



Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente
Hacia una proyección social



CONTRATO INTERADMINISTRATIVO CVC – UNIVALLE 188 DE 2008

PROYECTO MIDAS

**ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS Y ESCENARIOS DE RIESGO POR
MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIONES Y CRECIENTES
TORRENCIALES DEL ÁREA URBANA Y DE EXPANSIÓN DE LOS
MUNICIPIOS DE BUGA, RIOFRÍO, DAGUA, EL CAIRO Y LA
UNIÓN**

INFORME FINAL DE AMENAZAS POR INUNDACIONES PARA EL MUNICIPIO DE LA UNIÓN

**SUPERVISIÓN A CARGO DE
HIDROOCCIDENTE**

Santiago de Cali, Junio de 2010

TABLA DE CONTENIDO

<i>INTRODUCCIÓN</i>	12
1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	16
1.1. INFORMACIÓN DE EVENTOS HISTÓRICOS	16
1.2. INFORMACIÓN SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS CAUCES DE LA ZONA DE ESTUDIO DEL MUNICIPIO LA UNIÓN	20
2. INVESTIGACIONES DE CAMPO	22
2.1. CAUCES EN LA ZONA DE ESTUDIO	22
2.2. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	23
2.3. RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES DE CAMPO	24
2.3.1. Levantamientos topobatimétricos	24
2.3.2. Caracterización hidrológica	32
3. CARACTERIZACIÓN SEDIMENTOLÓGICA	37
3.1. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE MUESTREO	37
3.2. MÉTODOS DE CONVERSIÓN	39
3.3. DIÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MATERIAL DEL LECHO DE LOS CAUCES DEL MUNICIPIO DE LA UNIÓN	41
4. ESTIMACIÓN DE LA RUGOSIDAD	47
4.1. PERFILES LONGITUDINALES DE LOS CAUCES DEL MUNICIPIO DE LA UNIÓN	47
4.2. PENDIENTE PROMEDIA DE LOS CAUCES DEL MUNICIPIO DE LA UNIÓN	48
4.3. RUGOSIDAD DEL LECHO DE LOS CAUCES DEL MUNICIPIO DE LA UNIÓN	51
4.4. RUGOSIDAD DE LAS LLANURAS DE INUNDACIÓN DEL MUNICIPIO DE LA UNIÓN	54
5. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE NIVELES DE AMENAZA POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES	64
5.1. ESTADO DEL ARTE	64
5.2. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA EN EL PRESENTE ESTUDIO	77
5.2.1. Metodología para determinar los niveles de amenaza por inundaciones	77

6. MODELACIÓN MATEMÁTICA	82
6.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO BIDIMENSIONAL FLO-2D	82
6.1.1. Generalidades	82
6.1.2. Ecuaciones hidrodinámicas	83
6.1.3. Solución numérica de las ecuaciones de flujo	84
6.1.4. Criterios de estabilidad numérica	87
6.1.5. Resolución espacial y temporal	88
6.1.6. Hipótesis y limitaciones del modelo FLO-2D	89
6.1.7. Variabilidad de parámetros	89
6.1.8. Variabilidad de parámetros	91
6.1.9. Fases del programa	94
6.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO BIDIMENSIONAL FLO-2D	95
6.2.1. Esquematización	95
6.2.1.1. Descripción de la malla computacional	95
6.2.1.2. Rugosidad de las llanuras	96
6.2.1.3. Esquematización de los ríos y canales	97
6.2.1.4. Infiltración	99
6.2.1.5. Condiciones de frontera	100
6.2.2. Simulación	101
6.2.2.1. Calibración	101
6.2.2.2. Verificación del modelo	102
6.2.2.3. Análisis de sensibilidad	103
6.2.2.4. Resultados	105
6.2.2.5. Análisis de resultados	148
7. DETERMINACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE LA AMENAZA	152
7.1. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LAS INUNDACIONES	152
7.2 MEDIDAS PARA EL CONTROL Y MANEJO DE LAS INUNDACIONES	154
7.2.1. Medidas estructurales	154
7.2.2. Medidas no estructurales	155
7.3. MAPAS DE AMENAZAS POR AVENIDAS TORRENCIALES	156
7.3.1. Clasificación de la amenaza en planicies de inundación	157
7.3.2. Mapas de inundación para crecientes con periodos de retorno de 10, 30 y 100 años	158
7.3.3. Determinación de caudales extremos	158
7.3.4. Modelación hidrodinámica y generación de mapas de inundación	158
7.3.5. Modelación hidrodinámica y generación de mapas de inundaciones por escenarios	159
7.4 GENERACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE AMENAZA GLOBAL POR INUNDACIONES	167
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	170
8.1 CONCLUSIONES	170
8.2. RECOMENDACIONES	172

9. BIBLIOGRAFÍA	176
10. ANEXOS	180
Anexo 2.1 Secciones transversales de los cauces de estudio en el municipio de La Unión	181
Anexo 6.1 Curvas de calibración	228
12. MAPAS	236
<i>Mapa 7.1 Amenaza por inundaciones – Periodo de retorno 10 años</i>	
<i>Mapa 7.2 Amenaza por inundaciones – Periodo de retorno 30 años</i>	
<i>Mapa 7.3 Amenaza por inundaciones – Periodo de retorno 100 años</i>	
<i>Mapa 7.4 Amenaza por inundaciones global</i>	

CONTENIDO TABLAS

<i>Tabla 1.1. Zonificación de amenazas naturales por inundaciones.</i>	17
<i>Tabla 3.1. Valores del exponente x para la expresión de Kellerhals y Bray para convertir curvas granulométricas obtenidas por diferentes métodos de muestreo.</i>	40
<i>Tabla 3.2. Diámetros característicos del material del lecho de la quebrada La Unión.</i>	41
<i>Tabla 3.3 Diámetros característicos del material del lecho de la quebrada El Rincón.</i>	43
<i>Tabla 3.4. Diámetros característicos del material del lecho del Zanjón Negro o Moral.</i>	44
<i>Tabla 4.1. Factores de rugosidad de Manning, Chezy y Darcy en la quebrada La Unión en diferentes secciones transversales.</i>	53
<i>Tabla 4.2. Factores de rugosidad de Manning, Chezy y Darcy en la quebrada El Rincón en diferentes secciones transversales.</i>	54
<i>Tabla 4.3. Factores de rugosidad de Manning, Chezy y Darcy en el zanjón Moral en diferentes secciones transversales.</i>	54
<i>Tabla 4.4. Coeficientes de rugosidad de Manning y Chezy en la planicie de inundación cubierta de pastos en función de la profundidad de inundación.</i>	56
<i>Tabla 4.5. Relación del número de Reynolds con el coeficiente de arrastre y la forma del cuerpo en el cual se produce el choque con el agua (W. F. Lindsey, 1938).</i>	58
<i>Tabla 4.6. Estimación de la rugosidad de Manning para planicies de inundación con árboles de diferentes tamaños de tronco.</i>	59
<i>Tabla 4.7. Estimación de la rugosidad de Manning para planicies de inundación con cultivos de uva de diferentes densidades por metro cuadrado.</i>	60
<i>Tabla 4.8. Estimación de la rugosidad de Manning para planicies de inundación con cultivos de guayaba para diferentes velocidades de flujo.</i>	61
<i>Tabla 4.9. Estimación de la rugosidad de Manning para planicies de inundación con cultivos de papaya para diferentes velocidades de flujo.</i>	62
<i>Tabla 5.1. Niveles de riesgos definidos en la metodología del PATRICOVA.</i>	68
<i>Tabla 5.2. Nivel del riesgo de acuerdo con el Procedimiento Simplificado del Plan Medioambiental del río Ebro y tramo Bajo del río Cauca.</i>	69
<i>Tabla 5.3. Definición de rangos de intensidad para inundaciones estáticas y dinámicas (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales).</i>	71
<i>Tabla 5.4. Categorización de la inundación según el periodo de retorno (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales).</i>	72
<i>Tabla 5.6. Nivel Discreto de Amenaza (PREVENE, 2001).</i>	75
<i>Tabla 5.7. Definición de nivel de amenaza según García, Rodríguez y O'Brien.</i>	76
<i>Tabla 5.8. Intensidad de la inundación según García, Rodríguez y O'Brien.</i>	76
<i>Tabla 5.9. Intensidad de flujo de lodos según García, Rodríguez y O'Brien.</i>	76
<i>Tabla 5.10. Nivel de frecuencia de los eventos de inundaciones y avenidas torrenciales.</i>	77
<i>Tabla 5.11. Nivel de intensidad o magnitud del evento de inundación.</i>	78
<i>Tabla 5.12. Nivel de amenaza según la frecuencia y la intensidad o magnitud de la inundación.</i>	79
<i>Tabla 5.13. Clasificación de la amenaza por inundaciones.</i>	80
<i>Tabla 6.1. Valores estimados del coeficiente de rugosidad de Manning en la planicie aluvial de la zona de estudio del municipio de La Unión.</i>	97
<i>Tabla 6.2. Factores de rugosidad de Manning en el cauce principal de la quebrada La Unión.</i>	98
<i>Tabla 6.3. Factores de rugosidad de Manning en el cauce principal de la quebrada El Rincón.</i>	98
<i>Tabla 7.1. Descripción de las principales obras estructurales para control de las crecientes e inundaciones.</i>	155
<i>Tabla 7.2. Áreas de la zona urbana y de expansión urbana amenazadas por avenidas torrenciales.</i>	167

CONTENIDO DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Plano de localización de la quebrada La Unión en la zona urbana.</i>	18
<i>Figura 2.1 Localización de la zona de estudio en el municipio de Dagua.</i>	23
<i>Figura 2.2 Sección transversal de la quebrada La Unión en la abscisa K0 + 000.</i>	29
<i>Figura 2.3 Sección transversal de la quebrada El Rincón en la abscisa K0 + 391.724.</i>	29
<i>Figura 2.4 Sección transversal del zanjón Los Muertos o de Aguas Negras en la abscisa K3 + 017.651.</i>	30
<i>Figura 2.5 Sección transversal del zanjón Negro o Moral en la abscisa K0 + 000.</i>	30
<i>Figura 2.6 Sección transversal de la cañada El Lucero en la abscisa K0 + 000.</i>	31
<i>Figura 2.7 Sección transversal del antiguo cauce de la quebrada La Unión en la abscisa K1 + 377.84.</i>	31
<i>Figura 2.8 Hidrógrafas de caudales en la quebrada La Unión para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.</i>	32
<i>Figura 2.9 Hidrógrafas de caudales en la quebrada El Rincón para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.</i>	33
<i>Figura 2.10 Hidrógrafas de caudales en el zanjón Moral o Negro para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.</i>	33
<i>Figura 2.11 Hidrógrafas de caudales en la cañada El Lucero para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.</i>	34
<i>Figura 2.12 Histogramas de precipitaciones para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años en la zona de estudio del municipio de La Unión.</i>	35
<i>Figura 3.1 Identificación de partículas para el análisis granulométrico de malla-número (a) Muestra fotográfica (b) Partículas delimitadas en las intersecciones de la malla.</i>	38
<i>Figura 3.2 Curvas granulométricas del material superficial del lecho en varios sectores de la quebrada La Unión.</i>	42
<i>Figura 3.3 Curvas granulométricas del material superficial del lecho en varios sectores de la quebrada El Rincón.</i>	44
<i>Figura 3.3(a) Curvas granulométricas del material superficial del lecho en el Zanjón negro o Moral.</i>	45
<i>Figura 4.1 Perfil longitudinal de la quebrada La Unión en la zona de estudio.</i>	47
<i>Figura 4.2 Perfil longitudinal de la quebrada El Rincón en la zona de estudio.</i>	48
<i>Figura 4.3 Perfil longitudinal de la quebrada La Unión en la zona de estudio dividido por zonas para el cálculo de la pendiente.</i>	50
<i>Figura 4.4 Perfil longitudinal de la quebrada El Rincón en la zona de estudio dividido por zonas para el cálculo de la pendiente.</i>	51
<i>Figura 4.5 Coeficiente de Chezy en función de la profundidad de inundación en la planicie (de Vries, 1993).</i>	55
<i>Figura 5.1 Clasificación de las zonas de inundación de acuerdo con la Agencia Catalana del Agua.</i>	66
<i>Figura 5.2 Zona de intenso desagüe definida por la Agencia Catalana del Agua.</i>	67
<i>Figura 5.3 Definición de rangos de intensidad para inundaciones estáticas y dinámicas (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales).</i>	71
<i>Figura 5.4 Metodología para la estructuración de un escenario de riesgo.</i>	74
<i>Figura 5.5 Nivel de intensidad o magnitud de la amenaza por inundaciones.</i>	78
<i>Figura 6.1 Cálculo del caudal a través de las fronteras de los elementos de la malla computacional (Fuente: Manual del Usuario del Modelo FLO-2D, versión 2009).</i>	86
<i>Figura 6.2 Extensión del canal sobre varios elementos de la malla.</i>	92
<i>Figura 6.3 Esquematación de una simulación en el modelo FLO-2D.</i>	93
<i>Figura 6.4 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la profundidad del flujo quebrada La Unión – Sección 7 – K0 + 814.06.</i>	106
<i>Figura 6.5 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la velocidad del flujo quebrada La Unión – Sección 7 – K0 + 814.06.</i>	106
<i>Figura 6.6 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del caudal en el canal quebrada La Unión – Sección 7 – K0 + 814.06.</i>	107
<i>Figura 6.7 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la profundidad del flujo quebrada La Unión – Sección 30 – K2 + 883.20.</i>	107

Figura 6.8 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la velocidad del flujo quebrada La Unión – Sección 30 – K2 + 883.20.	108
Figura 6.9 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en el caudal quebrada La Unión – Sección 30 – K2 + 883.20.	108
Figura 6.10 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0 + 781.018.	109
Figura 6.11 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la velocidad del flujo quebrada El Rincón – Sección 4 – K0 + 781.018.	109
Figura 6.12 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en el caudal quebrada El Rincón – Sección 4 – K0 + 781.018.	110
Figura 6.13 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la profundidad del flujo quebrada El Rincón – Sección 13 – K2 + 778.739.	110
Figura 6.14 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la velocidad del flujo quebrada El Rincón – Sección 13 – K0 + 397.66.	111
Figura 6.15 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en el caudal quebrada El Rincón – Sección 13 – K2 + 778.739.	111
Figura 6.16 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 – K0 + 814.06.	112
Figura 6.17 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 – K0 + 814.06.	112
Figura 6.18 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en el caudal quebrada La Unión - Sección 7 – K0 + 814.06.	113
Figura 6.19 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2 + 883.2.	113
Figura 6.20 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2 + 883.2.	114
Figura 6.21 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en el caudal quebrada La Unión - Sección 30 – K2 + 883.2.	114
Figura 6.22 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0 + 781.018.	115
Figura 6.23 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0 + 781.018.	115
Figura 6.24 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 – K2 + 778.739.	116
Figura 6.25 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 – K2 + 778.739.	116
Figura 6.26 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en el caudal quebrada El Rincón - Sección 13 – K2 + 778.739.	117
Figura 6.27 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 – K0+814.06.	118
Figura 6.28 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 – K0+814.06.	118
Figura 6.29 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en el caudal quebrada La Unión - Sección 7 – K0+814.06.	119
Figura 6.30 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2+883.20.	119
Figura 6.31 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2+883.20.	120
Figura 6.32 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en el caudal quebrada La Unión - Sección 30 – K2+883.20.	120
Figura 6.33 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0+781.018.	121
Figura 6.34 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0+781.018.	121

<i>Figura 6.35</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en el caudal quebrada El Rincón - Sección 4 – K0+781.018.</i>	122
<i>Figura 6.36</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 – K2+778.739.</i>	122
<i>Figura 6.37</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 – K2+778.739.</i>	123
<i>Figura 6.38</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en el caudal quebrada El Rincón - Sección 13 – K2+778.739.</i>	123
<i>Figura 6.39</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 – K0+814.06.</i>	124
<i>Figura 6.40</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la velocidad del flujo Quebrada La Unión - Sección 7 – K0+814.06.</i>	124
<i>Figura 6.41</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en el caudal quebrada La Unión - Sección 7 – K0+814.06.</i>	125
<i>Figura 6.42</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2+883.20.</i>	125
<i>Figura 6.43</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2+883.20.</i>	126
<i>Figura 6.44</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en el caudal quebrada La Unión - Sección 30 – K2+883.20.</i>	126
<i>Figura 6.45</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0+781.018.</i>	127
<i>Figura 6.46</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0+781.018.</i>	127
<i>Figura 6.47</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en el caudal quebrada El Rincón - Sección 4 – K0+781.018.</i>	128
<i>Figura 6.48</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 – K2+778.739.</i>	128
<i>Figura 6.49</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 – K2+778.739.</i>	129
<i>Figura 6.50</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en el caudal quebrada El Rincón - Sección 13 – K2+778.739.</i>	129
<i>Figura 6.51</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 – K0 + 814.06.</i>	130
<i>Figura 6.52</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 – K0 + 814.06.</i>	130
<i>Figura 6.53</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en el caudal quebrada La Unión - Sección 7 – K0 + 814.06.</i>	131
<i>Figura 6.54</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2 + 883.2.</i>	131
<i>Figura 6.55</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2 + 883.2.</i>	132
<i>Figura 6.56</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en el caudal quebrada La Unión - Sección 30 – K2 + 883.2.</i>	132
<i>Figura 6.57</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0 + 781.018.</i>	133
<i>Figura 6.58</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0 + 781.018.</i>	133
<i>Figura 6.59</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en el caudal quebrada El Rincón - Sección 4 – K0 + 781.018.</i>	134
<i>Figura 6.60</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 – K2 + 778.739.</i>	134
<i>Figura 6.61</i>	<i>Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 – K2 + 778.739.</i>	135

<i>Figura 6.62 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en el caudal, quebrada El Rincón - Sección 13 – K2 + 778.739.</i>	135
<i>Figura 6.63 Variación de la profundidad del flujo durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 7 – K0 + 814.06.</i>	136
<i>Figura 6.64 Variación de la velocidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años quebrada La Unión – Sección 7 – K0 + 814.06.</i>	136
<i>Figura 6.65 Variación del caudal durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 7 – K0 + 814.06.</i>	137
<i>Figura 6.66 Variación de la profundidad del flujo durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 11 – K1 + 264.54.</i>	137
<i>Figura 6.67 Variación de la velocidad del flujo durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 11 – K1 + 264.54.</i>	138
<i>Figura 6.68 Variación del caudal durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 11 – K1 + 264.54.</i>	138
<i>Figura 6.69 Variación de la profundidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 30 – K2 + 883.20.</i>	139
<i>Figura 6.70 Variación de la velocidad del flujo durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 30 – K2 + 883.20.</i>	139
<i>Figura 6.71 Variación del caudal durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 30 – K2 + 883.20.</i>	140
<i>Figura 6.72 Variación de la profundidad del flujo durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 4 – K0 + 781.018.</i>	140
<i>Figura 6.73 Variación de la velocidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 4 – K0 + 781.018.</i>	141
<i>Figura 6.74 Variación del caudal durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 4 – K0 + 781.018.</i>	141
<i>Figura 6.75 Variación de la profundidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 8 – K1 + 602.812.</i>	142
<i>Figura 6.76 Variación de la velocidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 8 – K1 + 602.812.</i>	142
<i>Figura 6.77 Variación del caudal durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 8 – K1 + 602.812.</i>	143
<i>Figura 6.78 Variación de la profundidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 13 – K2 + 778.739.</i>	143
<i>Figura 6.79 Variación de la velocidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 13 – K2 + 778.739.</i>	144
<i>Figura 6.80 Variación del caudal durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 13 – K2 + 778.739.</i>	144
<i>Figura 6.81 Perfil de la elevación máxima de la superficie del agua en la quebrada La Unión para el periodo de retorno de 10 años.</i>	145
<i>Figura 6.82 Perfil de la elevación máxima de la superficie del agua en la quebrada La Unión para el periodo de retorno de 30 años.</i>	145
<i>Figura 6.83 Perfil de la elevación máxima de la superficie del agua en la quebrada La Unión para el periodo de retorno de 100 años.</i>	146
<i>Figura 6.84 Perfil de la elevación máxima de la superficie del agua en la quebrada El Rincón para el periodo de retorno de 10 años.</i>	146
<i>Figura 6.85 Perfil de la elevación máxima de la superficie del agua en la quebrada El Rincón para el periodo de retorno de 30 años.</i>	147
<i>Figura 6.86 Perfil de la elevación máxima de la superficie del agua en la quebrada El Rincón para el periodo de retorno de 100 años-</i>	147
<i>Figura 7.1 Inundaciones para un periodo de retorno de 10 años.</i>	160
<i>Figura 7.2 Inundaciones para un periodo de retorno de 30 años.</i>	161
<i>Figura 7.3 Inundaciones para un periodo de 100 años.</i>	162
<i>Figura 7.4 Amenaza por inundaciones para un periodo de retorno de 10 años.</i>	163

<i>Figura 7.5 Amenaza por inundaciones para un periodo de retorno de 30 años.</i>	164
<i>Figura 7.6 Amenaza por inundaciones para un periodo de retorno de 100 años.</i>	165
<i>Figura 7.7 Amenaza por inundaciones.</i>	166

CONTENIDO DE FOTOS

<i>Foto 1.1 Desbordamiento de la quebrada La Unión en la zona urbana.</i>	20
<i>Foto 1.2 Desbordamiento de la quebrada La Unión en la zona urbana.</i>	20
<i>Foto 2.1 Quebrada La Unión en el casco urbano.</i>	26
<i>Foto 2.2 Estructura de desviación del cauce de la quebrada La Unión.</i>	26
<i>Foto 2.3 Quebrada El Rincón en el barrio San Luis, al norte del municipio.</i>	26
<i>Foto 2.4 Quebrada El Rincón en uno de los barrios marginales en el municipio de La Unión.</i>	26
<i>Foto 2.5 Zanjón Los Muertos.</i>	27
<i>Foto 2.6 Zanjón Los Muertos.</i>	27
<i>Foto 2.7 Zanjón Negro o Moral contiguo a la vía.</i>	27
<i>Foto 2.8 Cañada El Lucero en la confluencia con el zanjón Las Palmas.</i>	28
<i>Foto 2.9 Cañada El Lucero aguas arriba de su desembocadura en la quebrada La Unión.</i>	28

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones es uno de los fenómenos naturales que mayores estragos y daños causan a nivel mundial. Si se tiene en cuenta la distribución geográfica de las distintas amenazas naturales, las inundaciones es, sin duda, el fenómeno más generalizado, pues afecta a todos los países del mundo. Algunos ejemplos recientes de inundaciones importantes son las acaecidas en Francia (1992), Europa Central (1992, 1993, 1995, 2002, 2005), Italia (1994, 2000), República Checa y Polonia (1997), Suecia (2000), Estados Unidos, Bangladesh, China, Guatemala, Honduras, Somalia y Sudáfrica durante la década de los 90 (European Comision, 1997a; 1997b; 2000; United Nations, 2002), y las inundaciones ocurridas en New Orleans como consecuencia del huracán Katrina en agosto de 2005.

En Colombia, las inundaciones originadas por los desbordamientos de los ríos son altamente frecuentes a lo largo y ancho del territorio nacional. Casi todas las regiones del país son vulnerables a las inundaciones, que pueden presentarse en los ríos principales, y también a veces la población resulta afectada por el desborde de quebradas y ríos pequeños.

Por ello es importante que las áreas amenazadas por este fenómeno sean identificadas con el fin de estimar la vulnerabilidad de los elementos expuestos y determinar los escenarios de riesgo. Éstos permitirán plantear y analizar diferentes alternativas con el propósito de prevenir, mitigar o controlar la amenaza por este tipo de fenómenos y definir posteriormente el uso adecuado de dichas áreas. En muchos casos, esto puede verse reflejado tanto en proyectos de reubicación como modificaciones de los planes de ordenamiento territorial en cuanto a las futuras áreas de expansión de los municipios. Para cumplir con esta tarea se debe desarrollar una metodología para delimitar las zonas vulnerables a este tipo de amenazas.

La Unión es uno de los 42 municipios que conforman el departamento del Valle del Cauca, siendo el cuarto municipio más pequeño en extensión (125 km²), localizado en la región norte del departamento a 163 km de la ciudad de Santiago De Cali y a 396 km de la ciudad de Bogotá D.C. Ubicado en la rivera occidental del río Cauca, entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental.

Gracias al desarrollo de la industria del vino, La Unión se ha convertido en un eje del norte del Valle del Cauca donde el comercio de uva sin procesar y vino es su mayor actividad económica. Las actividades económicas principales son la agricultura, la ganadería, las artesanías, minería y comercio.

Los cauces principales que atraviesan la cabecera municipal son la quebrada la Unión y la quebrada el Rincón.

El municipio de La Unión según sus características geográficas posee una región plana en el Valle del Río Cauca y otra montañosa ubicada al occidente donde sus principales corregimientos son Córcega, El Lindero, La Aguada y La Despensa.

El municipio de La Unión ha tenido problemas por inundaciones debido al desbordamiento de la quebrada La Unión y de algunas quebradas y acequias durante periodos de invierno intenso. En el presente estudio se determinó el nivel de amenaza por inundaciones en el perímetro urbano y las zonas de expansión del municipio de La Unión en el departamento del Valle del Cauca. Para ello se aplicó una metodología para la determinación de los mapas de amenaza, de acuerdo con los niveles de amenaza definidos. Además se efectuó la caracterización hidráulica y sedimentológica de los cauces de la zona de estudio con el fin de implementar un modelo matemático para simular el fenómeno de inundaciones.

El estudio comprende dos grandes partes:

En la primera se presenta la recolección de información y la conceptualización general del tema de las crecientes, los antecedentes históricos para la determinación de las amenazas por inundaciones, las mediciones de campo y el marco conceptual de la amenaza. Finalmente se establece una metodología para determinar los mapas de amenaza por inundaciones.

La segunda parte corresponde específicamente al desarrollo del estudio de amenaza en el municipio de La Unión, en el cual se determinan los mapas de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales aplicando los procedimientos indicados en la metodología establecida previamente.

Esta estructura general del estudio se detalla en los siguientes capítulos:

Capítulo Introductorio. En este capítulo se exponen los motivos que justifican el presente trabajo, los objetivos y la organización del documento.

Capítulo 1: Recolección de información. Se incluye la información recopilada acerca los eventos históricos registrados por diferentes organismos e instituciones, principalmente por la CVC. Esta revisión y análisis de los eventos históricos permitió establecer los cauces y canales a evaluar. El objetivo de este capítulo es brindar una idea más clara acerca del contexto de la zona de estudio.

Capítulo 2: Investigación de campo. En este capítulo se incluye la delimitación de la zona de estudio y los resultados de los trabajos de campo realizados por los grupos de topografía e hidrología.

Capítulo 3: Caracterización sedimentológica. En este capítulo se presentan los resultados de los análisis granulométricos del material del lecho de los cauces, incluyendo los principales diámetros característicos y se describen los métodos utilizados.

