 0.46 | 0.37 | 0.29 |
| 20 años | 4.24 | 2.96 | 2.36 | 2.23 | 1.77 | 1.29 | 1.07 | 0.77 | 0.63 | 0.54 | 0.48 | 0.39 | 0.30 |
| 25 años | 4.31 | 3.01 | 2.39 | 2.26 | 1.79 | 1.31 | 1.08 | 0.78 | 0.64 | 0.55 | 0.48 | 0.40 | 0.31 |
| 50 años | 4.52 | 3.13 | 2.48 | 2.36 | 1.87 | 1.35 | 1.12 | 0.81 | 0.67 | 0.58 | 0.51 | 0.44 | 0.33 |
| 100 años | 4.71 | 3.25 | 2.56 | 2.45 | 1.93 | 1.39 | 1.16 | 0.84 | 0.69 | 0.61 | 0.53 | 0.48 | 0.34 |

Tabla 2. Valores de Intensidad Frecuencia Duración de la estación Boquerón. Periodo 1967 - 1993, 2004-2007

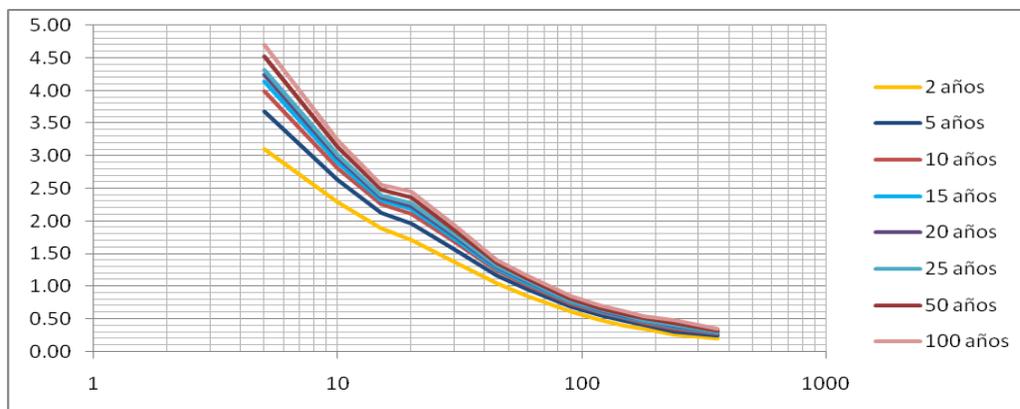


Figura 3. Curvas Intensidad Frecuencia Duración de la estación Boquerón. Periodo 1967 - 1993, 2004-2007

4. GENERACION DE TORMENTAS DE DISEÑO PARA DIFERENTES DURACIONES DE LLUVIA

Con base en las curvas IDF se generaron las tormentas o lluvias de diseño para diferentes duraciones de lluvia, teniendo en cuenta el método de bloque alterno, pero con la variación de que no se realizó una distribución alterna de la lluvia, sino que se siguió el patrón de distribución temporal encontrado para cada estación (de acuerdo al numeral 2 de este informe). En el Anexo 5 se presentan los valores y gráficas de las tormentas de diseño para la estación Santa Tecla para los periodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años con duraciones de lluvia de 30, 60 y 120 minutos, y en el Anexo 6 se presentan los de la estación Boquerón. Las Figuras 4 y 5 presentan la tormenta de diseño para un periodo de retorno de 25 años con duración de lluvia de 120 minutos para las estaciones de Santa Tecla y Boquerón respectivamente.