Capítulo 4: Estimación de la rugosidad. En este capítulo se presenta la metodología utilizada para estimar los valores de rugosidad de Manning tanto de los lechos de los cauces de la zona de estudio del municipio de La Unión como de las planicies de inundación para

posteriormente ingresarlos al modelo matemático. Para ello se determinaron los perfiles longitudinales y las pendientes medias de los cauces.

Capítulo 5: Metodología. En este capítulo se presenta la metodología establecida para la determinación de los mapas de amenaza por inundaciones, en la que se definen los límites o umbrales en la magnitud y la frecuencia de la amenaza para determinar los niveles de amenaza.

Capítulo 6: Modelación matemática. Aquí se especifican las características generales del modelo matemático bidimensional FLO-2D utilizado en el estudio así como las ecuaciones hidrodinámicas que resuelve el modelo. Es posiblemente el capítulo más importante, ya que con base en toda la información recopilada en los capítulos previos se procede a realizar la modelación hidrodinámica. Se incluyen los parámetros de entrada al modelo como la rugosidad de los lechos de los cauces y planicies. Se definen también los criterios empleados para la definición del área de estudio y la malla computacional, la topografía y la batimetría de los cauces considerados, la esquematización, la definición de las condiciones de frontera hidrodinámicas y sedimentológicas (tanto aguas arriba como aguas abajo) y los periodos de retorno adoptados para definir los distintos escenarios de recurrencia. Finalmente, este capítulo contiene la información referente a la calibración del modelo, así como el análisis de sensibilidad, la verificación y la modelación de los diferentes escenarios.

Capítulo 7: Evaluación de la amenaza. En este capítulo se determinan los diferentes escenarios contemplados y se establecen los diferentes niveles de amenaza por inundaciones para generar dichos mapas en el municipio de La Unión.

Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones. En este capítulo se consignan las principales conclusiones y recomendaciones del estudio.

1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

1.1. INFORMACIÓN DE EVENTOS HISTÓRICOS

En la Subdirección de Recursos Hídricos de la Dirección Técnica ambiental de la CVC se recopiló información muy valiosa relacionada con los eventos históricos de inundaciones presentadas en el municipio de La Unión. Se revisaron los diferentes informes y documentos que contienen dicha información, en los cuales se describe el comportamiento de las corrientes de agua que se encuentran en la zona de estudio del municipio de La Unión durante estos fenómenos, los niveles de agua alcanzados, los caudales registrados (si los hay) y las afectaciones a la infraestructura, instalaciones y viviendas del municipio. Los documentos en los que se obtuvo la información son los siguientes:

- Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de La Unión. (2001-2009).
- Informes de Inundaciones en el Municipio de La Unión. Informe técnico CVC. 2006.
- S.O.S. por el Valle del Cauca – Municipio de La Unión. Publicación No. 24. CVC. 2008.

Algunos de los aspectos más destacados en estos estudios sobre las características de las avenidas torrenciales e inundaciones acaecidas en el municipio de La Unión son los siguientes:

El problema por inundaciones en la zona urbana y de expansión urbana en el municipio de La Unión se presenta principalmente por desbordamientos de las quebradas La Unión y El Rincón (sobre todo la quebrada La Unión), por la alta intensidad de precipitaciones que se presenta en la subcuenca La Despensa y sus características fisiográficas como su forma, pendiente y cobertura forestal. Estas características ocasionan rápidas concentraciones de grandes volúmenes de agua de esorrentía, que al llegar a la zona urbana (zona plana) son desbordados ya que las secciones hidráulicas de las quebradas son insuficientes. La insuficiencia de las secciones hidráulicas de las corrientes de agua en la zona de estudio del municipio de La Unión se debe al alto nivel de sedimentación y a la desmedida construcción de viviendas sobre los lechos y las franjas forestales protectoras de los cauces, ignorando los antecedentes históricos de eventos naturales desastrosos.

La cabecera municipal del municipio de La Unión cuenta con alrededor de 14931 habitantes. Los barrios principales en orden descendente en cuanto al número de habitantes son San Pedro, El Jardín, Bellavista, La Cruz, Ciudadela Grajales, Popular, Belén, Las Brisas, El Carmen, Las Lajas, Fátima y El Prado. Varios de estos barrios se ven afectados al verse desbordados los cauces principales que recorren el casco urbano. Según el PBOT del municipio de La Unión, se han definido las siguientes amenazas naturales por inundaciones en la zona urbana:

Tabla 1.1. Zonificación de amenazas naturales por inundaciones.

Evento	Ubicación	Causa	Soporte
Inundaciones	A lo largo de las márgenes protectoras de las corrientes de agua del área urbana (quebradas El Rincón y La Unión y el zanjón Los Muertos).	Precipitación alta, desbordamientos de las corrientes de agua.	Antecedentes históricos, observación en sitio.

Según el artículo número 24 publicado por la CVC “SOS por el Valle del Cauca - municipio de La Unión”, en febrero de 2008, la cabecera municipal está construida sobre el lecho de crecientes de las quebradas El Rincón y La Unión. Debido a que el casco urbano está localizado en el piedemonte de la zona montañosa (en el entorno de la salida de los afluentes) y a la entrada del valle geográfico del río Cauca, periódicamente afronta las consecuencias de las inundaciones de tipo rápido por el dinamismo de las quebradas. Otro factor involucrado en las amenazas por inundaciones y avenidas torrenciales es el deterioro de la cuenca hidrográfica por detrimento de la cobertura forestal; esto ocasiona que para una misma condición de lluvias, las crecientes actuales sean más altas que las que se presentaban hace 20 años, razón por la cual existen más zonas inundables hoy en día. En cuanto al registro de eventos históricos por inundaciones, se tienen los siguientes:

- El miércoles 24 de mayo de 2006, la quebrada La Unión presentó una creciente correspondiente a un caudal aproximado de 50 m³/s, con material de arrastre (lodos, troncos de árboles, etc.). El mayor aporte de sedimentos identificado provenía de la subcuenca La Despensa. El evento afectó a 106 familias, las cuales debieron ser evacuadas a albergues temporales. Según comentarios de los habitantes de la zona, la última gran inundación, con características similares a la acontecida el día 24 de mayo de 2006, ocurrió hacia el año de 1970 (hace aproximadamente 36 años).
- El día 21 de noviembre de 2006 se presentaron precipitaciones de alta intensidad en la subcuenca La Despensa que ocasionaron una creciente torrencial de lodo, con madera y piedras. Dichos sedimentos finalmente llegaron a la quebrada La Unión, la cual generó inundaciones en viviendas y en el estadio Municipal.
- El día 5 de agosto de 2007 entre las 3:00 y las 4:00 PM, se presentó una inundación por el desbordamiento de la quebrada El Rincón que afectó 23 viviendas del sector, sin pérdida de vidas humanas. Según comentarios de los habitantes de la zona, la última gran inundación con características similares a la acontecida ocurrió en el año 1998 aproximadamente.

La CVC y la Administración Municipal adelantaron la construcción de un dique en tierra sobre la margen izquierda del cauce de la quebrada La Unión en el tramo comprendido

entre la Carrera 9 hasta la desembocadura de la cañada El Lucero a la quebrada La Unión, en una longitud de 585 m para proteger la zona nororiental del municipio que comprende los barrios Las Lajas, el estadio Municipal, Zona Industrial Grajales y la urbanización El Amparo. En este mismo tramo se construyeron gaviones para protección de orillas en una longitud de 30 m lineales; además se realizaron obras de descolmatación del cauce de la quebrada desde la desembocadura de la cañada El Lucero en la quebrada La Unión hasta 2 km aguas arriba de dicha confluencia.

Para el caso de la quebrada La Unión en el trayecto por los barrios La Cruz, El Prado, Belén y Ciudadela Grajales, el riesgo se presenta en el trayecto del cauce comprendido desde el puente de la Carrera 11 hasta la Carrera 20, en una longitud aproximada de 1000 m, en donde alrededor de 32 viviendas no tienen posibilidad de obras de mitigación para su protección.

En la Figura 1.1 se muestra la localización de la quebrada La Unión en la zona urbana del municipio de La Unión.

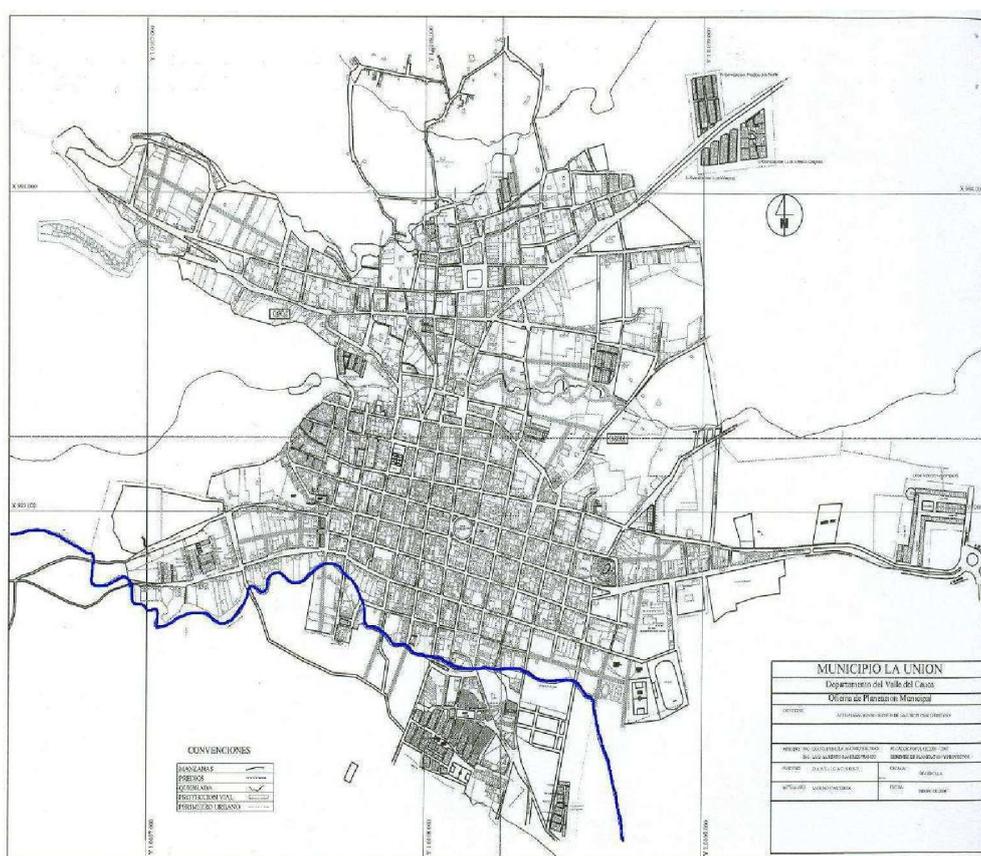


Figura 1.1 Plano de localización de la quebrada La Unión en la zona urbana.

La quebrada El Rincón es el otro cauce principal que origina inundaciones en las zonas urbanas y de expansión. Esta quebrada, en su recorrido por el barrio El Carmen, afecta al

desbordarse un sector llamado “Villa Esterilla”, ubicado sobre la Calle 23 con Carrera 20 dado que está localizado sobre la franja forestal protectora y el lecho de la quebrada. Villa Esterilla es uno de los sectores más críticos en cuanto a inundaciones en la zona de estudio del municipio de La Unión.

Análisis de la situación encontrada

El día 25 de mayo de 2006 (un día después de la inundación de la quebrada La Unión) la CVC realizó un recorrido a todo lo largo de esta quebrada (desde su entrega al canal Marginal hasta el sitio conocido como Campoalegre) en una distancia aproximada de 3000 m en la zona urbana, y un recorrido en la parte alta de la cuenca en los sectores conocidos como La Despensa, Paramillo y La Despensa donde se encontró lo siguiente:

- En la parte alta de la cuenca, en los sectores de Paramillo, La Despensa y La Despensa, se encontraron una serie de deslizamientos provocados por las fuertes lluvias, agravados por el exceso de pastoreo; esto provocó la caída de material sobre el cauce de la quebrada.
- La inundación se debió a una precipitación de alta intensidad que se produjo en la parte alta de la cuenca (48 mm en 35 min), cuyas características morfométricas causan la concentración de grandes aguas de escorrentía en poco tiempo. Esto agravó los deslizamientos ocurridos.
- Desde la entrega de aguas de la cañada El Lucero a la quebrada La Unión hasta el puente localizado aguas arriba en la Carrera 11, y en una longitud de 450 m, el desbordamiento ocurrió en los predios de la empresa Grajales y del señor Alberto Aristizábal, inundando a su paso el estadio Municipal, viviendas ubicadas en el barrio Las Lajas sobre la Carrera 7, Zona Industrial Grajales y la urbanización El Amparo. Es importante aclarar en este punto que el cauce de la quebrada La Unión fue desviado hace más de 40 años hacia el sureste, mediante un canal con cambios fuertes de dirección y curvas con ángulos casi rectos. En esta visita pudo apreciarse la tendencia de las aguas a seguir su trayecto por el antiguo cauce de la quebrada.
- El nivel de las aguas llegó hasta 1 m aproximadamente por encima del nivel de las losas de los puentes ubicados en las Carreras 11, Carrera 13, Carrera 15, Calle 11 y Carrera 19.
- En esta visita se determinó la zona urbana inundable más crítica por el desbordamiento de la quebrada La Unión. Esta zona abarca el puente de la Carrera 11 hasta la Carrera 20, donde la sección hidráulica de la quebrada es insuficiente por la presencia de viviendas ubicadas sobre el cauce.

A continuación se presentan algunas imágenes de la situación encontrada después de la creciente del 24 de mayo de 2006 de la quebrada La Unión.



Foto 1.1 Desbordamiento de la quebrada La Unión en la zona urbana.



Foto 1.2 Desbordamiento de la quebrada La Unión en la zona urbana.

1.2. INFORMACIÓN SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS CAUCES DE LA ZONA DE ESTUDIO DEL MUNICIPIO LA UNIÓN

Para el municipio de La Unión, la información existente de las corrientes en cuanto a pendiente, geometría, caudales y demás parámetros hidráulicos se consultó en la CVC, tanto en las oficinas de la Subdirección de Gestión Ambiental y Recursos Hídricos como en la biblioteca, durante el mes de abril de 2009. No obstante, la información acerca de la caracterización hidráulica y sedimentológica existente en la CVC del municipio de La Unión es muy escasa. Por lo tanto, la información encontrada se obtuvo del PBOT.

2. INVESTIGACIONES DE CAMPO

2. INVESTIGACIONES DE CAMPO

El reconocimiento de la zona de estudio en el municipio de La Unión se dio inicio con las visitas de campo realizadas los días 22 de abril, 11 y 12 de mayo y 31 de agosto de 2009, donde se recorrió el casco urbano y las zonas de expansión urbana para la identificación de las corrientes de agua (cauces naturales, acequias, canales) que deben ser estudiados. Además, se visitaron la oficina regional de la CVC y la Alcaldía Municipal (oficina de Planeación Municipal) para la recolección de información (Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT), Plan Local de Emergencias (PLE), informes del Comité Local de Prevención y Atención de Desastres (CLOPAD), registros de eventos históricos, informes técnicos, etc.).

2.1. CAUCES EN LA ZONA DE ESTUDIO

La información recopilada y consultada permitió identificar los diferentes cauces que transitan por el casco urbano del municipio de La Unión. Entre las corrientes que históricamente han generado problemas por inundaciones se destacan las quebradas La Unión y El Rincón, la cañada El Lucero, el zanjón Negro o Moral, zanjón Los Muertos (o de Aguas Negras), zanjón Martín Dosa y el zanjón Las Palmas. Muchos de ellos son cauces intermitentes, y por esta razón, gran parte de la población ha construido sus viviendas sobre los lechos de estos cauces.

Uno de los puntos críticos es la confluencia de la cañada El Lucero y el zanjón Las Palmas a la quebrada La Unión (aguas abajo de su desviación). Ambos cauces reciben las aguas de escorrentía de la zona montañosa aledaña. El zanjón Las Palmas desemboca a la cañada El Lucero, y ésta a la quebrada La Unión, pasando por una de las vías principales. Existen varias viviendas sobre la ronda de la cañada El Lucero las cuales se ven inundadas al desbordarse la cañada. Hay ocasiones en las que se presentan crecientes en los tres cauces a la vez, siendo éste un escenario bastante crítico. A veces ocurre que sólo se desborda la quebrada La Unión; sin embargo, cuando esto pasa sus aguas suben por los cauces de la cañada El Lucero y el zanjón Las Palmas, inundando los barrios aledaños a estas corrientes de agua. El día 8 de febrero de 2009 hubo una inundación en este sector.

Otro de los sectores críticos por inundaciones está sobre la Calle 7 con Carrera 11. Esta zona se inunda por desbordamiento del zanjón Negro o Moral ya que las viviendas están construidas sobre la franja forestal protectora, y la vía pasa por el lecho del cauce. Muchas de las personas que habitan esta zona son de bajos recursos y se ven obligados a vivir ahí por el bajo costo de los arriendos. Según los lugareños hubo una fuerte inundación en noviembre de 2007 donde varias de las viviendas se vieron afectadas.

2.2. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para la delimitación de la zona de estudio del municipio de La Unión se tuvo en cuenta el área del perímetro urbano y de expansión urbana (área total de 345.82 ha), puesto que la zona a estudiar debe abarcar ambos sectores. La zona urbana tiene un área total de 331.16 ha y la zona de expansión urbana tiene un área de 14.66 ha, aproximadamente. La zona de estudio se definió, por tanto, de 800 ha con un perímetro de 11.4 km de longitud para poder abarcar todos los sectores susceptibles a inundaciones. En la Figura 2.1 se indica de manera aproximada el perímetro de la zona de estudio del municipio de La Unión.

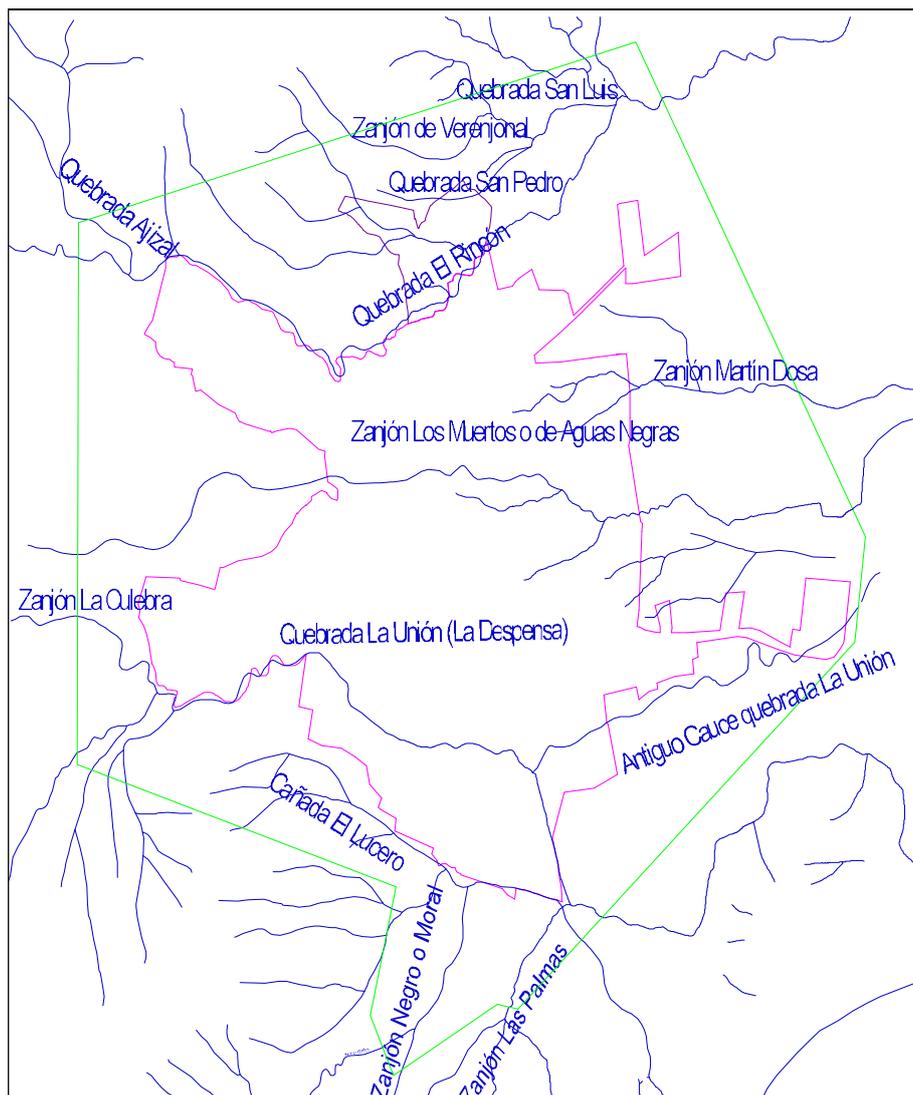


Figura 2.1 Localización de la zona de estudio en el municipio de Dagua.

2.3. RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES DE CAMPO

2.3.1. Levantamientos topobatimétricos

Los cauces monitoreados en el municipio de La Unión las quebradas La Unión y El Rincón, la cañada El Lucero, el zanjón Negro o Moral y zanjón Los Muertos (o de Aguas Negras). Muchos de ellos son cauces intermitentes, y por esta razón, gran parte de la población ha construido sus viviendas sobre los lechos de estos cauces.

La información topobatimétrica de los diferentes cauces que recorren la zona de estudio del municipio de La Unión es de gran importancia para efectuar la modelación matemática del fenómeno de inundaciones pues permite obtener resultados más precisos sobre las características de los cauces (pendiente y capacidad de transporte).

Para efectuar el levantamiento topobatimétrico de las secciones transversales de los diferentes cauces y canales se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Las secciones transversales deben localizarse preferiblemente en tramos rectos del cauce.
- Las secciones no deben estar ubicadas en sectores en los cuales existan barras centrales e islas en medio del cauce.
- Las bancas de las secciones deben ser estables.
- Las secciones deben ser representativas de la morfología del cauce en cada tramo, y en su conjunto deben ser representativas de la configuración morfológica de todo el cauce.
- Las secciones transversales deben localizarse donde se observen cambios importantes en la rugosidad del cauce y en la pendiente del río.
- Las secciones se deben ubicar aguas arriba y aguas abajo de la desembocadura de corrientes tributarias importantes.
- Deben tomarse secciones en las fronteras del modelo (aguas arriba, aguas abajo e internas).
- Se debe realizar el levantamiento de secciones transversales donde existan puentes, alcantarillas, diques, derivaciones, vertimientos, compuertas y demás estructuras hidráulicas que estén presentes en los tramos de estudio de los cauces a modelar.

De acuerdo con estas recomendaciones y teniendo en cuenta las características morfológicas observadas durante las visitas de reconocimiento, se definió el espaciamiento aproximado entre las secciones transversales a monitorear en los diferentes cauces, así:

- Quebrada La Unión: secciones transversales espaciadas cada 100 m
- Antiguo cauce de la quebrada la Unión: secciones transversales cada 190 m
- Quebrada El Rincón: secciones transversales espaciadas cada 250 m
- Zanjón Los Muertos: secciones transversales espaciadas cada 200 m
- Cañada El Lucero: secciones transversales espaciadas cada 160 m
- Zanjón Negro o Moral: secciones transversales espaciadas cada 230 m

Es preciso señalar que debido a limitaciones presupuestales en este estudio se detallaron más los cauces principales, levantando en consecuencia un mayor número de secciones transversales en estas corrientes.

Teniendo en cuenta que la quebrada La Unión es el cauce principal que recorre el municipio de La Unión debió ser caracterizado de forma más detallada. Por ello, en la quebrada La Unión el espaciamiento entre secciones es menor que en las demás corrientes de agua. Sin embargo, a pesar del gran espaciamiento entre las secciones transversales de las acequias y quebradas, las secciones a levantar son suficientes para reflejar la variación de la geometría (o morfología) de dichas corrientes puesto que éstas son canales cuya variación geométrica a lo largo de su recorrido por la zona de estudio no es significativa.

A continuación se indica la extensión de los tramos a modelar de cada uno de los cauces, el número total de las secciones transversales levantadas y la localización de las secciones seleccionadas como fronteras del modelo matemático para el municipio de La Unión.

Quebrada La Unión

Esta quebrada es el cauce principal que atraviesa el municipio de La Unión, y en crecientes, es la que más afecta al casco urbano. Debido a ello la quebrada La Unión fue desviada en un punto al sur del municipio mediante un dique, modificando la dirección del cauce en dirección sureste (antiguamente el cauce fluía en dirección este). Aunque aparentemente el antiguo cauce de esta quebrada no presenta ninguna amenaza para la población se ha decidido incluirlo en el estudio ya que las corrientes naturales tienen una tendencia a recuperar su lecho original.

La longitud total del tramo a modelar de la quebrada La Unión es de 3430 m y se levantaron 35 secciones transversales espaciadas aproximadamente cada 100 m en el perímetro urbano y en la zona de expansión urbana.

La frontera superior se ubicó al suroccidente del municipio, aproximadamente 2900 m aguas arriba del punto de la confluencia del zanjón Las Palmas y de la cañada El Lucero en la quebrada La Unión, 2400 m aguas arriba del punto donde la quebrada fue desviada y 400 m aguas arriba de la desembocadura del zanjón La Culebra en ella.

La frontera inferior se localizó 150 m aguas abajo del punto donde confluyen los cauces mencionados en la quebrada La Unión y 640 m aguas abajo del punto donde la dirección del cauce de la quebrada fue modificada.

La longitud del tramo a modelar del antiguo cauce de la quebrada La Unión es de 1700 m, y se levantaron 10 secciones transversales espaciadas aproximadamente cada 190 m en la zona de estudio. La frontera interna aguas arriba se ubicó en la estructura de desviación del cauce de la quebrada La Unión, y la frontera inferior se localizó 1700 m aguas abajo de este punto.

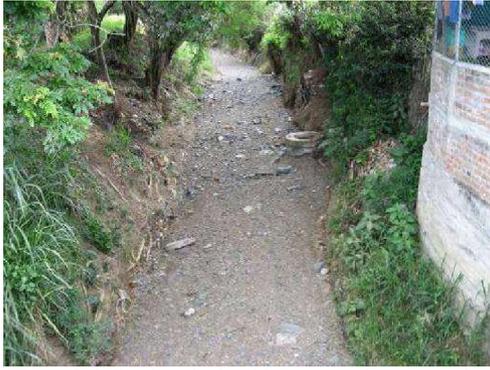


Foto 2.1 Quebrada La Unión en el casco urbano.



Foto 2.2 Estructura de desviación del cauce de la quebrada La Unión.

Quebrada El Rincón

La longitud total del tramo a modelar de la quebrada El Rincón es de alrededor de 3470 m y se levantaron 15 secciones transversales espaciadas aproximadamente cada 250 m.

La frontera superior del tramo se localizó 250 m aguas arriba de la confluencia de la quebrada Ajizal en la quebrada El Rincón y la frontera inferior se ubicó 250 m aguas arriba de la confluencia de la quebrada San Luis en dicho cauce.



Foto 2.3 Quebrada El Rincón en el barrio San Luis, al norte del municipio.



Foto 2.4 Quebrada El Rincón en uno de los barrios marginales en el municipio de La Unión.

Zanjón Los Muertos (o zanjón de Aguas Negras)

Aunque según los lugareños y las autoridades del municipio de La Unión este cauce no presenta riesgos o amenazas para la población en cuanto a inundaciones, es necesario estudiarlo ya que atraviesa el municipio en dirección oeste – este, con un caudal considerable.

La longitud total del tramo a modelar es de 2500 m y se levantaron 13 secciones transversales espaciadas aproximadamente cada 200 m.

La frontera superior del tramo se situó en el límite de la zona de estudio, en un punto cuyas coordenadas son: 993157 N; 1106612 E.

La frontera inferior se ubicó a 2500 m aguas abajo de la frontera superior.



Foto 2.5 Zanjón Los Muertos.



Foto 2.6 Zanjón Los Muertos.

Zanjón Moral (o zanjón Negro)

La longitud total del tramo a modelar es de 700 m y se levantaron 4 secciones transversales espaciadas aproximadamente cada 230 m.

La frontera superior del tramo se localizó 700 m aguas arriba de la desembocadura del zanjón Moral en la cañada El Lucero y la frontera inferior interna se ubicó en la desembocadura del zanjón en la quebrada La Unión.



Foto 2.7 Zanjón Negro o Moral contiguo a la vía.

Cañada El Lucero

Este es otro de los cauces intermitentes que son críticos en el momento de una creciente. Por lo tanto debe ser incluido en el estudio.

La longitud total del tramo a modelar es de 1500 m y se levantaron 10 secciones transversales espaciadas cada 160 m aproximadamente.

La frontera superior se localizó a 1500 m aguas arriba de la confluencia de esta cañada en la quebrada La Unión; la frontera inferior interna se ubicó en la desembocadura de la cañada El Lucero en la quebrada La Unión.



Foto 2.8 Cañada El Lucero en la confluencia con el zanjón Las Palmas.



Foto 2.9 Cañada El Lucero aguas arriba de su desembocadura en la quebrada La Unión.

En síntesis, en la campaña topográfica en la zona de estudio del municipio de La Unión se realizó el levantamiento topobatimétrico de 87 secciones transversales, distribuidas así: 35 secciones en la quebrada la Unión, 10 secciones en el antiguo cauce de la quebrada La Unión, 15 secciones en la quebrada El Rincón, 13 secciones en el zanjón Los Muertos o de Aguas Negras, 4 secciones en el zanjón Negro o Moral y 10 secciones en la cañada El Lucero.

Las secciones transversales de todos los cauces fueron abscisadas desde aguas arriba hacia aguas abajo, iniciando en la abscisa K0 + 000 en las fronteras superiores. En las Figuras 3 a 8 se muestran algunas de las secciones levantadas en los diferentes cauces de la zona de estudio del municipio de La Unión.

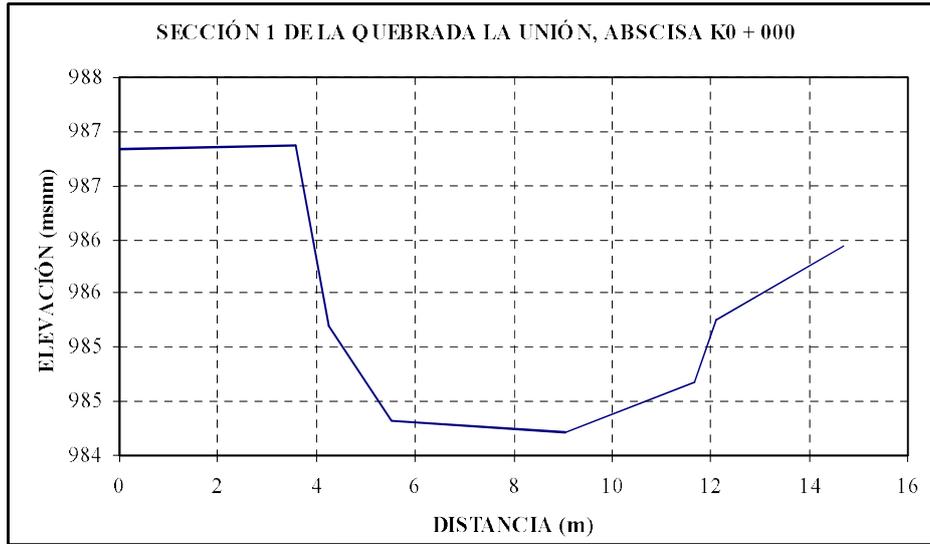


Figura 2.2 Sección transversal de la quebrada La Unión en la abscisa K0 + 000.

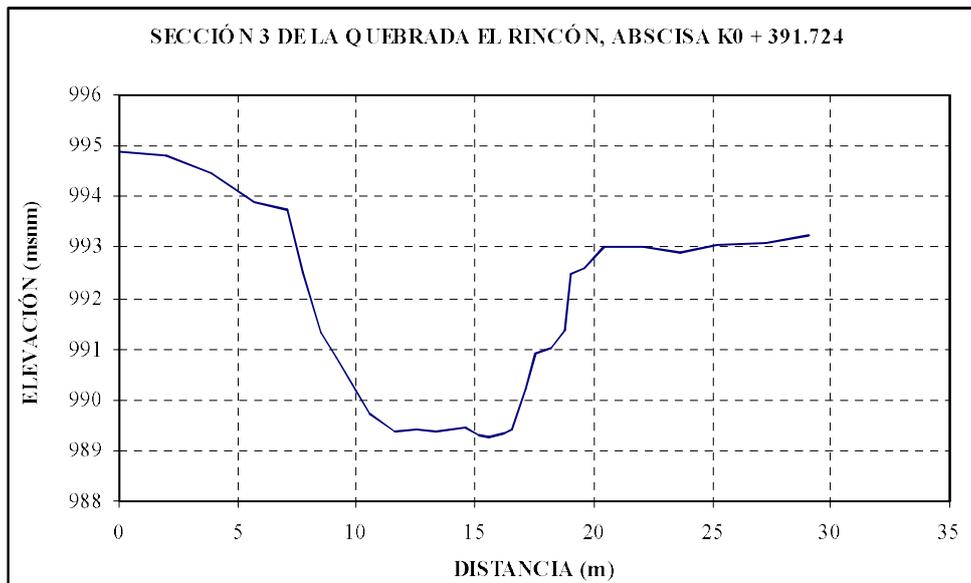


Figura 2.3 Sección transversal de la quebrada El Rincón en la abscisa K0 + 391.724.

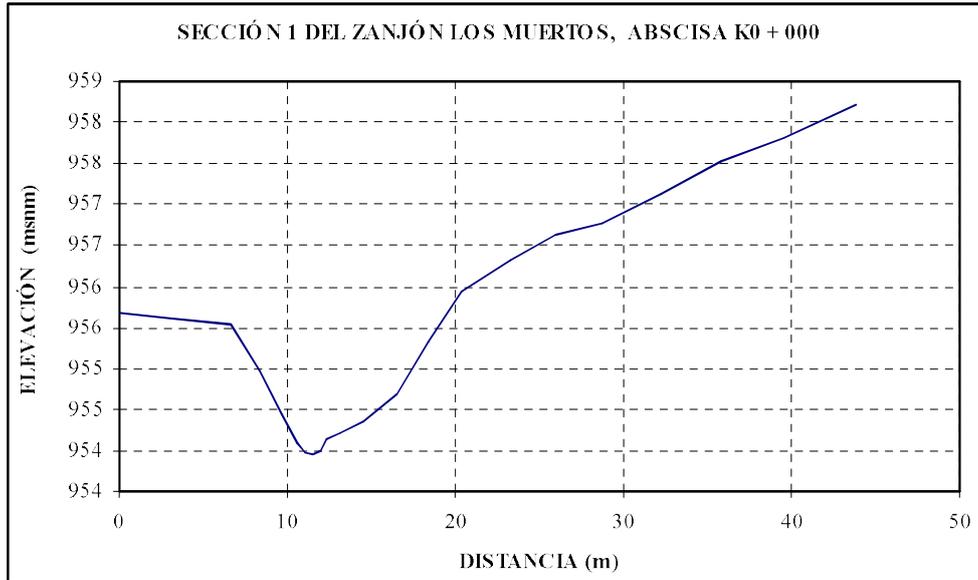


Figura 2.4 Sección transversal del zanjón Los Muertos o de Aguas Negras en la abscisa K3 + 017.651.



Figura 2.5 Sección transversal del zanjón Negro o Moral en la abscisa K0 + 000.

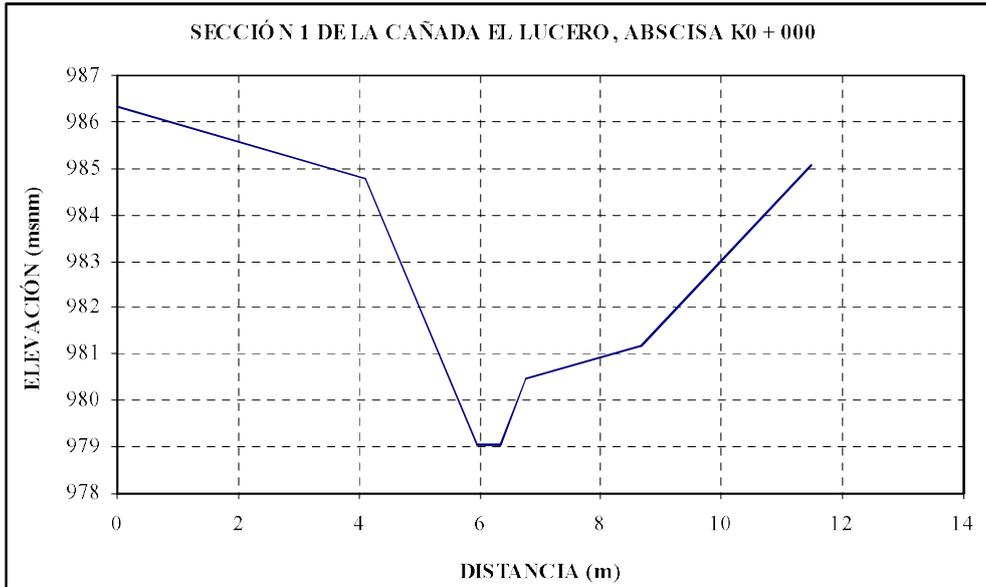


Figura 2.6 Sección transversal de la cañada El Lucero en la abscisa K0 + 000.

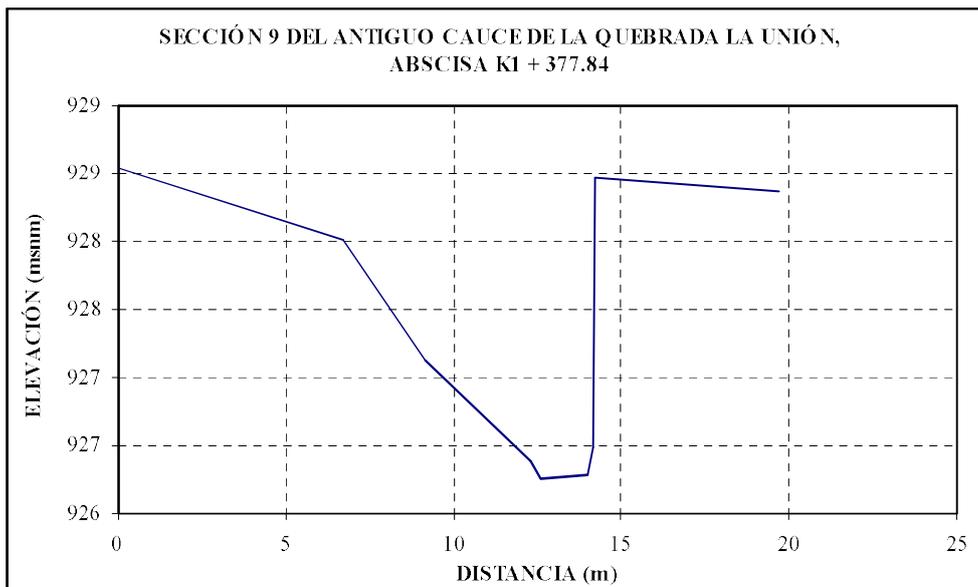


Figura 2.7 Sección transversal del antiguo cauce de la quebrada La Unión en la abscisa K1 + 377.84.

Las 87 secciones transversales levantadas se incluyen en el Anexo 2.1 con sus tablas de datos respectivas.

2.3.2. Caracterización hidrológica

Para efectuar la modelación de los diferentes eventos catastróficos de inundaciones y en el municipio de La Unión fue necesario determinar las condiciones hidrológicas en las fronteras establecidas en el modelo matemático. En las fronteras superiores de los tramos a modelar de las quebradas La Unión, El Rincón, el zanjón Negro o Moral y la cañada El Lucero se estimaron, mediante modelación matemática (modelo hidrológico HEC-HMS), los caudales para los diferentes periodos de retorno definidos en la metodología para la determinación de la amenaza para los dos fenómenos (10, 30 y 100 años).

También se determinó la información de la pluviosidad (intensidad y duración) en la zona de estudio para ser incluida en la simulación del fenómeno de inundaciones para los diferentes periodos de retorno especificados.

Los caudales obtenidos en las fronteras de los cauces a modelar a partir de los histogramas de lluvia para los periodos de retorno de eventos de lluvia diaria de 10, 30 y 100 años se presentan en las Figuras 9 a 12. Los caudales máximos en la quebrada La Unión para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, son 29.9 m³/s, 46.9 m³/s y 66 m³/s, en la quebrada El Rincón son 7.12 m³/s, 10.96 m³/s y 15.13 m³/s, en el zanjón Moral son 4.02 m³/s, 6.35 m³/s y 8.85 m³/s y en la cañada El Lucero son 1.48 m³/s, 2.14 m³/s y 2.76 m³/s, respectivamente.

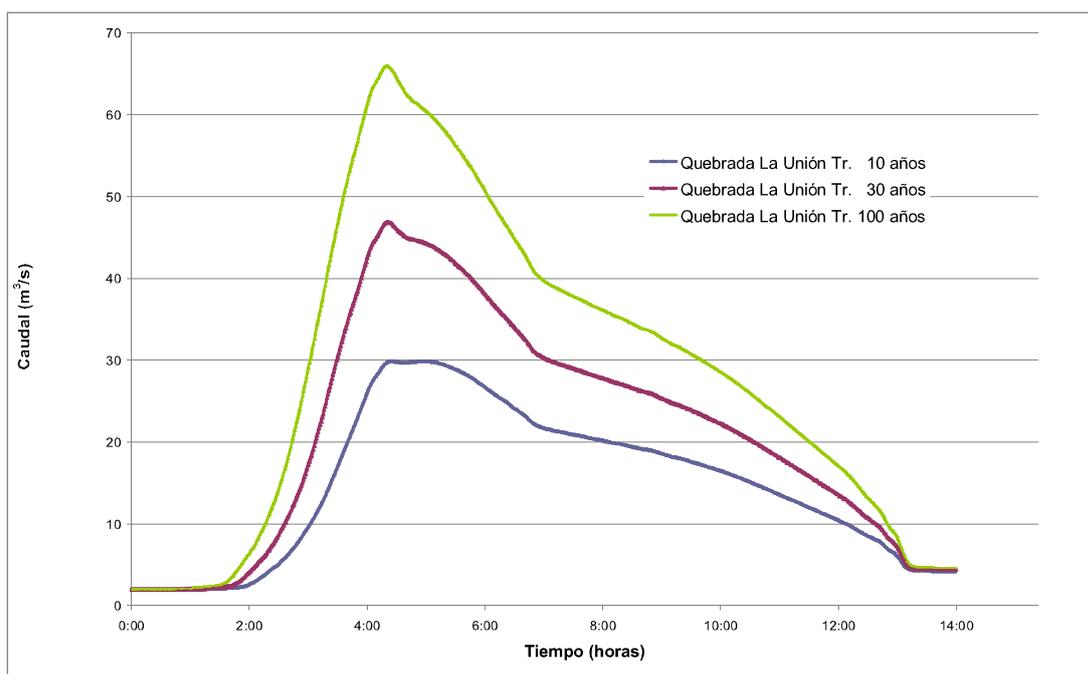


Figura 2.8 Hidrógrafas de caudales en la quebrada La Unión para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.

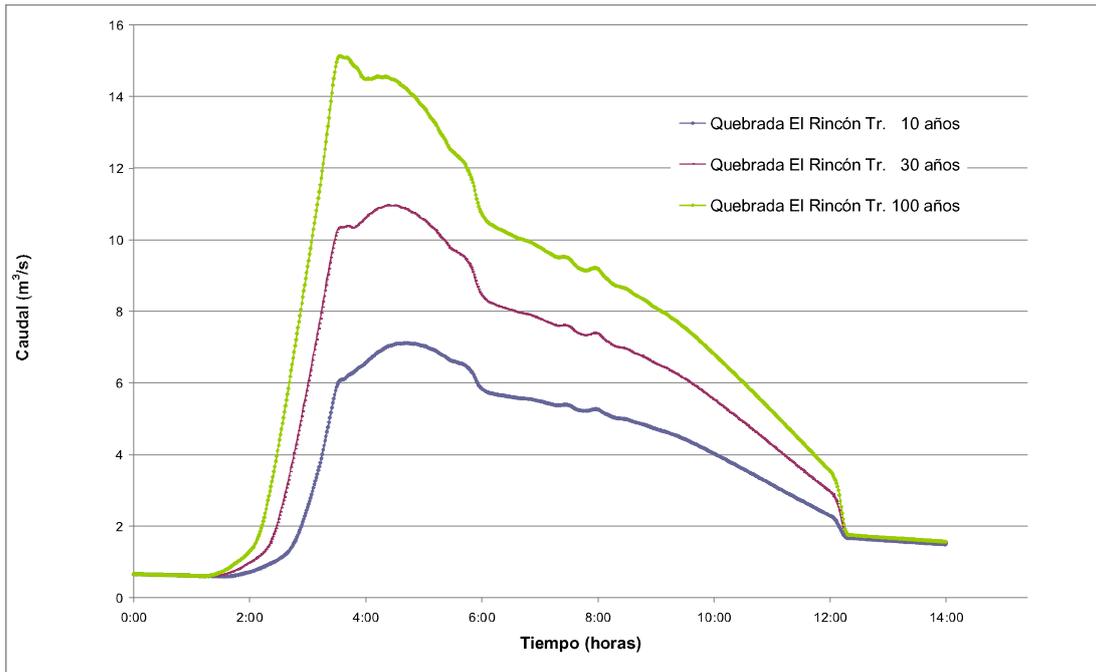


Figura 2.9 Hidrógrafas de caudales en la quebrada El Rincón para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.

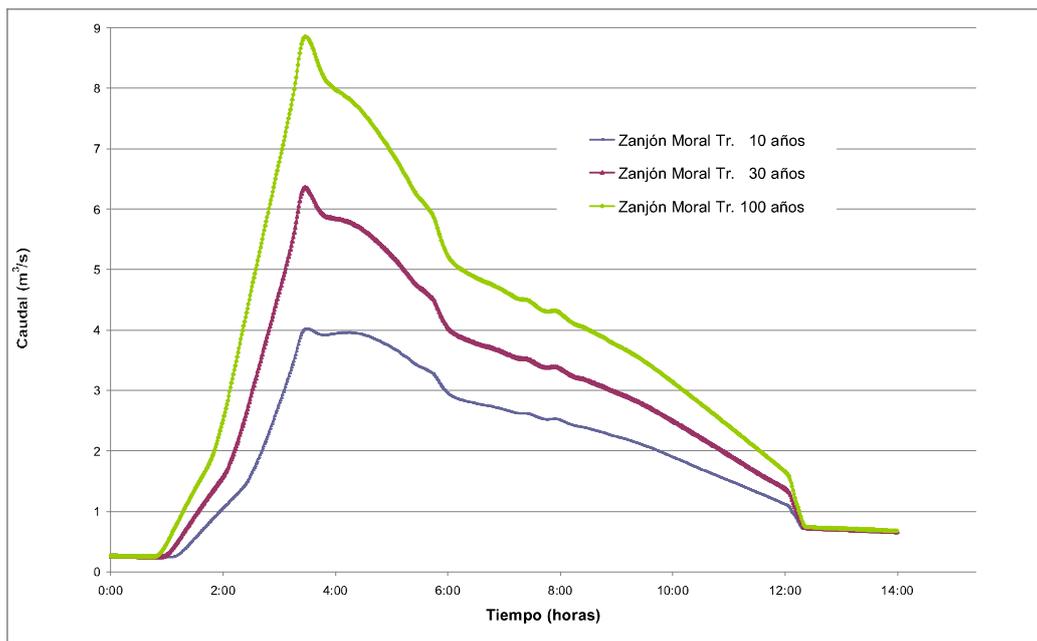


Figura 2.10 Hidrógrafas de caudales en el zanjón Moral o Negro para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.

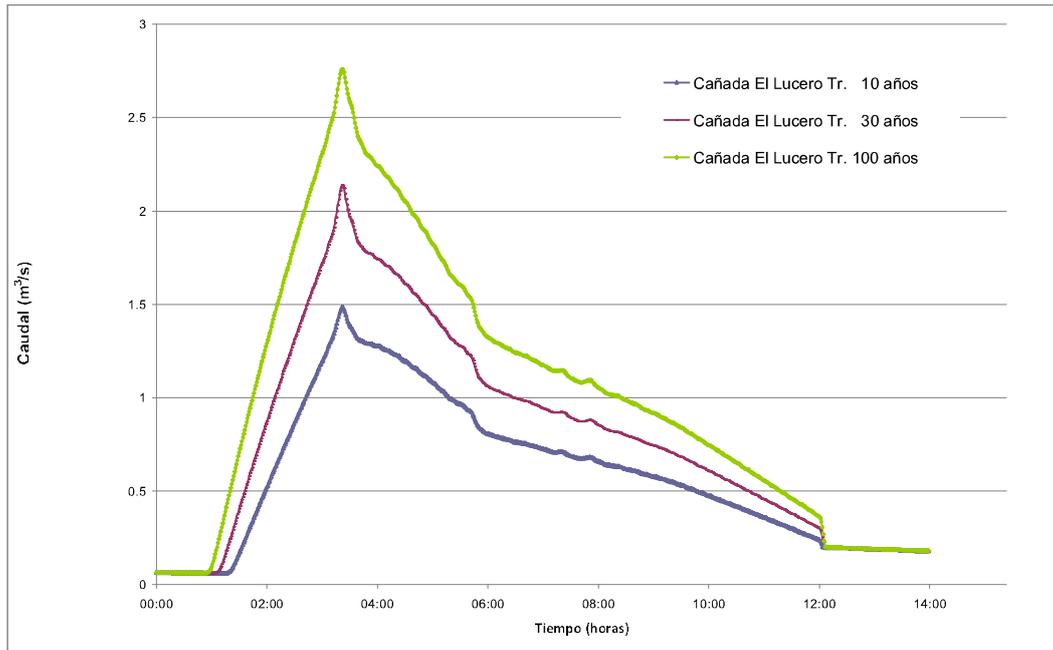


Figura 2.11 Hidrógrafas de caudales en la cañada El Lucero para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.

Durante las crecientes los ríos transportan materiales, escombros y sedimentos que aumentan los volúmenes movilizados; por esta razón, las hidrógrafas estimadas se incrementaron en un 5%, las cuales se utilizaron para simular el fenómeno de inundaciones.

De acuerdo con las especificaciones y requerimientos del modelo matemático FLO-2D, la modelación de la precipitación en la zona de estudio requiere la información del volumen total de la lluvia para los diferentes periodos de retorno considerados y la curva porcentual de distribución de la lluvia (tiempo (h) vs. porcentaje (%)). Las precipitaciones totales para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años son 82 mm, 97 mm y 113 mm, respectivamente. En la Figura 2.12 se muestran los histogramas de lluvias para los periodos de retorno estipulados en la zona de estudio del municipio de Unión.

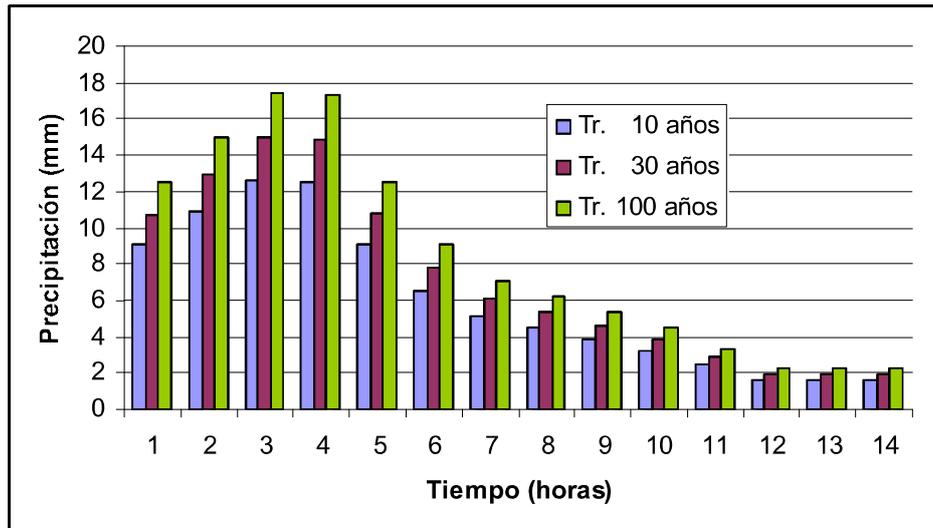


Figura 2.12 Histogramas de precipitaciones para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años en la zona de estudio del municipio de La Unión.

Vale la pena mencionar que a la quebrada El Rincón desembocan, dentro del área de estudio, las quebradas El Ajizal, San Pedro y los zanjones Honda y Potreritos. Las hidrógrafas de estos cauces fueron incluidas en el modelo matemático como aportes a la quebrada El Rincón, y fueron estimadas mediante la correlación de áreas, utilizando los caudales determinados para la quebrada El Rincón en la frontera superior del modelo y el área de la subcuenca de este cauce. Lo mismo ocurre en la quebrada La Unión, a la cual desembocan las quebradas La Defensa y El Tigre. Se realizó el mismo procedimiento para determinar las hidrógrafas de estos cauces para incluirlas como aportes a la quebrada La Unión en el modelo matemático. Al zanjón Negro o Moral desemboca el zanjón El Peñón, para el cual se realizó el mismo procedimiento con el fin de incluir estos caudales como aportes al zanjón Negro en el modelo.

3. CARACTERIZACIÓN SEDIMENTOLÓGICA

3. CARACTERIZACIÓN SEDIMENTOLÓGICA

Con el fin de caracterizar los materiales del lecho del río, principalmente en cuanto a la distribución de tamaños, se llevó a cabo un programa de mediciones de campo. Se tomaron muestras de materiales finos y gruesos, las cuales fueron procesadas y analizadas posteriormente en laboratorio y oficina. La información obtenida de las curvas granulométricas de los materiales del lecho permite estimar las rugosidades de los cauces, factor determinante durante el proceso de calibración del modelo matemático de los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales. La caracterización de los sedimentos finos de los lechos de los cauces permite determinar las propiedades reológicas del material que puede ser arrastrado por los cauces en una avenida torrencial.