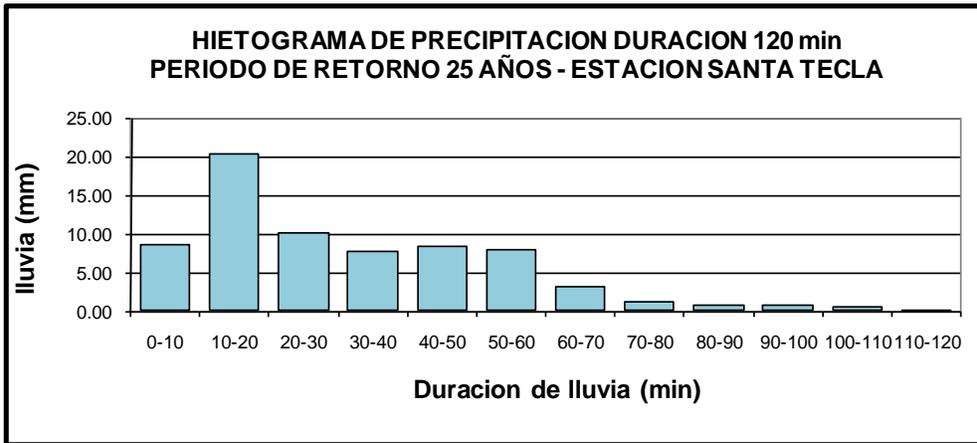


Figura 4. Tormenta de diseño para periodo de retorno de 25 años, duración de lluvia 120 minutos – Estación Santa Tecla.

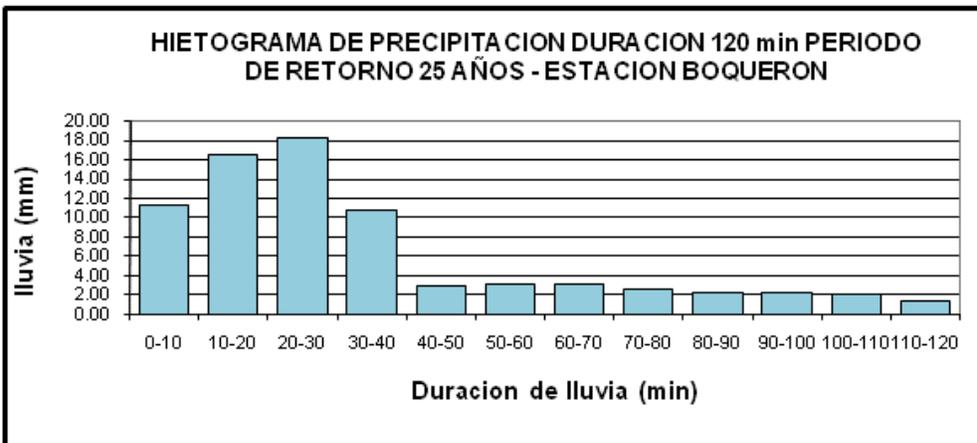


Figura 5. Tormenta de diseño para periodo de retorno de 25 años, duración de lluvia 120 minutos – Estación Boquerón.

5. TORMENTA DEL DIA 3 DE JULIO DE 2008

El 3 de Julio de 2008 será recordado por la tragedia que se presentó en la Colonia Málaga de San Salvador, en la cual un bus que transportaba 32 personas fue arrastrado por una creciente del río Acelhuate. Ese día la estación telemétrica de lluvia PROCAFE, la cual tiene incidencia directa sobre el cauce en el que se produjo la crecida, presentó tres periodos de lluvia, un periodo unas horas antes de la ocurrencia de la creciente, la tormenta que generó la creciente en la cual se vio afectado el bus, y una lluvia en la madrugada siguiente a la tragedia. Esta estación registró 40 mm de lluvia en el primer periodo, 41 mm en el segundo periodo y 20.4 mm en el periodo de la madrugada. En la tabla 3 se presenta el registro de la lluvia en esta estación.