Para determinar las curvas de distribución de tamaños o curvas granulométricas de los materiales gruesos del lecho del cauce se adoptó el método de muestreo superficial por malla (ver Sección 3.1). Se optó por este método teniendo en cuenta los tamaños relativamente grandes de los materiales de los lechos de la quebrada La Unión, la quebrada El Rincón y el Zanjón Negro o Moral (gravas, guijarros y cantos); el método tradicional volumétrico o másico requeriría la recolección de volúmenes muy elevados de materiales, resultando demasiado costoso y poco práctico su transporte y posterior análisis de laboratorio.

El muestreo superficial del material del lecho se realizó mediante registros fotográficos tomando áreas de 1 m x 1 m debido al tamaño máximo de los sedimentos en diferentes sectores de los tramos de estudio considerados representativos de las características granulométricas de los materiales de los lechos. De acuerdo con el criterio de Diplas & Fripp (1992), el área muestreada debe ser mayor o igual a 100 veces el cuadrado del diámetro máximo observado.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE MUESTREO

Con base en las fotografías del lecho de los cauces tomadas durante las visitas de campo se realizó el análisis granulométrico del material superficial aplicando el método de malla-número. Las fotografías se tomaron utilizando marcos de PVC de 1 m² de área, cuyas dimensiones son de 1 m x 1 m, demarcados con cintas métricas que sirven como referencia de medida en cada lado.

El método de malla-número únicamente considera las partículas en las intersecciones de una malla que abarca el área de muestreo predefinida de 1 m². El procesamiento digital consiste en trazar una malla sobre la fotografía, delinear las partículas en las intersecciones de la malla y medir el diámetro o eje medio (eje b) de cada una de ellas (Figura 3.1). Para mallas de dimensiones de 1 m x 1 m el procedimiento consiste en contar las piedras que se encuentran en las intersecciones y clasificarlas en los siguientes rangos de tamaños: menores de 10 mm; 10-20 mm; 20-30 mm; 30-40 mm; 40-50 mm; 50-60 mm; 60-70 mm; 70-80 mm; 80-90 mm; y 90-100 mm. Con el número de partículas correspondiente a cada

rango se calcula el porcentaje con respecto al número total de intersecciones. Las intersecciones de la malla que se encuentran vacías corresponden al porcentaje de partículas más finas (menores que 10 mm). Con esta información se construye la curva de distribución de frecuencias (curva granulométrica), la cual permite estimar los diámetros y parámetros característicos del material del lecho.

Para la adecuada implementación del método de muestreo y análisis adoptado (Bunte & Abt, 2001) se tuvieron en cuenta las siguientes recomendaciones de la bibliografía consultada:

- Selección de un sitio representativo de los diferentes tamaños de partículas encontradas en la playa o barra del lecho del cauce.
- Toma de fotografías digitales normales al lecho para evitar distorsión en la escala.
- La malla debe tener un espaciamiento aproximadamente igual al diámetro máximo encontrado (d_{max}), el cual corresponde a la longitud del eje medio de la partícula de sedimento de mayor tamaño.
- El área muestreada debe ser mayor o igual a $100(d_{max})^2$ (Diplas y Fripp, 1992).

Teniendo en cuenta lo anterior, para realizar el muestreo fotográfico en cada uno de los sitios de estudio se utilizaron marcos de dimensiones de 1 m x 1 m con un espaciamiento de 100 mm, considerando partículas con un diámetro máximo encontrado, d_{max} , de 100 mm.

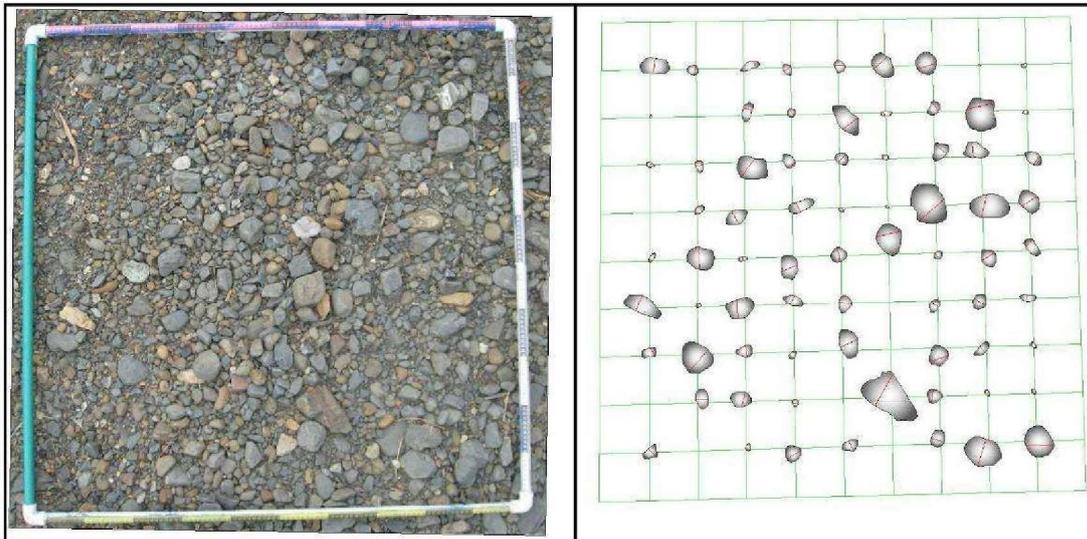


Figura 3.1 Identificación de partículas para el análisis granulométrico de malla-número (a) Muestra fotográfica (b) Partículas delimitadas en las intersecciones de la malla.

3.2. MÉTODOS DE CONVERSIÓN

En ocasiones es necesario combinar dos o más métodos de muestreo para obtener una distribución de tamaños de partículas representativas, el cual se denomina método híbrido.

Diferentes métodos de muestreo y análisis aplicados al mismo lecho o depósito de materiales producen diferentes distribuciones de tamaño de partículas (Bunte y Abt, 2001). Debido a que las partículas grandes ocupan un mayor volumen que las partículas más pequeñas para idéntica área superficial, el muestreo por el método de malla-número tiende a ser distorsionado o sesgado hacia los tamaños de materiales más gruesos. En consecuencia, los resultados de las muestras colectadas y analizadas por diferentes métodos deben ser transformados a una misma categoría de método de muestreo y análisis, y así poder integrarlas (cuando se emplea un método híbrido) o simplemente para propósitos de comparación con los resultados de otras muestras. Esta transformación se logra aplicando factores de conversión a las distribuciones de tamaño de partículas obtenidas de acuerdo con la técnica de muestreo y el método de análisis empleado.

Algunos autores han propuesto diferentes métodos y modelos para convertir las distribuciones de tamaños de partículas entre las diferentes categorías de muestreo y análisis. El proceso de conversión es complicado debido a que el sesgo hacia los materiales gruesos o hacia los finos no es lineal y, además, éste varía con el tamaño de los granos.

El método o modelo de conversión propuesto por Kellerhals y Bray (1971) es uno de los más usados y permite convertir una curva granulométrica obtenida empleando un determinado método de muestreo (M1) y una técnica de análisis de tamaños (A1) a otro método de muestreo (M2) y de análisis de tamaños (A2) según la siguiente expresión:

$$P_{M2-A2} = \frac{P_{M1-A1} \times d_i^x}{\sum (P_{M1-A1} \times d_i^x)} \quad \text{ec. (1)}$$

donde:

P_{M1-A1} = Porcentaje de la fracción de tamaño D_i obtenido empleando el método de muestreo M_1 de análisis A_1

P_{M2-A2} = Porcentaje equivalente de la fracción de tamaño D_i si se emplea el método de muestreo M_2 y de análisis A_2

d_i = Diámetro medio geométrico de la fracción de tamaño entre i y $i+1$

x = Exponente que depende de los métodos de muestreo y los tipos de análisis (empleados y equivalentes)

Los diferentes procedimientos de muestreo pueden finalmente clasificarse en 3 tipos: volumétrico, por área y por malla. Los métodos de análisis de tamaños son de dos clases:

frecuencia por peso o frecuencia por número. Por lo tanto, resultan seis posibles formas de muestrear y analizar la distribución de tamaños del material del lecho de un cauce.

En la Tabla 3.1 se presenta el valor del exponente x a utilizar en la expresión de Kellerhals y Bray para convertir la curva granulométrica obtenida por un cierto método de muestreo y de análisis a una equivalente empleando otro método de muestreo y de análisis.

Tabla 3.1. Valores del exponente x para la expresión de Kellerhals y Bray para convertir curvas granulométricas obtenidas por diferentes métodos de muestreo.

Conversión de	Conversión a				
	Volumen-frecuencia por peso	Malla-frecuencia por número	Malla-frecuencia por peso	Área-frecuencia por número	Área-frecuencia por peso
Volumen-frecuencia por peso	0	0	3	0	1
Malla-frecuencia por número	0	0	3	-2	1
Malla-frecuencia por peso	-3	-3	0	-5	-2
Área-frecuencia por número	0	2	5	0	3
Área-frecuencia por peso	-1	-1	2	-3	0

El análisis de una muestra volumétrica por el método de frecuencia por número es técnicamente posible mas no muy práctico, por lo cual no se incluye en el cuadro anterior (Bunte y Abt, 2001).

En el caso del municipio de La Unión, las quebradas La Unión y El Rincón presentan las características de quebradas con lechos de gravas, guijarros y piedras. Debido a ello y teniendo en cuenta las dificultades para realizar muestreos volumétricos de la capa superficial de un cauce con lecho de gravas y piedras (por los grandes volúmenes de materiales requeridos) se optó por emplear en este cauce el método de muestreo superficial por malla y la técnica de análisis de frecuencia por número (método malla-número). En estos muestreos se siguió el procedimiento fotográfico referido en la Sección 3.1.

Puesto que las muestras superficiales fueron recolectadas empleando el muestreo superficial por el método de malla-número, es necesario convertir las granulometrías obtenidas al método de muestreo volumétrico y análisis de frecuencia por peso. Para efectuar esta conversión el valor del exponente x a aplicar en la expresión de Kellerhals y

Bray es igual a 0 (ver Tabla 3.1). Esto significa finalmente que las curvas granulométricas obtenidas mediante muestreo volumétrico y análisis de frecuencia por peso y muestreo por el método superficial por malla y análisis de frecuencia por número son idénticas, de acuerdo con el modelo del cubo sin vacíos propuesto por Kellerhals y Bray (1971).

3.3. DIÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MATERIAL DEL LECHO DE LOS CAUCES DEL MUNICIPIO DE LA UNIÓN

En las Tablas 3.2 a 3.4 y en las Figuras 3.2 y 3.3(a) se presentan respectivamente los diámetros característicos y las curvas granulométricas obtenidas del análisis del material del lecho por el método de malla-número en diferentes sectores de las quebradas La Unión y El Rincón y del Zanjón Negro o Moral, así como también las curvas granulométricas promedio y sus correspondientes diámetros característicos. En las tablas de diámetros característicos se puede apreciar que en algunos casos no hay valores de diámetros correspondientes a d_{10} , d_{16} y d_{30} ; esto sucede porque el método utilizado registra porcentajes para diámetros mayores a 5 mm y en muchas de las fotografías analizadas el porcentaje de material menor a 5 mm fue superior al 30% (d_{30}), dejando de esta manera sin registros a los diámetros o tamaños mencionados.

Tabla 3.2. Diámetros característicos del material del lecho de la quebrada La Unión.

Lugar de la muestra	Tipo de muestra	d_{10} (mm)	d_{16} (mm)	d_{30} (mm)	d_{50} (mm)	d_{70} (mm)	d_{84} (mm)	d_{90} (mm)
Quebrada La Unión en el puente de la carrera 19	Muestra superficial	-	-	13	13	25	44	54
Quebrada La Unión en el puente de la carrera 13	Muestra superficial	-	-	11	23	34	50	53
Paso de Oro (frontera superior)	Muestra superficial	-	-	10	21	34	50	57
Barrio Las Camelias (frontera superior)	Muestra superficial	-	-	-	-	31	60	71
Quebrada La Unión en la confluencia con la quebrada El Lucero	Muestra superficial	-	-	-	11	23	44	50
Quebrada La Unión en el puente de la carrera 11	Muestra superficial	-	2	9	20	26	34	42
Quebrada La Unión en el puente de la carrera 10	Muestra superficial	-	2,5	5,2	12	19	28	32
Quebrada La Unión en el puente cerca al dique de desvío de la quebrada	Muestra superficial	4	5	12	22	31	41	49

Quebrada La Unión en la vía Panamericana	Muestra superficial	-	-	6	16	31	46	63
Curva granulométrica promedio	Muestra superficial	3	3,5	6	15	30	44	50

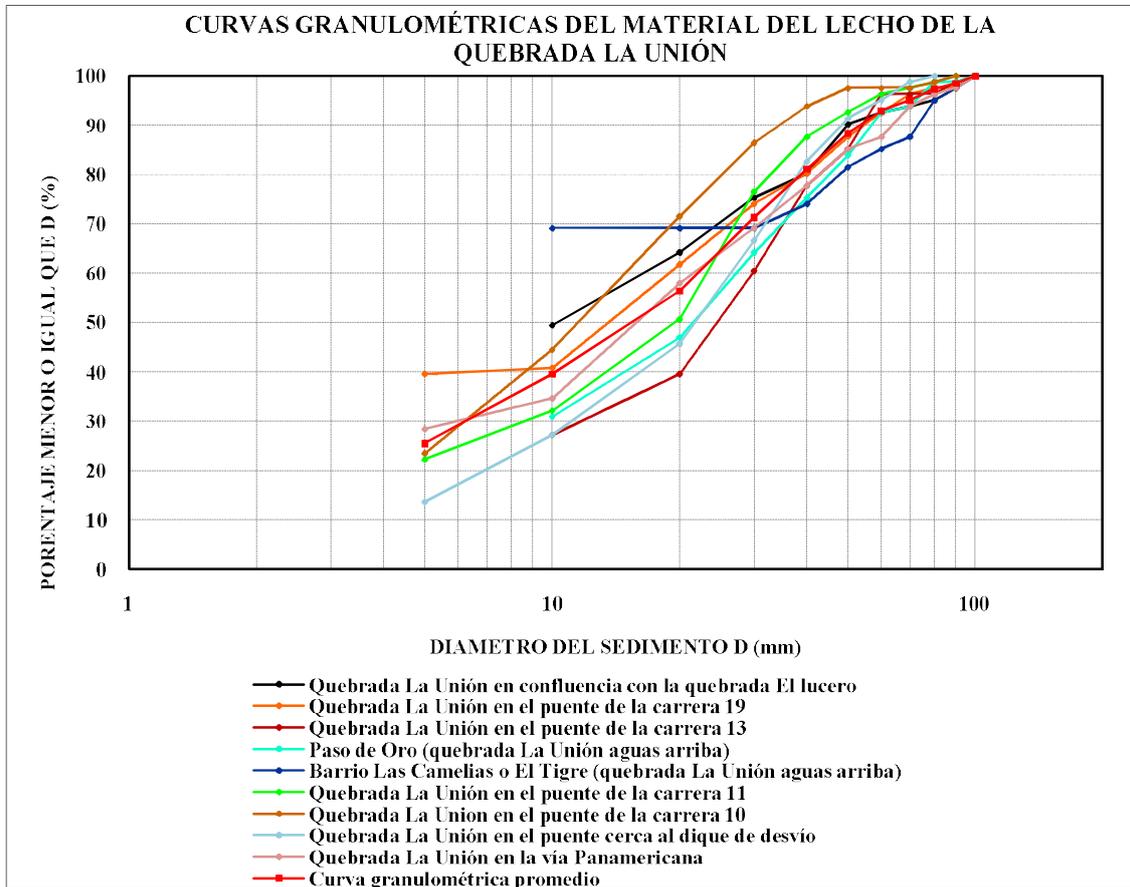


Figura 3.2 Curvas granulométricas del material superficial del lecho en varios sectores de la quebrada La Unión.

Tabla 3.3 Diámetros característicos del material del lecho de la quebrada El Rincón.

Lugar de la muestra	Tipo de muestra	d₁₀ (mm)	d₁₆ (mm)	d₃₀ (mm)	d₅₀ (mm)	d₇₀ (mm)	d₈₄ (mm)	d₉₀ (mm)
Quebrada El Rincón	Muestra superficial	-	-	13	25	39	54	70
Desembocadura de la quebrada La Aguada en la quebrada El Rincón	Muestra superficial	-	-	4	14	30	44	60
Villa Esterilla 2 (quebrada El Rincón)	Muestra superficial	4	5	8	13	20	39	50
Curva granulométrica promedio	Muestra superficial	2	2,5	8	17	31	50	60

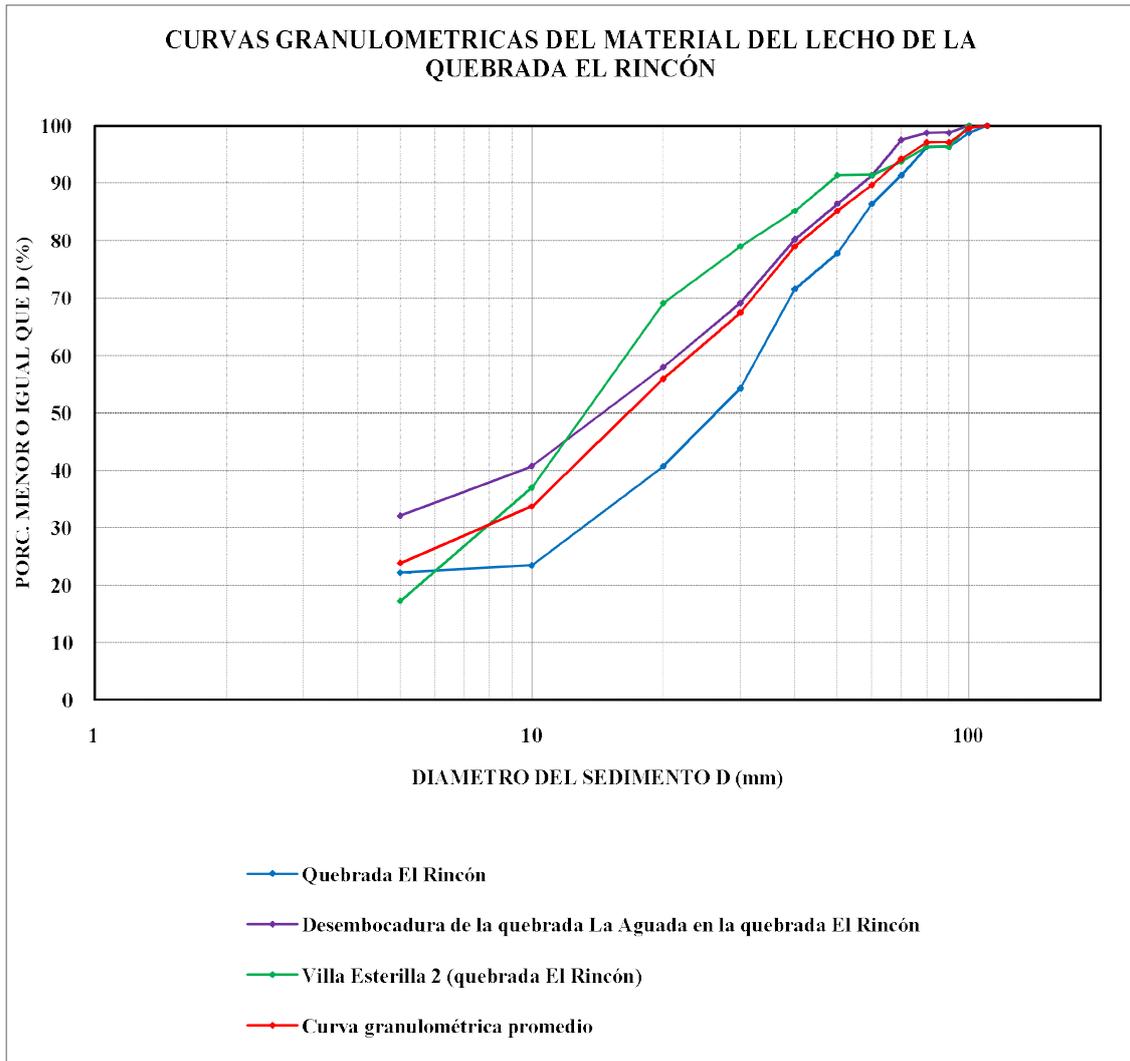


Figura 3.3 Curvas granulométricas del material superficial del lecho en varios sectores de la quebrada El Rincón.

Tabla 3.4. Diámetros característicos del material del lecho del Zanjón Negro o Moral.

Lugar de la Muestra	Tipo de muestra	d ₁₀ (mm)	d ₁₆ (mm)	d ₃₀ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₇₀ (mm)	d ₈₄ (mm)	d ₉₀ (mm)
Zanjón Moral	Muestra superficial	-	-	-	14	40	60	70

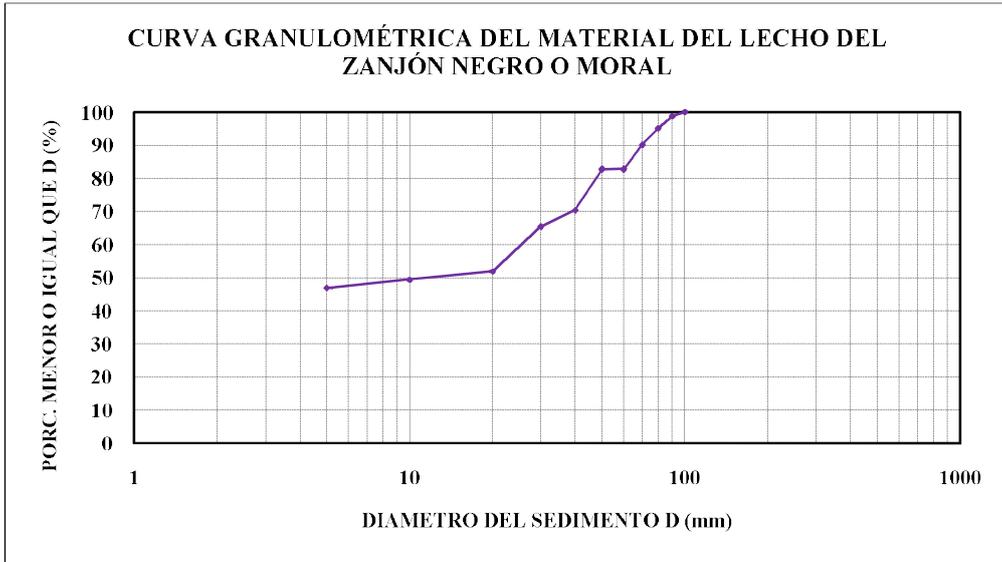


Figura 3.3(a) Curvas granulométricas del material superficial del lecho en el Zanjón negro o Moral.

4. ESTIMACIÓN DE LA RUGOSIDAD

4. ESTIMACIÓN DE LA RUGOSIDAD

La estimación de los valores de rugosidad tanto de los lechos de los cauces de la zona de estudio del municipio de La Unión como de las llanuras de inundación juega un papel muy importante en la modelación matemática del fenómeno de inundaciones ya que este es uno de los parámetros de entrada al modelo, el cual debe ser representativo de las características fluviales de los cauces como de la vegetación que compone la llanura aluvial de la zona de estudio.

Con el fin de calcular los valores de rugosidad de los lechos de los cauces de la zona de estudio del municipio de La Unión fue necesario primero determinar los perfiles longitudinales de dichos cauces.

4.1. PERFILES LONGITUDINALES DE LOS CAUCES DEL MUNICIPIO DE LA UNIÓN

Perfil longitudinal de la quebrada La Unión

En la Figura 4.1 se muestra el perfil longitudinal de la quebrada La Unión obtenido con base en las secciones transversales levantadas durante el programa de mediciones de campo. Para ello se graficó el perfil de fondo siguiendo el thalweg (nivel mínimo de lecho en la sección transversal).

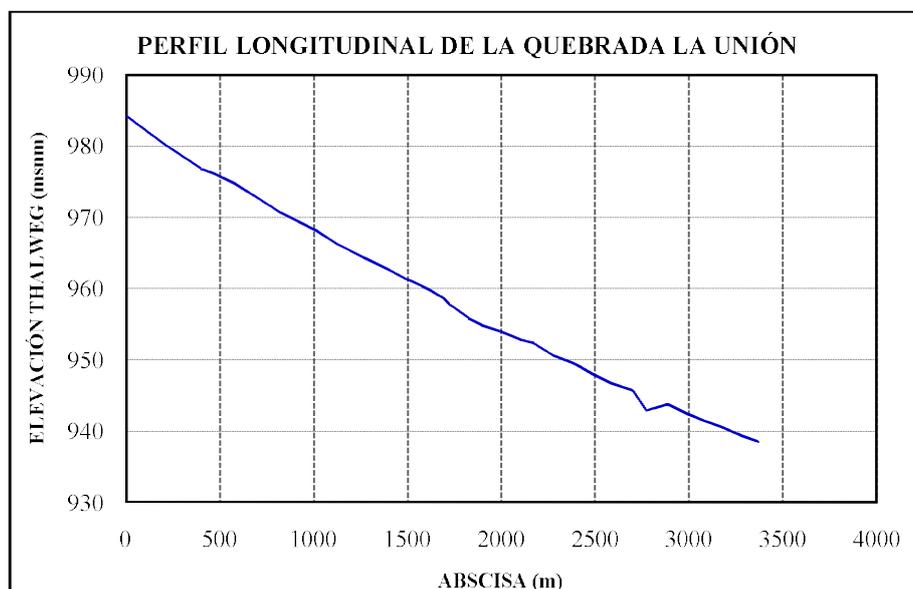


Figura 4.1 Perfil longitudinal de la quebrada La Unión en la zona de estudio.

Perfil longitudinal de la quebrada El Rincón

De igual forma, el perfil longitudinal de la quebrada El Rincón se obtuvo mediante las secciones transversales levantadas en campo. En la Figura 4.2 se muestra el perfil longitudinal de la quebrada El Rincón.

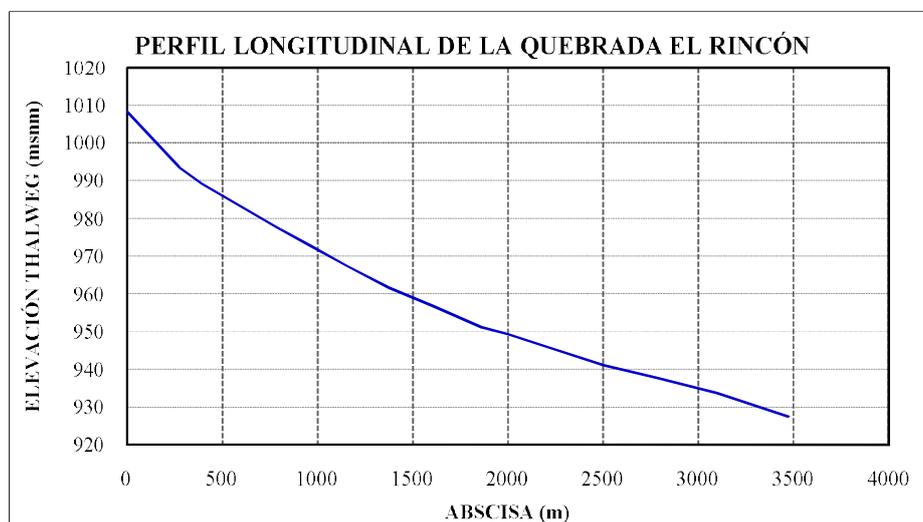


Figura 4.2 Perfil longitudinal de la quebrada El Rincón en la zona de estudio.

4.2 PENDIENTE PROMEDIA DE LOS CAUCES DEL MUNICIPIO DE LA UNIÓN

Longitud del cauce

La longitud del cauce corresponde a la longitud del eje del cauce principal y se obtiene al sumar los arcos en las curvas y los tramos rectos que componen el cauce principal. La longitud del cauce influye en el tiempo de concentración y en la mayoría de los índices morfométricos y puede obtenerse a partir de los mapas rasterizados de la red de drenaje.

Las longitudes estimadas de la quebrada La Unión y la quebrada El Rincón en la zona de estudio son 3430 m y 3470 m, respectivamente.

Pendiente media de los cauces principales

La pendiente media de los cauces principales se puede estimar mediante distintos métodos; entre los métodos más comunes se tienen: (i) Método de las elevaciones extremas y (ii) Método de Taylor-Schwarz.

- *Método de las elevaciones extremas*: En este método se determina el desnivel ΔH entre el punto más elevado y el más bajo del río dividido entre la longitud L del mismo cauce, así:

$$S = \frac{\Delta H}{L_c} \quad \text{ec. (2)}$$

donde:

ΔH = Diferencia de elevación entre las cotas extremas del cauce principal

L_c = Longitud del cauce principal

- *Método de Taylor - Schwarz*: Para este método se adopta la formulación expuesta en el método de las elevaciones extremas pero se divide el cauce en m canales de pendiente uniforme y longitud dx , en los cuales el tiempo de recorrido del agua es igual al del río.

De acuerdo con las anteriores consideraciones el método resultante es representado mediante la siguiente expresión:

$$S = \left(\frac{m}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{S_i} \right)^{1/2}} \right)^2 \quad \text{ec. (3)}$$

donde:

m = Número de tramos de igual longitud en que se divide el río

S_i = Pendiente en cada uno de los tramos que dividen el río

Pendiente promedio de la quebrada La Unión

La pendiente media de la quebrada la Unión es de 1.36% según el método de elevaciones extremas y 1.33% de acuerdo con el método de Taylor-Schwarz.

Según Jarrett (1990) los ríos que presentan una pendiente mayor del 0.2% en la mayoría de su trazado se clasifican como ríos de montaña. Para el caso de la quebrada La Unión la pendiente media promedio es aproximadamente 1.34%, por lo que la quebrada se clasifica como cauce de montaña.

De acuerdo con las inflexiones o variaciones observadas en la pendiente del cauce principal y la información existente, la quebrada La Unión se puede dividir en 3 zonas o tramos: (i) Zona alta, desde la primera sección transversal levantada, en la cota 984.21 msnm, hasta la cota 974.91 msnm y con una pendiente media del 1.56%; (ii) Zona media, comprendida entre las cotas 974.91 msnm y 943.75 msnm y con una pendiente media del 1.34%; y, (iii) Zona baja, localizada entre las cotas de 943.75 msnm y 938.52 msnm y con una pendiente media del 1.03%. En la Figura 4.3 se muestra el perfil longitudinal de la quebrada La Unión dividido por zonas para el cálculo de la pendiente.

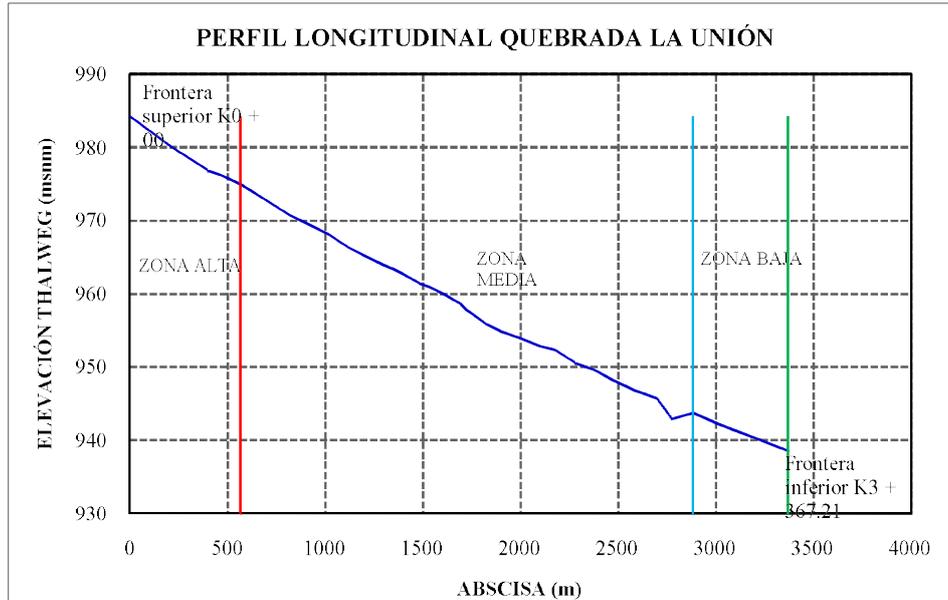


Figura 4.3 Perfil longitudinal de la quebrada La Unión en la zona de estudio dividido por zonas para el cálculo de la pendiente.

Pendiente promedia de la quebrada El Rincón

La pendiente de la quebrada El Rincón es de 2.32% según el método de elevaciones extremas y 2.17% de acuerdo al método de Taylor- Schwarz.

Para el caso de la quebrada El Rincón, la pendiente media es aproximadamente 2.24%, por lo que la quebrada se clasifica como cauce de montaña.

De acuerdo con las inflexiones o variaciones observadas en la pendiente del cauce principal y la información existente, la quebrada El Rincón se puede dividir en 3 zonas o tramos: (i) Zona inicial, desde la primer sección transversal levantada en la quebrada El Rincón en la cota 1008.29 msnm hasta la cota 977.76 msnm y con una pendiente media del 3.95%; (ii) Zona media, comprendida entre las cotas 977.76 msnm y 941.02 msnm y con una pendiente media del 2.24%; y, (iii) Zona final, localizada entre las cotas 941.02 msnm y 927.44 msnm y con una pendiente media del 1.47%.

En la Figura 4.4 se muestra el perfil longitudinal de la quebrada El Rincón dividido por zonas para el cálculo de la pendiente.

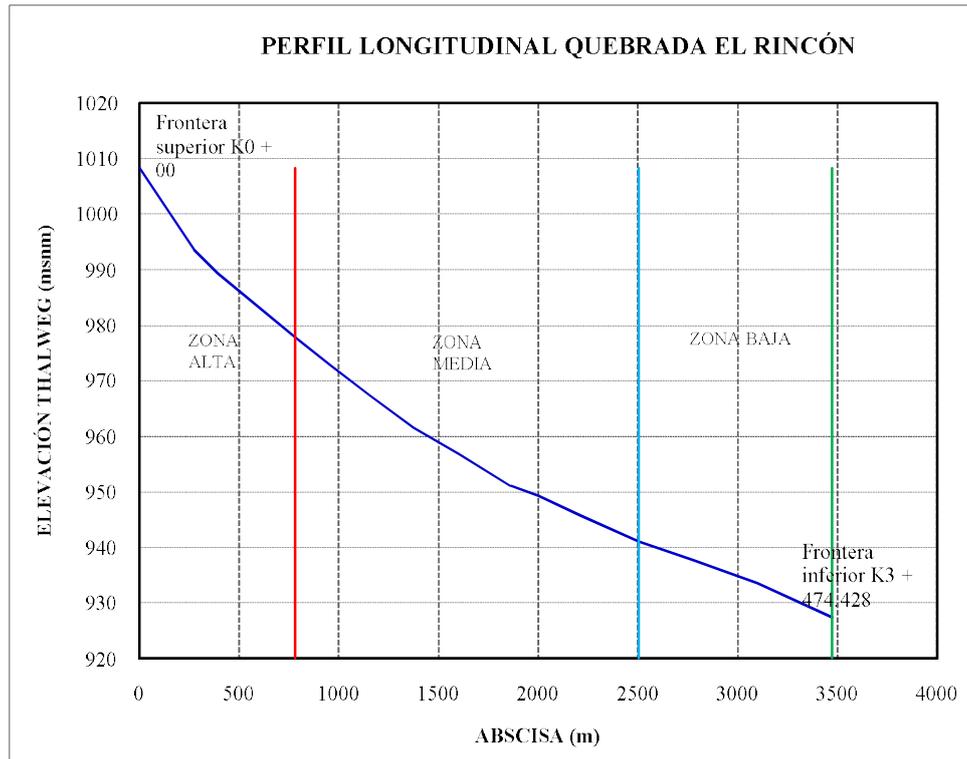


Figura 4.4 Perfil longitudinal de la quebrada El Rincón en la zona de estudio dividido por zonas para el cálculo de la pendiente.

4.3 RUGOSIDAD DEL LECHO DE LOS CAUCES DEL MUNICIPIO DE LA UNIÓN

Los ríos de montaña presentan diferencias importantes con respecto a los ríos aluviales o de llanura debido a las distintas condiciones topográficas, geológicas, hidrológicas, hidráulicas, sedimentológicas y geomorfológicas. Los ríos de montaña se caracterizan por la alta pendiente de su cauce, sedimentos de mayor tamaño (gravas, guijarros, cantos y bolos) que causan una mayor resistencia al flujo, flujos altamente turbulentos con velocidades relativamente altas y profundidades pequeñas; además, presentan una morfología variable espacialmente y reducida temporalmente excepto cuando son intervenidos (extracción intensiva de materiales del lecho, por ejemplo) y al producirse eventos extremos.

Hasta hace unas cuantas décadas, los ríos de llanura (constituidos principalmente de arenas de diferentes tamaños) habían sido objeto principal de estudio de la hidráulica fluvial debido a que los asentamientos humanos han estado ubicados en su mayoría en los valles aluviales. Aproximadamente desde la década de 1980 se incrementaron los estudios e investigaciones sobre el comportamiento hidráulico, sedimentológico y geomorfológico de los ríos de montaña. Estos estudios han mostrado que las relaciones hidráulicas (rugosidad, velocidad, etc.) y de transporte de sedimentos utilizadas regularmente para definir el

comportamiento de ríos de llanura conducen a errores al emplearse para describir el comportamiento de los ríos de montaña (López, 2005).

Estimar la resistencia al flujo es fundamental para analizar el comportamiento hidráulico de los ríos de montaña. La rugosidad del lecho representa la resistencia al flujo ejercida por las partículas que conforman el lecho y las bancas del canal y por las formas de fondo y demás irregularidades que actúan como obstáculos al flujo de agua. Para incluir este mecanismo de disipación de energía en las ecuaciones que describen el flujo de agua en canales se han desarrollado diferentes expresiones que involucran la geometría del canal, el material del lecho, etc., cada una con ventajas y limitaciones dependiendo de las condiciones para las cuales se desee aplicar. López (2005) ha recopilado cerca de 70 expresiones que permiten calcular el coeficiente de rugosidad en cauces de montaña con lechos conformados por materiales gruesos como gravas y cantos.

Para estimar la rugosidad del lecho de los cauces del municipio de La Unión en la zona de estudio, se evaluaron 10 expresiones que, en principio, se ajustan a las condiciones de las quebradas La Unión y El Rincón considerando la pendiente del fondo, la granulometría y la geometría del cauce. Éstas son las formulaciones propuestas por Limerinos (1970), Charlton (1978), Bray (1979), Griffiths (1981), Ugarte & Méndez (1994), Knighton (1998) y Samora (1993). Estas ecuaciones están en función del radio hidráulico, el área de la sección transversal, la pendiente y los diámetros característicos del material del lecho (d_{50} , d_{84} , y d_{90}), lo cual es considerado muy importante puesto que en dichas ecuaciones la rugosidad es un parámetro que no sólo depende de las características geométricas del cauce sino que también está en función de los tamaños de los sedimentos. Las formulaciones de Riggs (1976), Williams (1978), Jarret (1984), Meunier (1989) y López & Barragán (2004) fueron aplicadas inicialmente pero luego se descartaron ya que dichas fórmulas no están en función de los tamaños de los sedimentos de los lechos de los cauces, y los resultados arrojaron valores poco representativos de la rugosidad para esta clase de ríos. Las expresiones se aplicaron para el nivel de banca llena de las secciones transversales levantadas, donde además se tomó registro fotográfico para la caracterización sedimentológica.

Sin embargo, las formulaciones de Limerinos, Griffiths, Knighton, Ugarte & Méndez y Samora arrojaron sistemáticamente valores muy bajos (valores de rugosidad de Manning menores que $0.022 \text{ s/m}^{1/3}$), considerados muy poco representativos de la rugosidad de cauces como las quebradas La Unión y El Rincón, teniendo en cuenta sus características morfológicas y sedimentológicas (material granulares gruesos de diferentes tamaños). Por esta razón, la estimación de la rugosidad de los cauces de la zona de estudio del municipio de La Unión se realizó empleando la formulación de Charlton.

Sin embargo, las formulaciones de Charlton, Griffiths, Knighton, Ugarte & Méndez y Samora arrojaron sistemáticamente valores muy bajos (valores de rugosidad de Manning menores que $0.02 \text{ s/m}^{1/3}$), considerados muy poco representativos de la rugosidad de cauces como las quebradas La Unión y El Rincón y el zanjón Moral, teniendo en cuenta sus características morfológicas y sedimentológicas (material granulares gruesos de diferentes

tamaños). Por esta razón, la estimación de la rugosidad de los cauces de la zona de estudio del municipio de La Unión se realizó empleando la formulación de Charlton.

Charlton (1978) empleó registros de variables hidráulicas en ríos de montaña británicos con el propósito fundamental de encontrar una relación con el coeficiente de fricción de Manning, n , en este tipo de corrientes. La mayoría de los datos corresponden a ríos con vegetación significativamente densa en las márgenes. Los resultados observados mostraron que n varía inversamente con la profundidad del flujo y directamente con la pendiente. Mediante técnicas de regresión múltiple Charlton determinó que la relación de mejor ajuste para determinar el coeficiente de fricción de Darcy, f , con base en el radio hidráulico, R , y el diámetro característico d_{90} es la siguiente:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 3.30 \left(\frac{R}{d_{90}} \right)^{0.44} \quad \text{ec. (4)}$$

Según López (2005), la ecuación de Charlton es aplicable a canales naturales con pendientes del lecho entre 1.3 y 10%.

Rugosidad del lecho de la quebrada La Unión

La ecuación de Charlton fue aplicada en las secciones transversales en las cuales se realizó el análisis fotográfico superficial por malla para los niveles de banca llena en la quebrada La Unión. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.1 La rugosidad de Manning promedio, n , estimada para la quebrada La Unión es de $0.030 \text{ s/m}^{1/3}$.

Tabla 4.1. Factores de rugosidad de Manning, Chezy y Darcy en la quebrada La Unión en diferentes secciones transversales.

Sección	Abscisa	R (m)	d_{90} (m)	f	C ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)	n ($\text{s/m}^{1/3}$)
1	K0 + 000.00	2.07	0.071	0.06	34.99	0.033
16	K1 + 608.28	2.80	0.054	0.06	37.37	0.031
24	K2 + 279.34	2.45	0.053	0.06	37.41	0.032
26	K2 + 476.17	2.74	0.042	0.06	36.54	0.030
28	K2 + 698.66	3.34	0.032	0.05	41.64	0.028
29	K2 + 774.03	2.78	0.049	0.05	40.34	0.030
34	K3 + 282.87	1.70	0.050	0.06	36.05	0.031

Rugosidad del lecho de la quebrada El Rincón

Asimismo, la ecuación de Charlton fue aplicada en las secciones transversales en las cuales se realizó el análisis fotográfico superficial por malla para los niveles de banca llena en la

quebrada El Rincón. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.2. La rugosidad de Manning promedio, n , estimada para la quebrada El Rincón es de $0.032 \text{ s/m}^{1/3}$.

Tabla 4.2. Factores de rugosidad de Manning, Chezy y Darcy en la quebrada El Rincón en diferentes secciones transversales.

Sección	Abscisa	R (m)	d_{90} (m)	f	C ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)	n ($\text{s/m}^{1/3}$)
1	K0 + 000.00	0.98	0.070	0.06	36.75	0.033
7	K1 + 372.77	1.32	0.050	0.08	31.25	0.032

Rugosidad del lecho del zanjón Negro o Moral

Igualmente, la ecuación de Charlton fue aplicada en la sección transversal en la cual se realizó el análisis fotográfico superficial por malla para el nivel de banca llena en el zanjón Negro o Moral. El resultado obtenido se presenta en la Tabla 4.3. La rugosidad de Manning, n , estimada para el zanjón Negro o Moral es de $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$.

Tabla 4.3. Factores de rugosidad de Manning, Chezy y Darcy en el zanjón Moral en diferentes secciones transversales.

Sección	Abscisa	R (m)	d_{90} (m)	f	C ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)	n ($\text{s/m}^{1/3}$)
1	K0 + 000.00	3.79	0.070	0.09	30.27	0.035

4.4. RUGOSIDAD DE LAS LLANURAS DE INUNDACIÓN DEL MUNICIPIO DE LA UNIÓN

En la planicie de inundación de un río la presencia de vegetación y diferentes tipos de elementos y obstáculos (piedras, cercos, casas, infraestructura) producen resistencia al flujo cuando éste se desborda. La rugosidad estimada debe ser representativa de la vegetación y los diferentes elementos existentes en las llanuras de inundación ya que este factor es muy importante para obtener resultados confiables en la modelación matemática.

Para determinar los valores de la rugosidad de Manning en las planicies de inundación de la zona de estudio del municipio de La Unión fue necesario aplicar algunos conceptos de esfuerzos cortantes en las llanuras ejercidos por los obstáculos presentes (pastos, árboles y cultivos de uva, papaya y guayaba).

Determinación de los valores de rugosidad de Manning causada por pastos

La Figura 4.5 muestra la relación entre el coeficiente de Chezy y la profundidad de inundación en la planicie para pastos largos (de Vries, 1993).

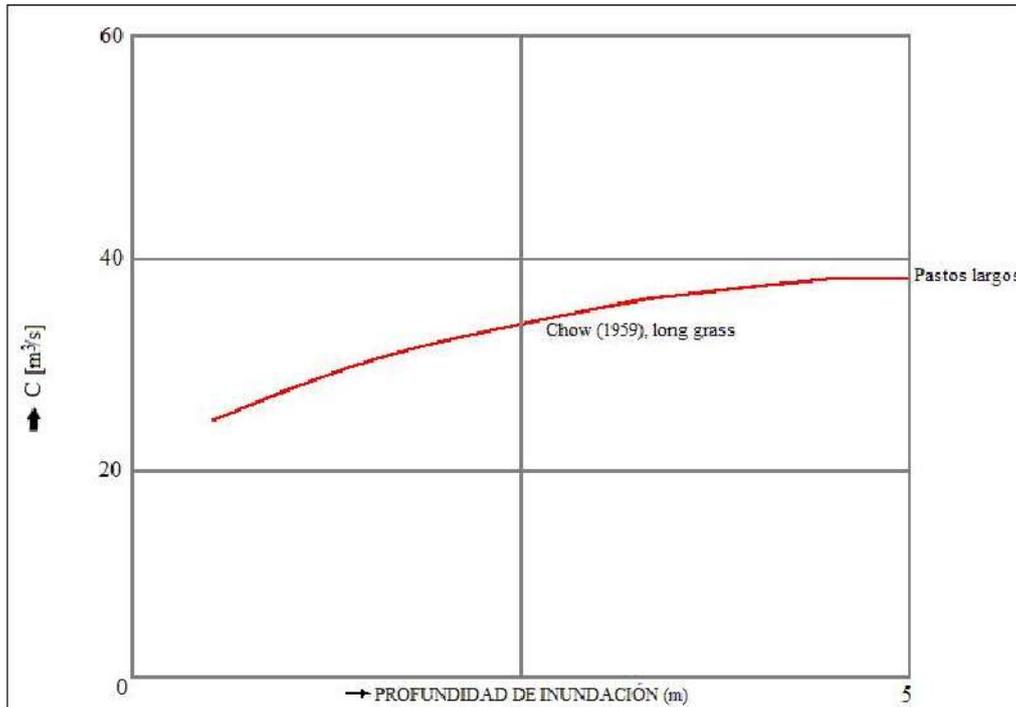


Figura 4.5 Coeficiente de Chezy en función de la profundidad de inundación en la planicie (de Vries, 1993).

Después de obtener el valor del coeficiente de Chezy para distintas profundidades de flujo se obtiene el valor de la rugosidad de Manning respectivo mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{H^{\frac{1}{6}}}{C} \quad \text{ec. (5)}$$

donde:

- n = Coeficiente de rugosidad de Manning
- H = Profundidad de inundación en la planicie
- C = Coeficiente de Chezy

En la Tabla 4.4 se muestran los valores de rugosidad de Manning y Chezy de la planicie de inundación producida por pastos, considerando diferentes profundidades de flujo.

Tabla 4.4. Coeficientes de rugosidad de Manning y Chezy en la planicie de inundación cubierta de pastos en función de la profundidad de inundación.

H (m)	C (m^{1/2} / s)	n (s/ m^{1/3})
0.06	21	0.029
0.15	22.5	0.032
0.2	23.1	0.033
0.3	23.8	0.034
0.4	24.3	0.035
0.5	25	0.036
0.6	25.7	0.036
0.7	26.4	0.036
0.8	27.1	0.036
1	28.5	0.035
1.5	32	0.033
2	34.7	0.032

Determinación de los valores de rugosidad de Manning en la planicie de inundación producida por cultivos de uva, guayaba y papaya

El tránsito del flujo en la planicie de inundación a través de obstáculos produce un esfuerzo cortante efectivo, τ_e , debido al esfuerzo cortante producido por la resistencia de la superficie (pasto y tierra con algo de hierba), τ_1 , y el esfuerzo cortante debido a la resistencia de forma (en este caso árboles, guaduas y cañas), τ_2 , como se muestra en la siguiente relación:

$$\tau_e = \tau_1 + \tau_2 \quad \text{ec. (6)}$$

Los esfuerzos cortantes, τ_e , τ_1 y τ_2 , son equivalentes a las siguientes expresiones, respectivamente:

$$\tau_e = \rho g \frac{V^2}{C_e^2} \quad \text{ec. (6a)}$$

$$\tau_1 = \rho g \frac{V^2}{C_1^2} \quad \text{ec. (6b)}$$

$$\tau_2 = \rho g \frac{V^2}{C_2^2} \quad \text{ec. (6c)}$$

donde:

τ_e = Esfuerzo cortante efectivo en la planicie de inundación

τ_1 = Esfuerzo cortante relacionado con la resistencia de superficie

τ_2 = Esfuerzo cortante relacionado con la resistencia de forma

ρ = Densidad del flujo

V = Velocidad media del flujo

g = Aceleración debida a la gravedad

C_e = Coeficiente de Chezy relacionado con el esfuerzo cortante efectivo en la planicie de inundación

C_1 = Coeficiente de Chezy relacionado con la resistencia de superficie

C_2 = Coeficiente de Chezy relacionado con la resistencia de forma C_e

El esfuerzo cortante relacionado con la resistencia de forma, τ_2 , también es equivalente a la siguiente expresión:

$$\tau_2 = \frac{1}{2} m \rho C_d V^2 A \quad \text{ec. (6d)}$$

Para obtener el coeficiente de Chezy relacionado con la resistencia de forma, C_2 , se sustituye la ecuación (6c) en la ecuación (6d):

$$C_2^2 = \frac{2g}{m C_d D H} \quad \text{ec. (6e)}$$

Al sustituir las ecuaciones (6a), (6b) y (6c) en la ecuación (6), se obtiene la siguiente expresión para el factor de rugosidad de Chezy en la planicie de inundación:

$$\frac{1}{C_e^2} = \frac{1}{C_1^2} + \frac{1}{C_2^2} \quad \text{ec. (7)}$$

La expresión del valor de la rugosidad de Manning en las planicies de inundación se halla sustituyendo las ecuaciones (5) y (6e) en la ecuación (7):

$$n_e = \left(n_1 + \frac{C_d D m H^{\frac{4}{3}}}{2g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{ec. (8)}$$

donde:

n_e = Coeficiente de rugosidad de Manning en la planicie de inundación

- n_1 = Coeficiente de rugosidad de Manning relacionado con la resistencia de superficie
- C_d = Coeficiente de arrastre
- D = Diámetro del tronco del árbol, caña o guadua
- H = Profundidad de inundación en la planicie
- g = Aceleración debida a la gravedad
- V = Velocidad media del flujo

Para hallar el coeficiente de rugosidad de Manning en la planicie de inundación, n_e , es necesario determinar el coeficiente de arrastre, C_d , el cual está en función del número de Reynolds, Re . Para ello primero se debe calcular el número de Reynolds mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad \text{ec. (9)}$$

donde:

- V = Velocidad media del agua en la llanura de inundación
- D = Diámetro del tronco
- ν = Viscosidad cinemática del agua

El valor de la viscosidad cinemática del agua es igual a $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para una temperatura de 20°C . Para calcular los valores del número de Reynolds se asumen diferentes tamaños de los diámetros de los troncos y velocidades de flujo de 0.3, 0.5, 0.7 y 1 m/s. Con base en los valores calculados del número de Reynolds se estima el coeficiente de arrastre, C_d , correspondiente, de acuerdo con los valores reportados en la literatura para diferentes geometrías del cuerpo u obstáculo que ejerce resistencia al flujo (ver Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Relación del número de Reynolds con el coeficiente de arrastre y la forma del cuerpo en el cual se produce el choque con el agua (W. F. Lindsey, 1938).

Forma del cuerpo	Figura	C_d	Número de Reynolds
Cilindro circular		1.2	1×10^4 a 1.5×10^5
		0.4	1.5×10^5 a 1×10^6
Cilindro elíptico	 2:1	0.6	4×10^4
		0.46	1×10^5
		0.32	2.5×10^4 a 1×10^5
 8:1	0.20	2×10^4	
	2.0	3.5×10^4	
Prisma cuadrado	 	1.6	1×10^4 a 1×10^5

En el presente estudio se adoptó un coeficiente de arrastre, C_d , igual a 1.2 para los cultivos de uva y 0.4 para los cultivos de guayaba y papaya, teniendo en cuenta los valores calculados del número del Reynolds (ver Tabla 4.5) y la vegetación en la planicie (uva, guayaba y papaya) la cual se puede aproximar a tallos de forma cilíndrica.