| Fecha | Hora | Lluvia en Procafe(mm) | pp acumulada (mm) |
|------------|----------|-----------------------|-------------------|
| 07/03/2008 | 13:00:00 | | |
| 07/03/2008 | 13:10:00 | 0 | |
| 07/03/2008 | 13:20:00 | 0 | 0 |
| 07/03/2008 | 13:30:00 | 0 | 0 |
| 07/03/2008 | 13:40:00 | 0.2 | 0.2 |
| 07/03/2008 | 13:50:00 | 0.3 | 0.5 |
| 07/03/2008 | 14:00:00 | 0.3 | 0.8 |
| 07/03/2008 | 14:10:00 | 3.2 | 4 |
| 07/03/2008 | 14:20:00 | 3 | 7 |
| 07/03/2008 | 14:30:00 | 4.6 | 11.6 |
| 07/03/2008 | 14:40:00 | 18.2 | 29.8 |
| 07/03/2008 | 14:50:00 | 0 | 29.8 |
| 07/03/2008 | 15:00:00 | 0 | 29.8 |
| 07/03/2008 | 15:10:00 | 0 | 29.8 |
| 07/03/2008 | 15:20:00 | 2.2 | 32 |
| 07/03/2008 | 15:30:00 | 2 | 34 |
| 07/03/2008 | 15:40:00 | 5.8 | 39.8 |
| 07/03/2008 | 15:50:00 | 0.2 | 40 |
| 07/03/2008 | 16:00:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 16:10:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 16:20:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 16:30:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 16:40:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 16:50:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 17:00:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 17:10:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 17:20:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 17:30:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 17:40:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 17:50:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 18:00:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 18:10:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 18:20:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 18:30:00 | 0 | 40 |
| 07/03/2008 | 18:40:00 | 1.4 | 41.4 |
| 07/03/2008 | 18:50:00 | 0.6 | 42 |
| 07/03/2008 | 19:00:00 | 0.8 | 42.8 |
| 07/03/2008 | 19:10:00 | 0.6 | 43.4 |
| 07/03/2008 | 19:20:00 | 1.6 | 45 |
| 07/03/2008 | 19:30:00 | 3 | 48 |
| 07/03/2008 | 19:40:00 | 23.4 | 71.4 |
| 07/03/2008 | 19:50:00 | 0.6 | 72 |
| 07/03/2008 | 20:00:00 | 0.8 | 72.8 |
| 07/03/2008 | 20:10:00 | 2.6 | 75.4 |
| 07/03/2008 | 20:20:00 | 0.4 | 75.8 |
| 07/03/2008 | 20:30:00 | 0.4 | 76.2 |
| 07/03/2008 | 20:40:00 | 2.8 | 79 |
| 07/03/2008 | 20:50:00 | 0.2 | 79.2 |
| 07/03/2008 | 21:00:00 | 0.2 | 79.4 |
| 07/03/2008 | 21:10:00 | 0.4 | 79.8 |
| 07/03/2008 | 21:20:00 | 0 | 79.8 |
| 07/03/2008 | 21:30:00 | 0 | 79.8 |
| 07/03/2008 | 21:40:00 | 0.6 | 80.4 |
| 07/03/2008 | 21:50:00 | 0.2 | 80.6 |
| 07/03/2008 | 22:00:00 | 0.2 | 80.8 |
| 07/03/2008 | 22:10:00 | 0.4 | 81.2 |
| 07/03/2008 | 22:20:00 | 0.1 | 81.3 |
| 07/03/2008 | 22:30:00 | 0.1 | 81.4 |
| 07/03/2008 | 22:40:00 | 1 | 82.4 |