Se asumió que el valor de la rugosidad de Manning relacionada con la resistencia de superficie, n_1 , para una cobertura vegetal de uva, guayaba y papaya es igual a la ocasionada por pastos para diferentes profundidades de flujo (ver Tabla 4.4).

En las Tablas 4.6 a 4.9 se presentan los valores de rugosidad de Manning en la planicie de inundación para diferentes clases y densidades de vegetación, distintas profundidades de flujo y diámetros de tronco en la zona de estudio del municipio de La Unión.

Tabla 4.6. Estimación de la rugosidad de Manning para planicies de inundación con árboles de diferentes tamaños de tronco.

Profundidad de inundación (m)	Diámetro del tronco (m)	Número de Reynolds (Re)	Densidad de árboles/m²	n_1 (s/m^{1/3})	Rugosidad de Manning en la planicie de inundación (s/m^{1/3})
0.06	0.6	594059.41	0.06	0.029	0.029
0.06	0.5	495049.50	0.06	0.029	0.029
0.06	0.4	396039.60	0.06	0.029	0.029
0.15	0.6	594059.41	0.06	0.032	0.033
0.15	0.5	495049.50	0.06	0.032	0.033
0.15	0.4	396039.60	0.06	0.032	0.033
0.5	0.6	594059.41	0.06	0.036	0.040
0.5	0.5	495049.50	0.06	0.036	0.039
0.5	0.4	396039.60	0.06	0.036	0.039
1	0.6	594059.41	0.06	0.035	0.044
1	0.5	495049.50	0.06	0.035	0.043
1	0.4	396039.60	0.06	0.035	0.041

En el caso de las planicies de inundación con cultivos de uva se estimó, de acuerdo con las observaciones de campo realizadas, que pueden encontrarse de 3000 a 4500 árboles de uva por hectárea, lo que corresponde a 0.3 y 0.45 árboles de uva por metro cuadrado, respectivamente. Un valor recomendado utilizado para la plantación de uva es 0.39 árboles de uva por metro cuadrado.

Tabla 4.7. Estimación de la rugosidad de Manning para planicies de inundación con cultivos de uva de diferentes densidades por metro cuadrado.

Profundidad de inundación (m)	Diámetro del tronco (m)	No. Árboles de uva/m ²	Velocidad media (m/s)	Número de Reynolds (Re)	n ₁ (s/m ^{1/3})	Rugosidad de Manning en la planicie de inundación (s/m ^{1/3})
0.06	0.15	0.3	0.3	44554.46	0.029	0.03
			0.5	74257.43	0.029	0.03
			0.7	103960.40	0.029	0.03
			1	148514.85	0.029	0.03
0.06	0.15	0.39	0.3	44554.46	0.029	0.03
			0.5	74257.43	0.029	0.03
			0.7	103960.40	0.029	0.03
			1	148514.85	0.029	0.03
0.06	0.15	0.45	0.3	44554.46	0.029	0.031
			0.5	74257.43	0.029	0.031
			0.7	103960.40	0.029	0.031
			1	148514.85	0.029	0.031
0.15	0.15	0.3	0.3	44554.46	0.032	0.035
			0.5	74257.43	0.032	0.035
			0.7	103960.40	0.032	0.035
			1	148514.85	0.032	0.035
0.15	0.15	0.39	0.3	44554.46	0.032	0.036
			0.5	74257.43	0.032	0.036
			0.7	103960.40	0.032	0.036
			1	148514.85	0.032	0.036
0.15	0.15	0.45	0.3	44554.46	0.032	0.037
			0.5	74257.43	0.032	0.037
			0.7	103960.40	0.032	0.037
			1	148514.85	0.032	0.037
0.5	0.15	0.3	0.3	44554.46	0.036	0.049
			0.5	74257.43	0.036	0.049
			0.7	103960.40	0.036	0.049
			1	148514.85	0.036	0.049
0.5	0.15	0.39	0.3	44554.46	0.036	0.052
			0.5	74257.43	0.036	0.052
			0.7	103960.40	0.036	0.052
			1	148514.85	0.036	0.052
0.5	0.15	0.45	0.3	44554.46	0.036	0.054
			0.5	74257.43	0.036	0.054
			0.7	103960.40	0.036	0.054
			1	148514.85	0.036	0.054
1	0.15	0.3	0.3	44554.46	0.035	0.063
			0.5	74257.43	0.035	0.063
			0.7	103960.40	0.035	0.063

			1	148514.85	0.035	0.063
1	0.15	0.39	0.3	44554.46	0.035	0.069
			0.5	74257.43	0.035	0.069
			0.7	103960.40	0.035	0.069
			1	148514.85	0.035	0.069
1	0.15	0.45	0.3	44554.46	0.035	0.073
			0.5	74257.43	0.035	0.073
			0.7	103960.40	0.035	0.073
			1	148514.85	0.035	0.073

En el caso de las planicies de inundación con cultivos de guayaba se estimó que para el sembrado de la guayaba se coloca un número 0.05 árboles de guayaba por metro cuadrado.

Tabla 4.8. Estimación de la rugosidad de Manning para planicies de inundación con cultivos de guayaba para diferentes velocidades de flujo.

Profundidad de inundación (m)	Diámetro del tronco (m)	No. Árboles de guayaba/m ²	Velocidad media (m/s)	Número de Reynolds (Re)	n_1 (s/m ^{1/3})	Rugosidad de Manning en la planicie de inundación (s/m ^{1/3})
0.06	0.2	0.05	0.3	59405.94	0.029	0.029
			0.5	99009.90	0.029	0.029
			0.7	138613.86	0.029	0.029
			1	198019.80	0.029	0.029
0.15	0.2	0.05	0.3	59405.94	0.032	0.033
			0.5	99009.90	0.032	0.033
			0.7	138613.86	0.032	0.033
			1	198019.80	0.032	0.032
0.5	0.2	0.05	0.3	59405.94	0.036	0.039
			0.5	99009.90	0.036	0.039
			0.7	138613.86	0.036	0.039
			1	198019.80	0.036	0.037
1	0.2	0.05	0.3	59405.94	0.035	0.043
			0.5	99009.90	0.035	0.043
			0.7	138613.86	0.035	0.043
			1	198019.80	0.035	0.038

Finalmente, para el caso de las planicies de inundación con cultivos de papaya se estimó que para el sembrado de la papaya se coloca un número 0.125 árboles de papaya por metro cuadrado

Tabla 4.9. Estimación de la rugosidad de Manning para planicies de inundación con cultivos de papaya para diferentes velocidades de flujo.

Profundidad de inundación (m)	Diámetro del tronco (m)	No. Árboles de papaya/m ²	Velocidad media (m/s)	Número de Reynolds (Re)	n ₁ (s/m ^{1/3})	Rugosidad de Manning en la planicie de inundación (s/m ^{1/3})
0.06	0.2	0.125	0.3	59405.94	0.029	0.03
			0.5	99009.90	0.029	0.03
			0.7	138613.86	0.029	0.03
			1	198019.80	0.029	0.029
0.15	0.2	0.125	0.3	59405.94	0.032	0.034
			0.5	99009.90	0.032	0.034
			0.7	138613.86	0.032	0.034
			1	198019.80	0.032	0.033
0.5	0.2	0.125	0.3	59405.94	0.036	0.044
			0.5	99009.90	0.036	0.044
			0.7	138613.86	0.036	0.044
			1	198019.80	0.036	0.039
1	0.2	0.125	0.3	59405.94	0.035	0.052
			0.5	99009.90	0.035	0.052
			0.7	138613.86	0.035	0.052
			1	198019.80	0.035	0.042

5. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE NIVELES DE AMENAZA POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

5. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE NIVELES DE AMENAZA POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

Se presenta inicialmente una breve descripción de algunas de las metodologías más empleadas para la determinación de los mapas de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales. Finalmente, se presentan las metodologías establecidas para el desarrollo del presente estudio, teniendo en cuenta para ello las características principales de los fenómenos o eventos que suelen presentarse en los cauces de la zona de estudio.

5.1. ESTADO DEL ARTE

A partir de los criterios para la clasificación de las amenazas por inundaciones y avenidas torrenciales se han desarrollado en diferentes regiones alrededor del mundo numerosas metodologías para la elaboración de los mapas de amenaza. Estas metodologías generalmente se basan en la determinación de valores límites para la profundidad del agua, la velocidad del flujo o una combinación de estos dos parámetros, así como en la frecuencia de los eventos en términos de los periodos de retorno. Las metodologías existentes difieren entre sí en los requerimientos de información y los criterios establecidos para la zonificación de la amenaza (incluyendo los valores límites adoptados). Algunas de las metodologías desarrolladas y que se describen a continuación son las siguientes:

- 1) Metodología establecida por la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones de España, 1995.
- 2) Metodología adoptada por la Agencia Catalana del Agua, 2003.
- 3) Metodología planteada por el Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana, PATRICOVA, 2002.
- 4) Metodología propuesta en el Plan Medioambiental del río Ebro y tramo bajo del río Cinca (Gobierno de Aragón – Iberinsa, 2005).
- 5) Metodología aplicada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación Proyecto MET-ALARN INETER/COSUDE “Inundaciones Fluviales Mapas de Amenaza” Recomendaciones técnicas para su elaboración. Managua, Nicaragua, Agosto de 2005.
- 6) Metodología para la Zonificación de Amenaza y Riesgo por Avenidas Torrenciales en la Cabecera Municipal de Florida-Valle del Cauca. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC - Instituto de Investigaciones en Geociencias Minería y Química, Ingeominas. Convenio CVC-984/96 Ingeominas I-024. Santa Fé de Bogotá, Marzo de 1998.

7) Metodología para delimitación de mapas de amenaza propuesta por R. García, J.J. Rodríguez y J.S. O'Brien (2001).

1) Metodología de la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil

Esta metodología fue establecida por la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones en España, en 1995. Para la determinación de los riesgos por inundaciones se considera la población potencialmente afectada y los elementos (edificios, instalaciones, infraestructuras y elementos naturales o medioambientales) situados en zonas de peligro que debido a la inundación puedan producir víctimas, interrumpir un servicio imprescindible para la comunidad o impedir la atención de la emergencia generada.

La vulnerabilidad de estos elementos se estima considerando sus características, su ubicación y las características hidráulicas de la creciente que genera el desbordamiento (profundidad del agua, velocidad del flujo, caudal sólido transportado y duración de la inundación).

En esta metodología, las zonas potencialmente inundables, de acuerdo con el grado del riesgo, se clasifican de la siguiente manera:

Zona A de Riesgo Alto. Conformada por aquellas áreas en las que las crecientes con periodos de retorno de 50, 100 o 500 años generarán graves daños a núcleos de población importantes. También se consideran zonas de riesgo alto aquellas en las que la creciente con periodo de retorno de 50 años generará impactos a viviendas aisladas o daños importantes a instalaciones comerciales o industriales y/o a los servicios básicos.

Estas zonas de riesgo alto se dividen en tres subzonas:

- **Zonas A-1. Zonas de riesgo alto frecuente.** Son aquellas en las que la creciente con periodo de retorno de 50 años generará graves daños a núcleos urbanos.
- **Zonas A-2. Zonas de riesgo alto ocasional.** Son aquellas en las que la creciente con periodo de retorno de 100 años generará graves daños a núcleos urbanos.
- **Zonas A-3. Zonas de riesgo alto excepcional.** Son aquellas en las que la creciente con periodo de retorno de 500 años generará graves daños a núcleos urbanos.

Zonas B de Riesgo Significativo. Conformada por aquellas áreas, no coincidentes con las zonas A, en las que la creciente con periodo de retorno de 100 años generará impactos en viviendas aisladas y las crecientes de periodo de retorno igual o superior a los 100 años causarán daños significativos a instalaciones comerciales, industriales y/o servicios básicos.

Zonas C de Riesgo Bajo. Son aquellas, no coincidentes con las zonas A ni con las zonas B, en las que la creciente con periodo de retorno de 500 años generará impactos en viviendas

aisladas, y las crecientes consideradas en los mapas de inundación causarían daños pequeños a instalaciones comerciales, industriales y/o servicios básicos.

2) Metodología adoptada por la Agencia Catalana del Agua

Esta metodología fue adoptada por la Agencia Catalana del Agua en el año 2003. Se presenta en la guía “Recomendaciones Técnicas para los Estudios de Inundabilidad Locales” (Agencia Catalana del Agua, 2003) y propone la siguiente clasificación de las zonas potencialmente inundables:

Zonas de Inundación Alta. Corresponde a los sectores ubicados por fuera de las zonas de intenso desagüe, donde la profundidad del agua, H , alcanza valores superiores a 1 m, la velocidad de flujo, V , es mayor a 1 m/s o el producto de la profundidad del agua por la velocidad del flujo, $V*H$, es mayor a 0.5 m²/s (ver Figura 5.1).

La Zona de Intenso Desagüe. Se define como la zona limitada por paramentos verticales imaginarios en ambos márgenes del río en la cual, al discurrir por ella la creciente con periodo de retorno de 100 años, se produciría un incremento en el nivel de agua, ΔH , con respecto al nivel natural sin paramentos que alcanzaría la tabla de agua (ver Figura 5.2). Se define un valor máximo de ΔH igual a 0.1 m en los sectores en los que la inundación provocaría daños importantes (sectores poblados o de alta inversión) y un valor máximo de ΔH igual a 0.5 m en las zonas en las que la inundación generaría daños menores (poblaciones menores).

Zonas de Inundación Moderada. Son los sectores ubicados por fuera de las zonas de intenso desagüe en los que la profundidad del agua es superior a 0.4 m e inferior a 1 m, la velocidad de flujo es mayor a 0.4 m/s y menor a 1 m/s o el producto de la profundidad del agua por la velocidad del flujo es mayor a 0.08 m²/s y menor a 0.5 m²/s (ver Figura 5.1).

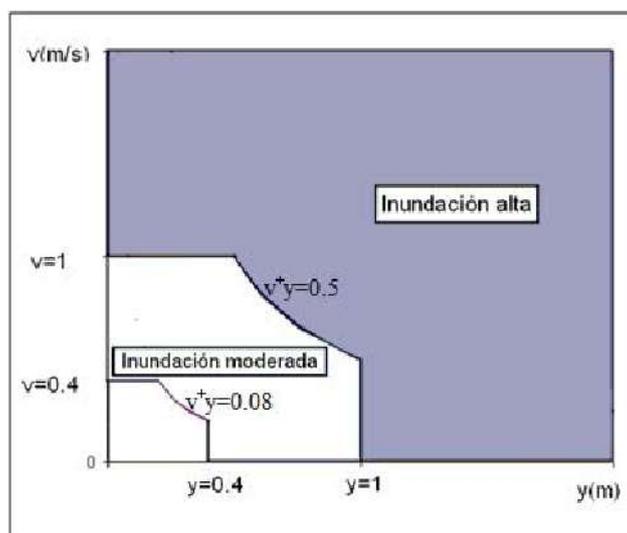


Figura 5.1 Clasificación de las zonas de inundación de acuerdo con la Agencia Catalana del Agua.

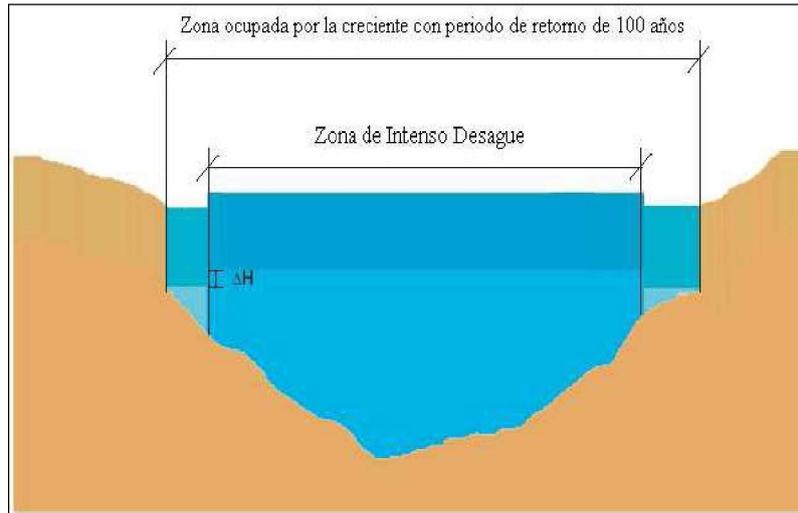


Figura 5.2 Zona de intenso desagüe definida por la Agencia Catalana del Agua.

3) Metodología planteada por el Plan de Acción Territorial

Esta metodología planteada por el Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre prevención del riesgo de inundación en la comunidad valenciana, PATRICOVA, en el año 2002, define 6 niveles de riesgo de acuerdo con la frecuencia de ocurrencia del evento que genera el desbordamiento y la profundidad que alcanza la columna de agua en la llanura de inundación.

Para la definición de los niveles de riesgo deben considerarse tres frecuencias de ocurrencia de crecientes:

- **Frecuencia Alta:** corresponde a periodos de retorno inferiores a 25 años (probabilidades de ocurrencia en cualquier año superiores al 4%).
- **Frecuencia Media:** corresponde a periodos de retorno entre 25 y 100 años (probabilidades de ocurrencia entre 4 y 1% en cualquier año).
- **Frecuencia Baja:** corresponde a periodos de retorno entre 100 y 500 años (probabilidades de ocurrencia entre 1 y 0.20% en cualquier año).

De la misma forma, deben considerarse dos profundidades de la columna de agua en la planicie:

- **Profundidades Bajas:** corresponden a profundidades inferiores a 0.8 m. Se considera que estas profundidades generan daños menores, lo cual significa que se tendría un bajo nivel de vulnerabilidad.

- *Profundidades Altas:* corresponden a profundidades superiores a 0.8 m. Se asume que estas profundidades generan daños importantes, por lo cual están asociadas a altos niveles de vulnerabilidad.

Al combinar los rangos definidos para las dos variables analizadas se obtienen los seis niveles de riesgo que se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Niveles de riesgos definidos en la metodología del PATRICOVA.

Profundidad de la inundación H (m)	Nivel de riesgo		
	Periodo de retorno (Tr) de la inundación (años)		
	Tr < 25 (Frecuencia alta)	25 ≤ Tr ≤ 100 (Frecuencia media)	100 ≤ Tr ≤ 500 (Frecuencia baja)
Alta: H > 0.8	1 – Alto	2 – Alto	5 – Bajo
Baja: H ≤ 0.8	3 – Medio	4 – Medio	6 – Bajo

Con base en esta clasificación se establecen las siguientes restricciones en el desarrollo urbanístico:

- Las zonas potencialmente inundables sometidas a un nivel de riesgo 1 se consideran no urbanizables y deben contar con una protección especial.
- En las áreas sometidas a niveles de riesgo 2, 3 y 4 se prohíbe la construcción de viviendas, granjas, hoteles, centros escolares o sanitarios, zonas para camping, bomberos, cementerios y otros usos y actividades de naturaleza similar.
- En las zonas de riesgo 5 y 6 se permite la construcción de viviendas y hoteles con ciertas medidas de seguridad.

Para la elaboración de los mapas de riesgo aplicando esta metodología es necesario conocer los niveles de inundación para las crecientes con periodos de retorno de 25, 100 y 500 años y la extensión de las áreas que resultarían inundadas al presentarse estos eventos.

4) Metodología propuesta en el Plan Medioambiental de los ríos Ebro y Cinca

Esta metodología fue propuesta en el Plan Medioambiental del río Ebro y el tramo bajo del río Cinca, en España, en el año 2005. Dicha metodología plantea la implementación de dos procedimientos para la evaluación del riesgo debido a inundaciones: un procedimiento simplificado aplicable para las situaciones de riesgo bajo, en donde no se espera que se presenten daños importantes y un procedimiento general que debe implementarse cuando los bienes amenazados son de alta vulnerabilidad o son edificaciones importantes para la atención de desastres.

Procedimiento Simplificado. Este procedimiento considera márgenes de seguridad bastante altos y debería aplicarse sólo para descartar el riesgo en aquellos sectores que se estima podrían estar por fuera de la zona de riesgo.

Para la estimación del nivel de riesgo, de acuerdo con este procedimiento, es necesario llevar a cabo las siguientes actividades: caracterización preliminar de la cuenca, cálculo de los caudales máximos, cálculo del tiempo de concentración, caracterización del comportamiento hidráulico de las secciones críticas, modelación hidráulica del tránsito de los caudales máximos calculados, estimación del nivel de exposición, estimación del nivel de vulnerabilidad y, finalmente, establecimiento del grado de aceptabilidad del riesgo debido a las inundaciones, en función de la profundidad del agua y la velocidad del flujo, de acuerdo con la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Nivel del riesgo de acuerdo con el Procedimiento Simplificado del Plan Medioambiental del río Ebro y tramo Bajo del río Cauca.

Velocidad del Flujo (m/s)	Nivel de riesgo	
	Profundidad del agua H (m)	
	H < 1	H ≥ 1
Menor a 0.5	Aceptable	Inaceptable
Mayor a 0.5	Inaceptable	Completamente inaceptable

Procedimiento General. En este procedimiento la estimación del nivel de riesgo se realiza a través de la implementación de los siguientes estudios: caracterización hidrológica de la cuenca, estimación de precipitaciones máximas, elaboración del plano de localización de los cursos de agua, análisis y evaluación de la frecuencia histórica de las inundaciones, cálculo de caudales correspondientes a eventos con periodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 500 años, determinación de caudales de diseño de las obras hidráulicas existentes, estimación del tiempo de concentración, identificación de las características hidráulicas de las secciones representativas y críticas de los diferentes tramos del curso de agua, modelación hidráulica a través de la cual se determinan los planos de inundabilidad para los eventos correspondientes a los diferentes periodos de retorno analizados, cálculo de las velocidades y profundidades máximas, estudio geomorfológico, estimación del nivel de exposición, estimación del nivel de vulnerabilidad, estimación cuantitativa del nivel de riesgo y generación de una cartografía de riesgo de inundaciones en la que se diferencien cuatro zonas en función del riesgo:

Zona Blanca. Corresponde a los sectores en los que se considera que el nivel de riesgo es aceptable sin necesidad de tomar medidas de mitigación debido a las inundaciones.

Zona Amarilla. Corresponde a las zonas en las que se considera que el nivel de riesgo es bajo y deben implementarse medidas de mitigación de baja intensidad.

Zona Azul. Corresponde a sectores en los que se considera que el nivel de riesgo es entre medio y alto, por lo que es necesario tomar medidas de mitigación de intensidad media a alta.

Zona Roja. Corresponde a sectores sometidos a un alto nivel de riesgo por lo que no se permiten usos permanentes como la urbanización.

5) Metodología aplicada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales

Esta metodología fue aplicada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales en Managua, Nicaragua, en el año 2005. A su vez, dentro de esta metodología existen diversos criterios para la evaluación de la amenaza, los cuales se mencionan a continuación.

1. Criterios para la evaluación de la intensidad o magnitud de la inundación. La amenaza está en función de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno y de su intensidad. La intensidad a su vez se puede definir en función de la profundidad, la velocidad del agua y la duración de las inundaciones. Por tanto, la definición de amenaza por inundaciones (en función del daño potencial) debe tener en cuenta tanto la probabilidad o frecuencia de ocurrencia de la inundación como los niveles o altura del agua.

$$\text{Amenaza por inundación} = f(\text{Intensidad} \times \text{probabilidad de ocurrencia})$$

donde:

Intensidad = f (profundidad de agua, duración, velocidad)
Probabilidad = f (precipitaciones, eventos desencadenantes (huracanes y tormentas), cambios climáticos).

2. Criterios recomendados para la evaluación de la intensidad o magnitud de la inundación. La intensidad y los efectos potenciales de las inundaciones dependen de varios aspectos, no sólo meteorológicos sino también de las características propias del terreno, como son los tipos y usos del suelo, el tipo y la distribución de la vegetación, la litología, las características de la red de drenaje, la magnitud de las pendientes de la cuenca y las obras realizadas en los cauces, entre otros. Otros aspectos importantes a considerar son los meandros y las zonas en las que los ríos se estrechan o pierden profundidad por procesos de sedimentación, especialmente en las desembocaduras, donde se acumulan los limos y arenas arrastradas por la corriente.

Los criterios para evaluar la intensidad de las inundaciones son diferentes en dependencia del tipo de inundación. Para inundaciones estáticas se considera la profundidad o altura del flujo, mientras que para inundaciones dinámicas se recomienda utilizar el producto de la velocidad por la profundidad del flujo (siempre y cuando esta fórmula arroje valores más altos, en términos de intensidad, que la anterior).

Los umbrales entre los niveles de intensidad alta, media y baja, han sido establecidos considerando la peligrosidad que una determinada columna de agua puede significar en la infraestructura, las viviendas y la vida de los pobladores.

En la Tabla 5.3 y en la Figura 5.3 se presentan los rangos definidos para cada nivel de intensidad para el fenómeno de inundaciones.

Tabla 5.3. Definición de rangos de intensidad para inundaciones estáticas y dinámicas (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales).

Nivel de intensidad de la inundación	Profundidad del flujo (H) (inundaciones estáticas) (m)	Profundidad x velocidad del flujo (inundaciones dinámicas) (m^2/s)
Alto	$H \geq 1$	$H*V \geq 1.5$
Medio	$0.5 \leq H < 1$	$0.5 \leq H*V < 1.5$
Bajo	$0.25 \leq H < 0.5$	$H*V < 1.5$ y $H \geq 0.25$

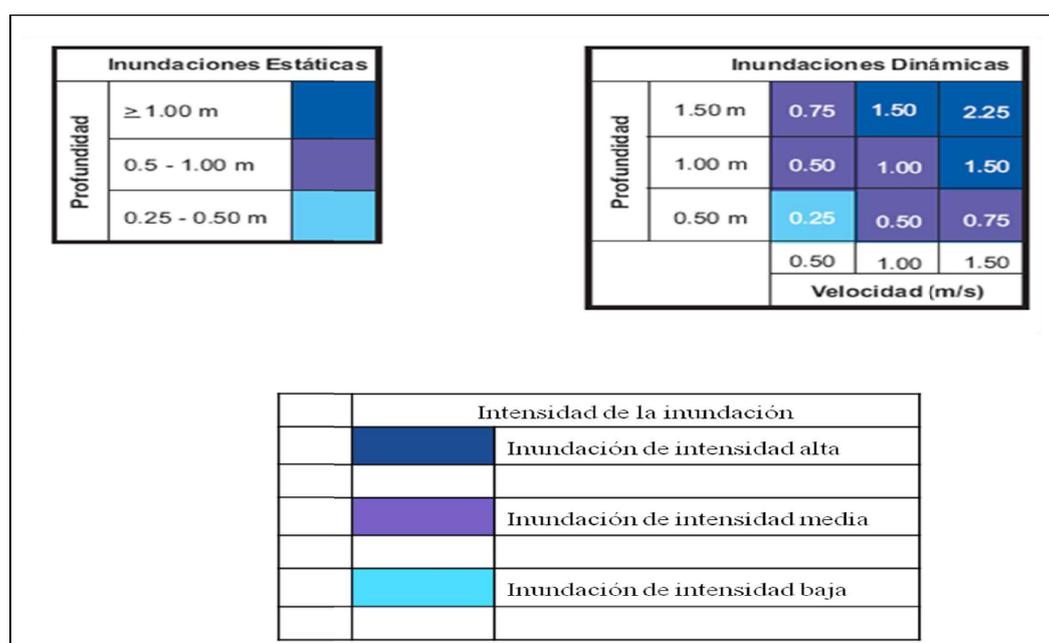


Figura 5.3 Definición de rangos de intensidad para inundaciones estáticas y dinámicas (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales).

Las inundaciones de alta intensidad corresponden a aquellas que presentan profundidades de flujo mayores a 1 m o cuyo producto resultante de la velocidad por la altura de agua es mayor a $1.5 m^2/s$. Los daños causados por una inundación de alta intensidad generalmente producen pérdidas de vidas humanas y altas pérdidas económicas.

Las inundaciones de media intensidad son aquellas cuya altura de agua varía entre 0.5 y 1 m o cuyo producto resultante de la velocidad por la altura de agua está entre 0.5 y 1.5 m²/s. Los daños a la población y los daños económicos son menores con respecto a los causados por la inundación intensa mas no despreciables.

Las inundaciones de baja intensidad corresponden a aquellas cuya profundidad de flujo varía entre 0.25 y 0.5 m o el producto de la velocidad por la altura de agua es menor a 0.5 m²/s. Los daños asociados son generalmente leves, no se esperan pérdidas de vidas humanas, aunque sí pueden darse pérdidas en áreas de cultivo y animales.

La definición de los criterios de intensidad (velocidad y profundidad) han sido consertados con base en las experiencias del equipo técnico participante y en experiencias previas de proyectos ejecutados o en ejecución en Nicaragua, tales como el PRRAC, ALARN-COSUDE, SIG-Georiesgos y el SIG para mapas de amenazas.

De igual forma, los criterios resultantes han sido revisados y comparados con criterios similares utilizados en el ámbito internacional, en particular en países como España, Venezuela y Suiza, entre otros. En España por ejemplo, la intensidad de la inundación está en función de la altura de agua y el umbral se ha definido de 0.8 m entre una inundación intensa y otra de baja intensidad (no existen tres niveles de amenaza como los propuestos en la metodología aquí presentada).

3. Criterios para la evaluación de la frecuencia, recurrencia o periodo de retorno de la inundación. La frecuencia o recurrencia de las inundaciones, es decir, cada cuánto se inunda una determinada zona, dependerá esencialmente de la frecuencia de las precipitaciones excepcionalmente fuertes. Los periodos de retorno se establecieron en tres categorías (ver Tabla 5.4).

Tabla 5.4. Categorización de la inundación según el periodo de retorno (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales).

Frecuencia de la inundación	Periodo de retorno (Tr) (años)
Alta	$Tr \leq 10$
Media	$10 < Tr \leq 50$
Baja	$50 < Tr \leq 200$

No se consideran periodos de retorno mayores a 200 años, principalmente porque las series de datos hidrometeorológicos que existen en Nicaragua no son lo suficientemente extensas (por lo general, son menores a 50 años) y consistentes para poder extrapolar a periodos de retorno mayores. Tampoco otros métodos (como los geomorfológicos) permiten estimar con precisión satisfactoria el alcance de crecidas de periodos de retorno mayores.

4. *Determinación de los niveles de amenaza por inundaciones.* Los niveles de amenaza por inundaciones de un área dada resultan de la relación entre la frecuencia de las inundaciones y su intensidad (es decir, su profundidad o el producto de la profundidad por la velocidad). Esta forma de evaluar la amenaza es comúnmente usada en países como Australia, Estados Unidos y Suiza, y ha sido aplicada en Nicaragua en el proyecto PRRAC.

Se consideran tres niveles de amenaza: alto, medio y bajo, que resultan de la combinación de la categorización de la inundación según la frecuencia (periodo de retorno) y la intensidad (H y V*H) (ver Tabla 5.5), como se describe a continuación:

Tabla 5.5. Matriz de niveles de amenaza por inundaciones.

INTENSIDAD	NIVEL DE AMENAZA			
	Alta $H \geq 1$ ó $H*V > 1.5$	Alto	Alto	Alto
	Media $0.5 \leq H < 1$ ó $0.5 < H*V < 1.5$	Alto	Medio	Bajo
	Baja $0.25 \leq H < 0.5$ ó $H*V < 0.5$	Medio	Bajo	Bajo
FRECUENCIA	Alta $Tr \leq 10$	Media $10 < Tr \leq 50$	Baja $50 < Tr \leq 200$	

• **Zonas de amenaza alta.** Son aquellas zonas en donde, sin importar la frecuencia, $H \geq 1$ m ó $H*V > 1.5$ m²/s (intensidad alta), produciendo graves daños a la población e infraestructura expuesta. También se considera zona de amenaza alta aquella inundación de alta frecuencia ($Tr \leq 10$), donde $0.5 \leq H < 1$ m ó $0.5 < H*V < 1.5$ m²/s (intensidad media).

• **Zonas de amenaza media.** Son aquellas zonas en donde, para una frecuencia media ($10 < Tr \leq 50$), $0.5 \leq H < 1$ m ó $0.5 < H*V < 1.5$ m²/s y para una frecuencia alta ($Tr \leq 10$), $0.25 \leq H < 0.5$ m ó $H*V < 0.5$ m²/s (intensidad baja). Este fenómeno ocasiona algunas pérdidas de vidas humanas y daños reparables a viviendas e infraestructura.

• **Zonas de amenaza baja.** Son aquellas zonas en donde, para una frecuencia media ($10 < Tr \leq 50$), $0.25 \leq H < 0.5$ m ó $H*V < 0.5$ m²/s (intensidad media) y para una frecuencia baja ($50 < Tr \leq 200$), $0.5 \leq H < 1$ m ó $0.5 < H*V < 1.5$ m²/s (intensidad media) y $0.25 \leq H < 0.5$ m ó $H*V < 0.5$ m²/s (intensidad baja). Este fenómeno causa daños leves a la población e infraestructura.

6) Metodología empleada en Florida -Valle del Cauca

Esta metodología fue empleada para la zonificación de amenaza y riesgo por avenidas torrenciales en la cabecera municipal de Florida, Valle del Cauca, en marzo de 1998. En este estudio, el alcance establecido permite obtener la cuantificación de los elementos expuestos afectados y la estimación del nivel de pérdidas de los mismos, lo cual lleva a establecer la condición de riesgo en que se encuentra la población para el caso específico de avenidas torrenciales que tengan una magnitud similar a la considerada en el presente trabajo. La evaluación del riesgo permite la consideración de la vulnerabilidad desde distintos aspectos y con diferentes niveles de profundidad. De igual forma, puede ser considerada la dinámica social de la zona expuesta. Todo esto se encuentra considerado dentro de una propuesta metodológica concebida para estas evaluaciones, denominada “Escenarios de Riesgo”.

Un escenario de riesgo pretende ilustrar los efectos que un fenómeno amenazante desencadenado y de una cierta magnitud, en este caso las avenidas torrenciales, puede generar sobre una serie de elementos expuestos representados por personas, construcciones y actividades. Este escenario intrínsecamente posee unas características determinadas tanto de potencialidad y como de espacialidad del fenómeno como de ocurrencia en el tiempo del mismo, considerando una cierta dinámica de los elementos expuestos. La estructuración de la metodología que sintetiza este estudio se presenta en la Figura 5.4.

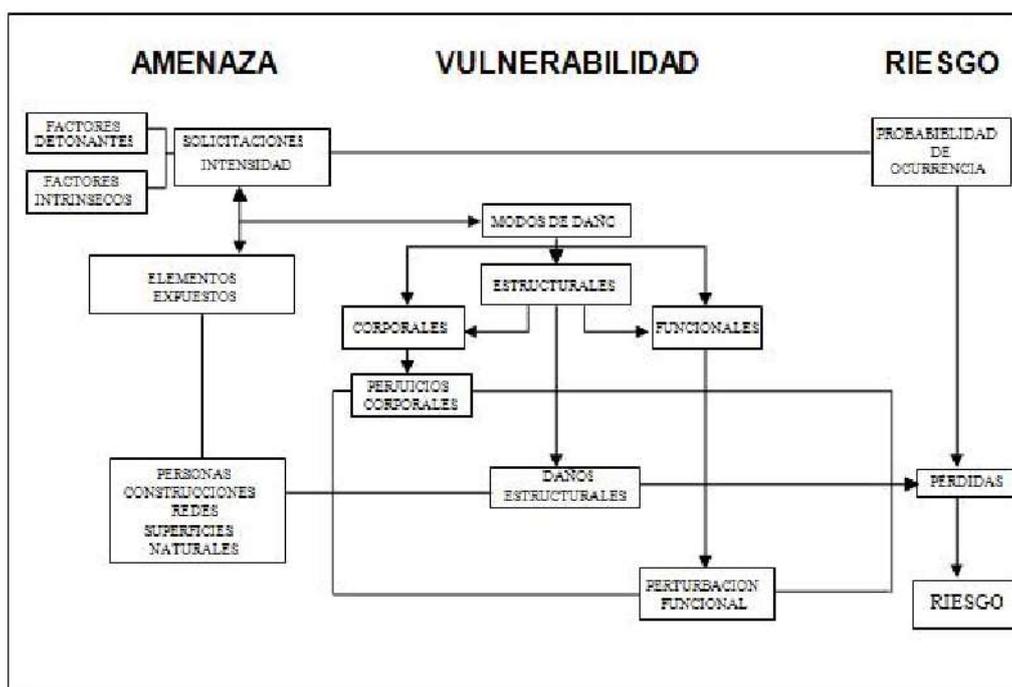


Figura 5.4 Metodología para la estructuración de un escenario de riesgo.

(Fuente: CVC - Ingeominas. Convenio CVC-984/96 Ingeominas I-024. Santa Fe de Bogotá, marzo de 1998)

7) Metodología propuesta por R. García, J.J. Rodríguez y J.S. O'Brien (2001)

La metodología para delimitación de mapas de amenaza propuesta por R. García, J.J. Rodríguez y J.S. O'Brien ha sido propuesta en el proyecto PREVENE (2001). Esta metodología fue aplicada en la región de Vargas, Caracas, y está basada en estándares suizos y australianos (OFEE *et al.*, 1997; Fiebiger, 1997), donde se establecen tres zonas que identifican los niveles de amenaza en ubicaciones específicas. La amenaza por inundación es función de la frecuencia e intensidad de la inundación. Grandes inundaciones ocurren con menor frecuencia pero poseen alta intensidad relativa a la profundidad de flujo y a la velocidad. Eventos pequeños de flujos son más frecuentes pero menos dañinos. El nivel de amenaza de flujos es entonces definido como una discreta combinación en función de la intensidad del flujo (severidad del evento) y el periodo de retorno (frecuencia) como se presenta en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Nivel Discreto de Amenaza (PREVENE, 2001).

INTENSIDAD	Alta				
	Media				
	Baja				
FRECUENCIA	Alta	Media	Baja	Muy baja	
Periodo de Retorno	10	100	500	>> 500	
Probabilidad de excedencia	10%	1%	0.2%	<<0.2%	

	Amenaza alta
	Amenaza media
	Amenaza baja
	Amenaza muy baja

En este estudio, la probabilidad de los niveles está definida para los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años. Otros periodos de retorno podrían ser considerados en este método. Para definir la intensidad del evento existen métodos que combinan la profundidad y la velocidad de flujo. El método australiano (Fiebiger *et al.*, 1997) usa la energía total definida como $H + V^2/2g$, donde H es la profundidad de flujo, V es la velocidad y g es la aceleración de la gravedad. El método suizo (OFEE *et al.*, 1997) define la intensidad en términos de una combinación de H y del producto de H y V . Altas intensidades se relacionan con altas profundidades y se asigna independiente de la velocidad de flujo. Cuando se superpone sobre un mapa, los diferentes niveles de amenaza pueden ser delimitados como se presenta en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Definición de nivel de amenaza según García, Rodríguez y O'Brien.

Nivel de amenaza	Color en el mapa	Descripción
Alto	Rojo	Las personas están en peligro, tanto dentro como fuera de las casas. Las edificaciones pueden ser destruidas.
Medio	Naranja	Las personas están en peligro fuera de las casas. Las edificaciones pueden sufrir daños y posiblemente destrucción, dependiendo de los materiales con los que han sido construidas.
Bajo	Amarillo	El peligro para las personas es bajo o inexistente. Las edificaciones pueden sufrir un ligero daño pero los sedimentos pueden afectar el interior.

Siguiendo el método suizo, los criterios usados en este trabajo hacen la distinción entre inundaciones de agua e inundaciones de flujos de lodos. La intensidad está definida en términos de profundidad máxima generada por el evento y el producto de la máxima velocidad por la máxima profundidad. En este caso de flujo de lodos las intensidades se definen en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Intensidad de la inundación según García, Rodríguez y O'Brien.

Intensidad de la inundación	Profundidad máxima H (m)		Producto de la profundidad máxima h y la velocidad máxima V (m²/s)
Alta	$H > 1.5$	ó	$V * H > 1.5$
Media	$0.5 < H < 1.5$	ó	$0.5 < V * H < 1.5$
Baja	$0.1 < H < 0.5$	y	$0.1 < V * H < 0.5$

Los eventos de flujos de lodos son más destructivos que los flujos de agua; por lo tanto, los criterios de intensidad son más conservadores que los de las inundaciones de agua, como se muestra en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Intensidad de flujo de lodos según García, Rodríguez y O'Brien.

Intensidad de flujos de lodos	Profundidad máxima H (m)		Producto de la profundidad máxima h y la velocidad máxima V (m²/s)
Alta	$H > 1$	o	$V * H > 1$
Media	$0.2 < H < 1$	y	$0.2 < V * H < 1$
Baja	$0.2 < H < 1$	y	$V * H < 0.2$

5.2. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA EN EL PRESENTE ESTUDIO

La metodología propuesta en el presente estudio para la determinación de los niveles de amenaza por el fenómeno de inundaciones se fundamenta en varios de los criterios utilizados en las metodologías revisadas y en la experiencia del grupo de investigación HIDROMAR en el área de amenazas aplicadas en el río Cauca, teniendo en cuenta los diferentes acuerdos reglamentados por la CVC para protección de las planicies aluviales del río Cauca y sus tributarios (alineamientos de diques riberaños, determinación de la franja protectora del río Cauca y periodos de retorno de diseño de diques para cultivos, infraestructuras y centros poblados). También se consideraron los planes y esquemas de ordenamiento territorial y los planes de prevención y de atención de desastres, emergencias y contingencias de las inundaciones y avenidas torrenciales.

Niveles de frecuencia de los eventos de inundaciones

A cada escenario seleccionado para el fenómeno de inundaciones se le debe asignar un nivel de frecuencia en términos cualitativos: frecuencia alta, media, moderada, baja, etc.

Los umbrales de periodos de frecuencia o recurrencia recomendados se presentan en la Tabla 5.10. Los umbrales de los periodos seleccionados corresponden inicialmente a dos veces el periodo de retorno de los diseños de los drenajes urbanos (10 años). El segundo umbral corresponde aproximadamente a los periodos que los diseños de las obras de infraestructura vial y de cultivos deben garantizar según la normatividad colombiana (30 años). El tercer umbral corresponde a la norma que estipula que cualquier comunidad aledaña a un cauce debe tener garantizada su integridad para una creciente con un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 5.10. Nivel de frecuencia de los eventos de inundaciones y avenidas torrenciales.

Frecuencia	Frecuencia de la inundación
$Tr \leq 10$ años	Alta
$10 \text{ años} < Tr \leq 30$ años	Media
$30 \text{ años} < Tr \leq 100$ años	Baja

Niveles de intensidad o magnitud de los eventos de inundaciones y avenidas torrenciales

A cada escenario seleccionado se le debe realizar una clasificación cualitativa de acuerdo con su intensidad o magnitud. Las características hidráulicas a tener en cuenta para determinar la intensidad o magnitud son la profundidad, H , la velocidad, V , y el producto de la profundidad por la velocidad, $H*V$.

5.2.1. Metodología para determinar los niveles de amenaza por inundaciones

Los umbrales de intensidad o magnitud del evento definido en el presente estudio se presentan en la Tabla 5.11. El primer umbral determinado corresponde al nivel o

profundidad del agua observada a partir de la cual las comunidades desalojan sus viviendas (0.45 m) y el segundo umbral corresponde al criterio en el cual se considera que la vida de una persona está en riesgo (0.90 m). En lo que respecta a la velocidad del flujo, los umbrales corresponden a 0.5 m/s y 0.8 m/s, respectivamente. Los umbrales del producto de la profundidad por la velocidad corresponden a 0.225 m²/s y 0.45 m²/s. Los umbrales definitivos de intensidad o magnitud del evento se toman de acuerdo con el rango de niveles, el rango de velocidades y los rangos del producto de la profundidad por la velocidad.

Tabla 5.11. Nivel de intensidad o magnitud del evento de inundación.

Intensidad o magnitud de la inundación	Nivel de intensidad o magnitud de la inundación
$H \geq 0.9 \text{ m}$ ó $V \geq 0.8 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$	Alta
$0.45 \text{ m} \leq H < 0.9 \text{ m}$ ó $0.5 \text{ m/s} \leq V < 0.8 \text{ m/s}$ ó $0.225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$	Media
$0.05 \text{ m} < H < 0.45 \text{ m}$ $V < 0.5 \text{ m/s}$ y $H*V < 0.225 \text{ m}^2/\text{s}$	Baja

Los niveles de intensidad del evento expresados en la Tabla 5.11 se ilustran en la Figura 5.5.

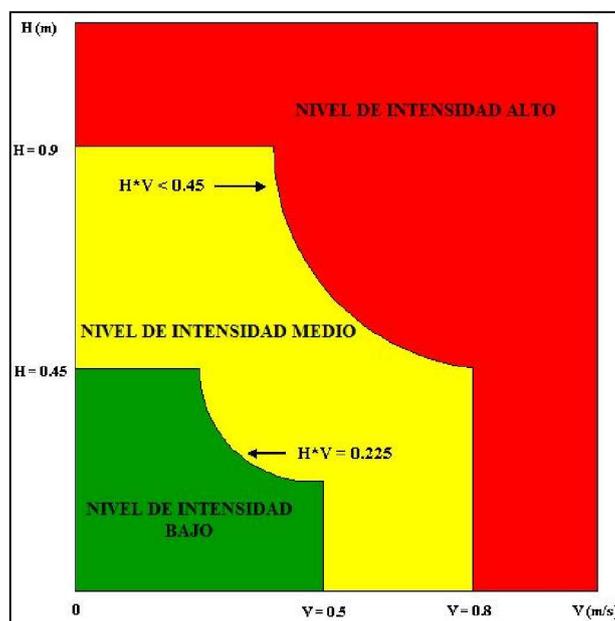


Figura 5.5 Nivel de intensidad o magnitud de la amenaza por inundaciones.

Determinación de los niveles de amenaza por inundaciones

Después de determinar los umbrales y niveles de frecuencia e intensidad del evento se procede a clasificar los mapas de inundación en diferentes niveles cualitativos de amenaza (alta, significativa, media, moderada alta, moderada, moderada baja, baja, etc.).

Los niveles de amenaza que se recomienda utilizar son alta, media y baja, los cuales dependen de los niveles de frecuencia o recurrencia del evento y de los niveles de intensidad de la amenaza, expresada mediante los tres rangos de profundidades de agua recomendados, como se presenta en las Tablas 5.12 y 5.13.

Tabla 5.12. Nivel de amenaza según la frecuencia y la intensidad o magnitud de la inundación.

Magnitud de la inundación	NIVEL DE LA AMENAZA		
	Frecuencia de la inundación		
	Alta $Tr \leq 10$	Media $10 < Tr \leq 30$	Baja $30 < Tr \leq 100$
Alta $H \geq 0.9 \text{ m}$ ó $V \geq 0.8 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$	Alto	Alto	Alto
Media $0.45 \text{ m} \leq H < 0.9 \text{ m}$ ó $0.5 \text{ m/s} \leq V < 0.8 \text{ m/s}$ ó $0.225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$	Alto	Medio	Medio
Baja $0.05 \text{ m} < H < 0.45 \text{ m}$ y $V < 0.5 \text{ m/s}$ y $H*V < 0.225 \text{ m}^2/\text{s}$	Medio	Bajo	Bajo

Tabla 5.13. Clasificación de la amenaza por inundaciones.

Profundidad (m) ó velocidad (m/s) ó profundidad por velocidad (m²/s)	Nivel de intensidad de la amenaza	Periodo de retorno (años)	Nivel de frecuencia de la amenaza	Clasificación de la amenaza
$H \geq 0.9$ ó $V \geq 0.8$ ó $H*V \geq 0.45$	Alto	$Tr \leq 10$	Alto	Alto
$H \geq 0.9$ ó $V \geq 0.8$ ó $H*V \geq 0.45$	Alto	$10 < Tr \leq 30$	Medio	Alto
$H \geq 0.9$ ó $V \geq 0.8$ ó $H*V \geq 0.45$	Alto	$30 < Tr \leq 100$	Bajo	Alto
$0.45 \leq H < 0.9$ ó $0.5 \leq V < 0.8$ ó $0.225 \leq H*V < 0.45$	Medio	$Tr \leq 10$	Alto	Alto
$0.45 \leq H < 0.9$ ó $0.5 \leq V < 0.8$ ó $0.225 \leq H*V < 0.45$	Medio	$10 < Tr \leq 30$	Medio	Medio
$0.45 \leq H < 0.9$ ó $0.5 \leq V < 0.8$ ó $0.225 \leq H*V < 0.45$	Medio	$30 < Tr \leq 100$	Bajo	Medio
$0.05 < H < 0.45$ y $V < 0.5$ y $H*V < 0.225$	Bajo	$Tr \leq 10$	Alto	Medio
$0.05 < H < 0.45$ y $V < 0.5$ y $H*V < 0.225$	Bajo	$10 < Tr \leq 30$	Medio	Bajo
$0.05 < H < 0.45$ y $V < 0.5$ y $H*V < 0.225$	Bajo	$30 < Tr \leq 100$	Bajo	Bajo

6. MODELACIÓN MATEMÁTICA

6. MODELACIÓN MATEMÁTICA

6.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO BIDIMENSIONAL FLO-2D

6.1.1. Generalidades

Los modelos matemáticos bidimensionales son los más usados para simular y estudiar los diferentes procesos hidrodinámicos, de oleaje, sedimentológicos, reológicos y de calidad del agua (transporte y dispersión de contaminantes) en zonas costeras, lagos, puertos, estuarios, embalses, ríos y planicies aluviales, canales, etc. Existe una gran variedad de este tipo de modelos, los cuales deben ser utilizados especialmente cuando parte de la llanura de inundación de la zona de estudio posee una topografía relativamente plana.

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D (O'Brien, 1988) empleado en este estudio permite simular fluidos newtonianos y no-newtonianos (flujos hiperconcentrados con altas concentraciones de sedimentos) como avenidas torrenciales o flujos de lodos. El modelo es apto para trabajar en topografías complejas, tales como planicies de inundación, conos de deyección y áreas urbanizadas; adicionalmente permite el intercambio de flujo entre el canal y la planicie de inundación.

El modelo FLO-2D combina un modelo hidrológico con un modelo hidráulico, por lo cual permite simular el proceso lluvia – escorrentía, incluyendo los procesos de evaporación e infiltración y simular los procesos hidrodinámicos en los diferentes cauces y canales definidos en el modelo. El transporte de flujo en canales, cuyas secciones pueden ser rectangulares, trapezoidales o naturales, es simulado unidimensionalmente así como el flujo a través de calles. Por otra parte, el flujo no confinado en las planicies de inundación es modelado de forma bidimensional en ocho direcciones. Con el modelo matemático FLO-2D es posible además modelar el transporte de sedimentos, brindando al usuario la posibilidad de escoger entre nueve diferentes ecuaciones de transporte formuladas por distintos autores. Finalmente se pueden simular diversas estructuras, como diques, vertederos y puentes, además de construcciones, las cuales son esquematizadas como obstrucciones al paso del flujo.

Otra de las funciones del programa FLO-2D es delimitar las zonas de amenaza y establecer para ellas distintas categorías (alta, media y baja) de acuerdo con la recurrencia de los eventos de caudales extremos o de lluvias en la zona de estudio. Para ello el usuario puede definir la metodología para determinar los mapas de amenaza, ingresando al modelo los rangos de profundidad de flujo y el producto de la velocidad por la profundidad del flujo para cada una de las categorías.

Este modelo se ha utilizado para desarrollar estudios de inundaciones y avenidas torrenciales en diferentes regiones del mundo. Específicamente en nuestro país ha sido implementado por el IDEAM e Ingeominas en la *“Zonificación de Amenaza por movimientos en masa tipo flujo en la cuenca del río Combeima, Tolima”* y en la *“Modelación matemática de avalanchas y verificación en el caso de la quebrada La Negra en Útica, Cundinamarca.”*

6.1.2. Ecuaciones hidrodinámicas

El modelo matemático FLO-2D es un modelo que se basa en la conservación de volumen, es decir, el volumen total de las hidrógrafas e histogramas de entrada debe ser igual a la suma del volumen de salida del sistema, el volumen que es almacenado en la planicie y en los canales y las pérdidas de volumen por infiltración y abstracción:

$$\text{Volumen total de entrada} = \text{Volumen de salida} + \text{Volumen almacenado} + \text{Pérdidas de volumen por infiltración y abstracción}$$

El modelo FLO-2D transporta el volumen de fluido para simular inundaciones, avenidas torrenciales y flujos en canales a través de un conjunto de celdas cuadradas y uniformes que componen la malla computacional, la cual está basada en la información topográfica de la zona de estudio. La progresión de la onda de creciente de flujo sobre la zona a modelar está controlada por la topografía y los parámetros de resistencia al flujo (rugosidad de los cauces y de las planicies de inundación). El modelamiento en dos dimensiones se logra mediante una integración numérica de las ecuaciones de movimiento y de continuidad o de conservación del volumen de fluido para flujos de baja concentración y flujos hiperconcentrados. Las ecuaciones generales en dos dimensiones que resuelve el programa incluyen la ecuación de continuidad y las ecuaciones bidimensionales de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HV_x}{\partial x} + \frac{\partial HV_y}{\partial y} = i \quad \text{ec. (22) Ecuación de continuidad}$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad \text{ec. (23) Ecuación de cantidad de movimiento en la dirección } x$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad \text{ec. (24) Ecuación de cantidad de movimiento en la dirección } y$$

donde:

V_x = Componente en la dirección x de la velocidad promedio en la vertical

V_y = Componente en la dirección y de la velocidad promedio en la vertical

S_{fx} = Componente en la dirección x de la pendiente de la línea de energía o pendiente de fricción

S_{fy} = Componente en la dirección y de la pendiente de la línea de energía o pendiente de fricción

S_{ox} = Componente en la dirección x de la pendiente del lecho

S_{oy} = Componente en la dirección y de la pendiente del lecho

H = Profundidad del flujo

g = Aceleración de la gravedad

i = Intensidad de lluvia de exceso, en términos de agua por unidad de tiempo

t = Tiempo

$\frac{\partial H}{\partial x}$ = Gradiente de presiones en la dirección x

$\frac{\partial H}{\partial y}$ = Gradiente de presiones en la dirección y

$\frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y}$ = Aceleración convectiva en la dirección x

$\frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x}$ = Aceleración convectiva en la dirección y

$\frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t}$ = Aceleración local en la dirección x

$\frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t}$ = Aceleración local en la dirección y

La ecuación de momentum o de cantidad de movimiento está expresada en términos de las componentes en x e y de la pendiente de fricción (S_{fx} y S_{fy} , respectivamente), la cual está basada en la ecuación de Manning; además, contiene los términos de aceleración local y convectiva, conformando así la ecuación completa de la onda dinámica.