| Fecha | Hora | Lluvia en Procafe(mm) | pp acumulada (mm) |
|------------|----------|-----------------------|-------------------|
| 07/03/2008 | 22:50:00 | 0 | 82.4 |
| 07/03/2008 | 23:00:00 | 0 | 82.4 |
| 07/03/2008 | 23:10:00 | 0 | 82.4 |
| 07/03/2008 | 23:20:00 | 0 | 82.4 |
| 07/03/2008 | 23:30:00 | 0 | 82.4 |
| 07/03/2008 | 23:40:00 | 0.2 | 82.6 |
| 07/03/2008 | 23:50:00 | 0 | 82.6 |
| 07/04/2008 | 00:00:00 | 0 | 82.6 |
| 07/04/2008 | 00:10:00 | 0 | 82.6 |
| 07/04/2008 | 00:20:00 | 0 | 82.6 |
| 07/04/2008 | 00:30:00 | 0 | 82.6 |
| 07/04/2008 | 00:40:00 | 0.6 | 83.2 |
| 07/04/2008 | 00:50:00 | 1.8 | 85 |
| 07/04/2008 | 01:00:00 | 1.4 | 86.4 |
| 07/04/2008 | 01:10:00 | 5 | 91.4 |
| 07/04/2008 | 01:20:00 | 0.6 | 92 |
| 07/04/2008 | 01:30:00 | 0.6 | 92.6 |
| 07/04/2008 | 01:40:00 | 2.2 | 94.8 |
| 07/04/2008 | 01:50:00 | 0.2 | 95 |
| 07/04/2008 | 02:00:00 | 0.6 | 95.6 |
| 07/04/2008 | 02:10:00 | 0.8 | 96.4 |
| 07/04/2008 | 02:20:00 | 0.6 | 97 |
| 07/04/2008 | 02:30:00 | 0.4 | 97.4 |
| 07/04/2008 | 02:40:00 | 2.2 | 99.6 |
| 07/04/2008 | 02:50:00 | 0.2 | 99.8 |
| 07/04/2008 | 03:00:00 | 0.2 | 100 |
| 07/04/2008 | 03:10:00 | 0.2 | 100.2 |
| 07/04/2008 | 03:20:00 | 0.2 | 100.4 |
| 07/04/2008 | 03:30:00 | 0.2 | 100.6 |
| 07/04/2008 | 03:40:00 | 1.2 | 101.8 |
| 07/04/2008 | 03:50:00 | 0.1 | 101.9 |
| 07/04/2008 | 04:00:00 | 0.1 | 102 |
| 07/04/2008 | 04:10:00 | 0.4 | 102.4 |
| 07/04/2008 | 04:20:00 | 0.1 | 102.5 |
| 07/04/2008 | 04:30:00 | 0.1 | 102.6 |
| 07/04/2008 | 04:40:00 | 0.4 | 103 |
| 07/04/2008 | 04:50:00 | 0 | 103 |
| 07/04/2008 | 05:00:00 | 0 | 103 |

Tabla 3. Registro de lluvia en la estación Procafe el día 3 de Julio de 2008.

De esta lluvia es importante destacar dos aspectos, con relación a las intensidades de lluvia: El primer periodo de lluvia presentó una intensidad alta de 18.2 mm en 10 minutos, con una cantidad total de lluvia de 40 mm en 2 horas; el segundo periodo de lluvia, el cual se presentó 2.5 horas después de terminar el primero, también registró intensidades altas en 10 minutos de 23.4 mm en 10 minutos. Esta lluvia con estas características de intensidad, al compararla con las presentadas en el Anexo 1, se asemeja a la presentada el día 18 de Julio de 2004, en la cual se registró una intensidad máxima en 10 minutos de 23.6 mm, produciendo inundación en las comunidades Tutunichapa IV, Colonia Sánchez, Barrio La Vega; sin embargo esta lluvia del 2004, no registra lluvia antecedente en 48 horas, como si lo presentó la lluvia del día 3 de julio, unas horas antes. De acuerdo al análisis probabilístico de intensidades, para esta duración de 10 minutos, tiene un periodo de retorno de 3 años (ver Figura 2, Tabla 1).

Para la lluvia registrada en el 2004, la colonia Málaga no sufrió ningún tipo de inundación y de acuerdo a la información dada por los vecinos de la zona, aunque en otros años el nivel del río ha alcanzado el nivel de la calle, nunca se había producido en el sitio un desbordamiento de la magnitud que se produjo en esta oportunidad.

Se evidencian dos hechos: el primero, que la lluvia antecedente del día 3 de julio de 2008, la cual tenía el cauce lleno a la altura de la Málaga, de acuerdo con información de la gente, desencadenó que la repunta que se produjo con dicha intensidad de 23.4 mm en el segundo periodo de lluvia, rebalsara el cauce, lo cual no había sucedido antes, por lo menos no se evidencia en los registros desde 2004 (lo cual es un periodo corto de comparación); y el segundo hecho es que en años anteriores, la colonia Málaga no presentaba este tipo de problemas de inundación, los cuales se presentaban aguas abajo, y que han sido trasladados a otras zonas con las obras hidráulicas que se han realizado en el cauce.

Por otro lado, también es importante evidenciar como el cambio de uso de suelo aguas arriba, ha influido en el escurrimiento y generación de crecidas e inundaciones en las zonas aguas abajo, por lo que es necesario realizar la modelación hidrológica e hidráulica en la que se presenten las condiciones antes y después del año 2004, donde se han construido infraestructura que ha podido modificar la respuesta del cauce.