Esta ecuación considera la profundidad promedio de flujo unidimensional en un canal. Para las planicies de inundación las ecuaciones de cantidad de movimiento en el modelo FLO-2D son aplicadas calculando la velocidad promedio del flujo a través de la frontera de un elemento o celda de la malla computacional en una dirección a la vez. Hay ocho direcciones potenciales de flujo: las cuatro direcciones principales (norte, sur, este y oeste) y las cuatro direcciones diagonales (noreste, noroeste, sureste y suroeste). Cada cálculo de velocidad es esencialmente unidimensional y es resuelto independientemente para las otras siete direcciones (ver Figura 6.1). La estabilidad de este esquema numérico explícito está basada en un estricto criterio que permite controlar el tamaño del intervalo de tiempo computacional, Δt .

6.1.3. Solución numérica de las ecuaciones de flujo

La forma diferencial de las ecuaciones de momentum y continuidad es resuelta en el modelo FLO-2D mediante un esquema explícito centrado de diferencias finitas. Dicho algoritmo resuelve la ecuación de momentum para la velocidad del flujo a través de la

frontera de un elemento de la malla computacional, un elemento a la vez, empleando el método numérico de Newton-Raphson.

El dominio de solución del modelo FLO-2D es discretizado en celdas cuadradas y uniformes, conformando así el sistema de grilla (malla computacional). El procedimiento computacional para flujo en las planicies requiere calcular el caudal a través de las fronteras en las ocho direcciones potenciales de flujo en una celda y comienza con una estimación lineal de la profundidad de flujo en la frontera de dicho elemento de la malla. La profundidad de flujo estimada en la frontera de una celda es un valor promedio entre las profundidades de flujo en el elemento adyacente que compartirá caudal en una de las ocho direcciones del flujo.

Otros parámetros hidráulicos son igualmente promediados entre dos elementos adyacentes, tales como la resistencia al flujo (valores de rugosidad de Manning), área de flujo, pendiente, elevación de la superficie del agua y perímetro mojado.

En resumen, el algoritmo de solución de las ecuaciones diferenciales comprende los siguientes pasos (ver Figura 6.1):

- El cálculo hidráulico en un elemento de la malla computacional se inicia con la estimación de la profundidad del flujo en la frontera de dicho elemento, la cual es obtenida promediando las profundidades de flujo en dos elementos de la malla adyacentes que compartirán descarga de flujo en una de las ocho direcciones potenciales de flujo.
- La profundidad de flujo, d , para el cálculo de la velocidad a través de la frontera de dos elementos de la malla computacional para el siguiente intervalo de tiempo, Δt ($i+1$), es estimada a partir de las profundidades de flujo halladas en el instante previo, $i*\Delta t$, utilizando una función lineal (el promedio de la profundidad del flujo entre dos elementos):

$$d_x^{i+1} = d_x^i + d_{x+1}^i$$

- La primera estimación de la velocidad del flujo es realizada empleando la ecuación de momentum para onda difusa, siendo la velocidad la única variable desconocida ya sea para flujo en canales, calles o planicies de inundación.
- Esta velocidad es empleada como la semilla en el método de Newton-Raphson para resolver la ecuación de momentum de onda dinámica. Es importante anotar que para el caso de un flujo hiperconcentrado los cálculos para estimar la velocidad de onda dinámica incluyen los términos adicionales de los esfuerzos viscosos y de cedencia.
- El caudal a través de la frontera de una celda es calculado multiplicando la velocidad por el área de la sección transversal de cada una de las caras que componen dicho elemento.

- El incremento en el caudal para un intervalo de tiempo en una celda a través de las ocho fronteras (o en el elemento aguas arriba y el elemento aguas abajo si se trata de un canal o calle) se calcula sumando los caudales en las diferentes direcciones:

$$\Delta Q_x^{i+1} = Q_n + Q_s + Q_e + Q_o + Q_{ne} + Q_{no} + Q_{se} + Q_{so}$$

donde los subíndices n, s, e, o, ne, no, se y so indican las direcciones norte, sur, este, oeste, noreste, noroeste, sureste y suroeste, respectivamente.

- El incremento en la profundidad es calculado a partir del área y del incremento de caudal en un elemento de la malla:

$$\Delta d_x^{i+1} = \frac{(\Delta Q_x^{i+1} \Delta t)}{(A_{Surf})}$$

donde Δt es el incremento en el tiempo y A_{Surf} es la superficie o área del elemento.

- El criterio de estabilidad numérica es, entonces, chequeado para el nuevo valor de la profundidad de flujo en todas las celdas. Si en alguna de las celdas alguno de los criterios de estabilidad son excedidos la simulación regresa al intervalo de tiempo anterior y se inicia el cálculo nuevamente, empleando un intervalo de tiempo menor.
- La simulación continúa incrementando los intervalos de tiempo Δt hasta que los criterios de estabilidad sean excedidos.

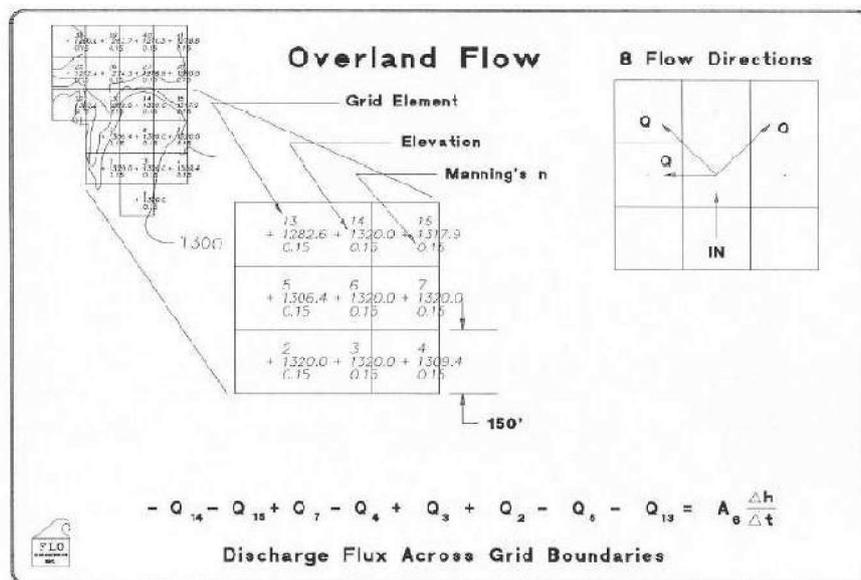


Figura 6.1 Cálculo del caudal a través de las fronteras de los elementos de la malla computacional (Fuente: Manual del Usuario del Modelo FLO-2D, versión 2009).

6.1.4. Criterios de estabilidad numérica

El esquema computacional del modelo FLO-2D procede basado en que el intervalo de tiempo, Δt , es suficientemente pequeño para asegurar la estabilidad numérica del modelo. La clave para una eficiente modelación de flujo basada en un esquema de diferencias finitas es que el criterio de estabilidad numérica limite el intervalo de tiempo, Δt , para evitar la oscilación numérica, permitiendo a su vez intervalos de tiempo eficientes suficientemente grandes para finalizar la simulación en un tiempo razonable. El modelo FLO-2D opera con un intervalo de tiempo variable que se modifica automáticamente al ser excedidos los criterios de estabilidad numérica. Estos criterios son chequeados para todos los elementos de la malla computacional en cada intervalo de tiempo, Δt , para asegurar que la solución sea estable. Si los criterios de estabilidad son excedidos en un instante de tiempo cualquiera, todos los cálculos hidráulicos para dicho instante son descartados. La simulación regresa al instante de tiempo anterior y automáticamente dicho Δt es reducido. Los cálculos hidráulicos comienzan nuevamente en dicho instante de tiempo.

El esquema explícito centrado de diferencias finitas utilizado por el modelo FLO-2D se encuentra limitado por tres criterios de estabilidad numérica. Uno de estos criterios es el criterio de estabilidad de Courant o también llamado criterio de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), el cual restringe los intervalos de tiempo haciendo que éstos sean muy pequeños. Los algoritmos de cálculo para el modelo matemático FLO-2D se ejecutan empleando intervalos de tiempo pequeños y variables, de forma que se cumpla el criterio de estabilidad de Courant. Este criterio relaciona la celeridad de la onda de flujo con el intervalo de ejecución del modelo y el tamaño de la celda de la malla computacional de la siguiente forma:

$$\Delta t = \frac{Cr \Delta x}{(\beta V + C_o)} \quad \text{ec. (31)}$$

donde:

Cr = Número de Courant, el cual debe ser menor o igual a uno ($Cr \leq 1$)

Δx = Longitud de la celda

Δt = Incremento del tiempo

V = Velocidad promedio calculada en la celda en la dirección principal del flujo

β = Coeficiente igual a 5/3 para un canal ancho

C_o = Celeridad de la onda

Sin embargo, para ecuaciones no lineales no es posible evitar completamente la dispersión numérica que ocurre al definir el número de Courant igual a 1 (Fletcher, 1990). Para modelar la onda dinámica se aplica otro criterio de estabilidad numérica, desarrollado por Ponce & Theurer (1982) y llamado el criterio de estabilidad numérica de la ecuación de onda dinámica. Este criterio está en función de la pendiente del lecho, el caudal unitario y el tamaño de la celda y un coeficiente empírico, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\Delta t < \frac{\zeta S_0 \Delta x^2}{q_0} \quad \text{ec. (32)}$$

donde:

q_0 = Caudal unitario

S_0 = Pendiente del lecho

ζ = Coeficiente empírico

El coeficiente ζ fue creado como una variable única para el elemento de la malla computacional y es definida por el usuario. Los valores de ζ van desde 0.1 a 1, con un valor típico de 0.25. Similar al criterio de estabilidad de CFL, si el intervalo de tiempo establecido (Δt) es superior al valor del término ($\zeta S_0 \Delta x^2 / q_0$) entonces los cálculos hidráulicos son interrumpidos y el intervalo de tiempo es reducido.

Antes de evaluar los criterios de estabilidad de CFL y de la ecuación de la onda dinámica, el modelo chequea el cambio en la profundidad del flujo en el instante de tiempo previo en todas las celdas. El modelo utiliza el porcentaje de cambio en la profundidad como criterio para definir si se requiere un análisis adicional de estabilidad numérica ya que este cambio en la profundidad de flujo es usado para evitar la necesidad de un análisis adicional. Igualmente, al verse excedido este valor definido por el usuario, el intervalo de tiempo es reducido y los cálculos hidráulicos son anulados. Los valores sugeridos son de 0.1 a 0.3, con un valor típico de 0.2.

6.1.5. Resolución espacial y temporal

Las resoluciones espacial y temporal del modelo FLO-2D dependen del tamaño de los elementos de la malla computacional y de la tasa de crecimiento de la hidrógrafa de caudales de entrada. Con un tamaño de celda reducido se obtiene una mejor resolución de la distribución de la inundación; no obstante, esto trae como consecuencia mayores tiempos computacionales. El rango recomendado del tamaño de las celdas está entre 15 y 150 m, tamaños considerados apropiados para la mayoría de simulaciones con el modelo FLO-2D. Elementos de la malla computacional más pequeños ocasionan un aumento no sólo en la cantidad de celdas sino también en la tasa de caudal por unidad de área.

El modelo FLO-2D fue desarrollado para simular grandes inundaciones en superficies no confinadas. La discretización de la topografía de la planicie de inundación en un sistema de celdas cuadradas para simular grandes descargas de caudal puede eclipsar algunos rasgos topográficos como montículos y depresiones del terreno. Estas variaciones topográficas no afectarán la superficie del agua cuando gran parte de la zona estudiada resulta inundada. Para la simulación de aguas someras debido a pendientes muy pronunciadas y caudales pequeños se deben usar tamaños de celda menores. Cuando se defina el tamaño de los elementos de la malla computacional debe haber un balance entre la resolución de los mapas y la exactitud. No obstante, el manual del modelo FLO-2D recomienda que una

mallla no tenga más de 30000 celdas para que el tiempo computacional no resulte excesivamente alto.

6.1.6. Hipótesis y limitaciones del modelo FLO-2D

Las principales hipótesis y limitaciones del modelo FLO-2D involucran la resolución temporal y espacial de la mallla computacional y son las siguientes:

- Cada elemento o celda de la mallla está representado por un único valor de elevación, rugosidad y profundidad de flujo;
- Durante un intervalo de tiempo, Δt , el flujo se considera uniforme;
- La distribución de presiones en la profundidad es hidrostática;
- La rugosidad hidráulica se basa en la resistencia al flujo estacionario, uniforme, turbulento;
- Un elemento de canal está representado por una sola geometría de canal (sólo una sección transversal) y un valor de rugosidad, y se encuentra ubicado en una sola celda de la mallla computacional;
- El flujo a través de calles y canales es modelado unidimensionalmente;
- El flujo rápidamente variado, como saltos hidráulicos u ondas de choque, no es simulado.

6.1.7. Variabilidad de parámetros

Ajuste vertical de la rugosidad en los canales

La rugosidad es un parámetro que varía inversamente con la profundidad del flujo: a menor profundidad del flujo, se tendrá una mayor resistencia debido a la fricción generada por la vegetación y el material del lecho. Esta variación vertical de la rugosidad puede ser implementada tanto para las llanuras de inundación como para los canales. La variación vertical de la rugosidad en los canales depende del valor de la rugosidad de Manning a banca llena, el cual es ingresado al modelo para cada elemento de canal.

La ecuación básica para el valor n_d de la rugosidad en función de la profundidad de flujo en los canales es:

$$n_d = n_b e^{r2(1-\text{depth}/d_{\max})} \quad \text{ec. (33)}$$

donde:

- n_b = Rugosidad del canal a banca llena
- depth = Profundidad del flujo
- d_{\max} = Profundidad a banca llena
- r2 = Coeficiente de ajuste de rugosidad

El valor de r_2 es definido por el usuario (el rango está entre 0 y 1.2). Entre mayor sea el valor de r_2 , mayor será el incremento del valor de la rugosidad con la disminución de la profundidad del flujo a partir del nivel de banca llena. El modelador deberá, entonces, realizar un análisis de la variación de la rugosidad en la planicie con la profundidad del flujo.

Ajuste vertical de la rugosidad en la planicie de inundación

La variación vertical de la rugosidad en las planicies de inundación en el modelo FLO-2D depende del valor de la rugosidad definida por el usuario para una profundidad del flujo mayor o igual a 1 m.

Cuando en un instante dado la profundidad de flujo en una celda de la planicie de inundación se encuentra entre 0.15 m y 1 m la rugosidad es calculada por el modelo de acuerdo con la siguiente expresión:

$$n_d = 1.5 n_b e^{-(0.4 \text{depth} / d_{\max})} \quad \text{ec. (34)}$$

donde:

n_b = Rugosidad para profundidades de flujo iguales o mayores a 1 m, la cual es igual a los valores de rugosidad ingresados a la planicie de inundación

depth = Profundidad de flujo

d_{\max} = Profundidad de flujo igual a 1 m

Si la profundidad de flujo en una celda de la planicie de inundación, en un instante dado, es menor a 0.15 m o mayor a 1 m, entonces el modelo define la rugosidad en dicha celda dependiendo de la profundidad de flujo, así:

- Si la profundidad del flujo se encuentra entre 0 y 0.06 m entonces el valor de rugosidad asignado a dicha celda es igual al valor preestablecido por el usuario, cuyo rango varía entre 0.1 y 0.2.
- Si la profundidad del flujo se encuentra entre 0.06 m y 0.15 m entonces el valor de rugosidad asignado a dicha celda será igual a la mitad del valor de la rugosidad preestablecido por el usuario cuando la profundidad del flujo es menor de 0.06 m.
- Si la profundidad de flujo es igual o mayor a 1 m entonces el valor de rugosidad asignado a dicha celda es igual al preestablecido por el usuario para profundidades de flujo iguales o mayores a 1 m.

Limitación del número de Froude

Si durante una simulación existe un desajuste entre la pendiente, el área de flujo y la rugosidad se pueden presentar velocidades excesivamente altas, lo cual puede causar oscilación numérica. Limitar el número de Froude es una herramienta que puede ser usada

para ajustar la relación entre el área de flujo, la pendiente y los valores de rugosidad de Manning, tanto en canales y calles como en las planicies de inundación. Esto ayuda, además, a mantener la estabilidad numérica de la simulación ya que controla la velocidad de la onda de creciente.

Cuando el número de Froude calculado por el modelo en un elemento de la malla computacional supera el número límite de Froude especificado por el usuario, el valor de rugosidad de dicha celda es incrementado una pequeña cantidad para el siguiente intervalo de tiempo. De esta manera el flujo en la simulación puede ser forzado a ser subcrítico si en la realidad los flujos crítico y supercrítico no son posibles.

El modelo FLO-2D incrementa el valor de la rugosidad de Manning al verse superado el número de Froude límite definido por el usuario de acuerdo con el siguiente criterio:

<u>Variación porcentual del valor de rugosidad de Manning (% E)</u>	<u>Valor del incremento de n</u>
< 0.20	0.000200
0.20 < % E < 0.50	0.000100
0.50 < % E < 1.00	0.000020
1.00 < % E < 2.00	0.000002

Después de los ajustes a la rugosidad del elemento donde el número de Froude establecido fue superado la simulación continúa. Si en el siguiente intervalo de tiempo el número límite de Froude no es excedido, el valor de la rugosidad en dicha celda se reduce en 0.0001.

6.1.8. Variabilidad de parámetros

Flujo en canales

El flujo en canales es simulado unidimensionalmente como se indicó previamente. El promedio de los valores calculados de la velocidad y la profundidad del flujo define el caudal entre los elementos que componen un canal en la malla computacional. La longitud promedio de la trayectoria de flujo entre dos elementos de canal está en el orden de la longitud del elemento de la malla, lo cual evita la simulación de saltos hidráulicos sobre cortas distancias. La transición entre flujo subcrítico y supercrítico se basa en las condiciones promedio entre dos elementos de canal.

El flujo en el canal de un río es simulado con secciones rectangulares, trapezoidales o levantadas en campo (naturales). Los canales son representados para cada celda de la malla; es decir, en cada celda de canal debe haber una sola sección transversal y un único valor de rugosidad.

El ancho del canal puede ser mayor que el ancho de la celda de la malla, abarcando varias celdas o elementos (Figura 6.2). Si el ancho del canal es mayor que el ancho de la celda el modelo extiende el canal a las celdas vecinas de la malla. El canal interactúa con las celdas

de la llanura por medio de las celdas en las cuales están ubicadas las banquetas izquierda y derecha para intercambiar caudal. Cada banqueta tiene una elevación única. Las celdas que quedan dentro del canal son removidas automáticamente de la planicie de inundación.

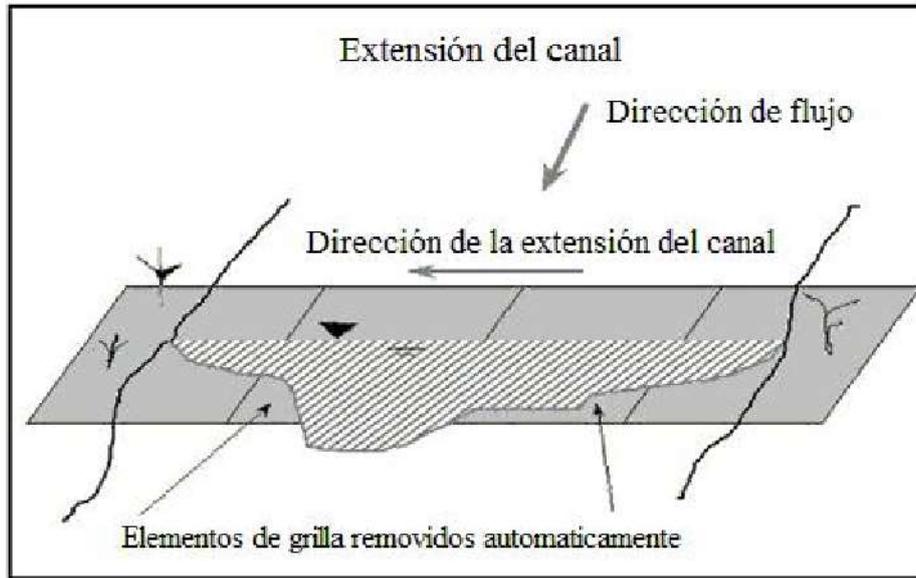


Figura 6.2 Extensión del canal sobre varios elementos de la malla.

Diques

Al implementar un dique en el modelo FLO-2D se limita el flujo en la superficie de la llanura de inundación mediante el bloqueo de una de las ocho posibles direcciones del flujo. Los diques se definen en los límites de una celda de la malla computacional (Figura 6.3). Si un dique pasa por el centro de una celda, la posición de éste en el modelo es representada por una o más de las ocho direcciones de dicha celda y a lo largo de una serie de celdas consecutivas. Se puede asignar una elevación diferente a la cresta reportará si la profundidad del flujo rebasa la altura del dique calculando el caudal sobre el mismo mediante la ecuación de vertedero de cresta ancha, con un coeficiente de descarga de 2.85. El dique no fallará por desbordamiento del flujo a menos que el usuario defina la ruptura del mismo.



Figura 6.3 Esquemización de una simulación en el modelo FLO-2D.

Estructuras hidráulicas

El modelo FLO-2D puede simular diversas estructuras hidráulicas como puentes cuya descarga se especifica mediante una curva o tabla de calibración. Esta curva debe ser determinada por medio de mediciones de campo o mediante simulación numérica aplicando un modelo unidimensional (por ejemplo, HEC-RAS). Posteriormente, la curva de calibración de la estructura se ingresa al modelo FLO-2D, permitiendo así simular los efectos de remanso causados por la obstrucción del flujo.

La forma general de la ecuación de la curva de calibración de una estructura hidráulica está en función de la profundidad h :

$$Q = ah^b$$

donde a es el coeficiente de regresión y b es el exponente de la regresión.

Flujo en calles

El flujo a través de las calles es simulado como un flujo en canales rectangulares poco profundos. La dirección del flujo (en las ocho direcciones posibles), el ancho de la calle y la rugosidad se especifican para los elementos o celdas que componen una calle. Al igual que en los canales que representan los cauces el intercambio de flujo entre las calles y la planicie es simulado por el modelo FLO-2D.

Esta herramienta debe ser usada si el ancho de la calle es menor que el ancho de una celda. De otro modo se debe asignar únicamente el valor de la rugosidad de la superficie de la calle a las celdas que la contienen.

Infiltración

La infiltración y abstracción son simuladas en el modelo FLO-2D para determinar las pérdidas de precipitación debido a la cobertura del suelo. Para ello el modelo FLO-2D utiliza dos métodos: el modelo de infiltración Green-Ampt y el método de número de curva, *CN*. Los alcances de este proyecto no incluyeron trabajos de campo para la estimación de la conductividad hidráulica, entre otros parámetros que requiere el modelo Green-Ampt; por esta razón, el método utilizado fue el de número de curva, *CN*.

6.1.9. Fases del programa

El modelo matemático bidimensional FLO-2D dispone de un grupo de programas preprocesadores y postprocesadores, tanto para ingresar los datos como para visualizar los resultados. Entre los programas preprocesadores se encuentran el *GDS* (Grid Developer System o sistema para la elaboración de la malla computacional) y el *PROFILES*. Adicionalmente el modelo cuenta con una interfase gráfica de usuario (*GUI*) en la cual el usuario puede ejecutar el programa, ingresar datos, tener acceso a los diferentes pre y postprocesadores y acceder a los comentarios explicativos de las distintas variables y parámetros del modelo FLO-2D.

El preprocesador *GDS* permite al usuario ingresar la información de la zona de estudio de una forma sencilla, visualizándola gráficamente. A través del *GDS* se ingresa la información topográfica y se discretiza en celdas cuadradas mediante la creación de la malla computacional, se trazan los canales y las calles, se esquematizan las obstrucciones del flujo y se ingresan diques y demás estructuras hidráulicas. También el *GDS* es utilizado para asignar los valores de rugosidad de las planicies, los canales y las calles. Además, es posible importar aerofotografías georreferenciadas y archivos shape como imágenes de fondo para apoyar la edición gráfica.

El preprocesador *PROFILES* sirve para la edición de las secciones transversales de los canales. Mediante esta herramienta es posible ajustar el perfil y la pendiente de los canales e interpolar las secciones transversales.

Los postprocesadores del modelo FLO-2D son *MAXPLOT*, *MAPPER* e *HYDROG*. Estos programas permiten al usuario la visualización de los resultados de la simulación así como la generación de mapas de inundaciones y amenaza.

El postprocesador *MAXPLOT* permite una visualización rápida de los resultados aunque sin muchos detalles. Entre los resultados que pueden apreciarse se encuentran las profundidades y las velocidades del flujo máximas y finales en las llanuras, calles y canales, así como la energía específica máxima, entre otros.

El postprocesador *HYDROG* muestra la hidrógrafa de caudales en cualquier tramo o elemento de canal y parámetros hidráulicos como la velocidad del flujo, la profundidad, el

caudal, el área de flujo, el radio hidráulico, el perímetro mojado, el ancho superior, la relación entre ancho y profundidad y la pendiente de la línea de energía.

Mediante el postprocesador *MAPPER* se crean los mapas de inundación y amenaza. Al igual que el postprocesador *MAXPLOI*, pueden visualizarse las profundidades y velocidades del flujo máximas y finales de las llanuras, calles y canales pero de una forma más detallada.

Los mapas de amenaza son generados con base en la metodología desarrollada por García *et al.*: (2003, 2005), la cual se describe en la Sección 6.2. Sin embargo, el usuario puede personalizar la determinación de la amenaza ingresando los rangos de profundidades y del producto de la velocidad y la profundidad para cada nivel de amenaza, dependiendo del tipo de evento (inundación o flujo de lodos).

6.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO BIDIMENSIONAL FLO-2D

6.2.1. Esquematización

6.2.1.1. Descripción de la malla computacional

El primer paso dentro del proceso de implementación del modelo matemático bidimensional FLO-2D consiste en la construcción del modelo digital de elevaciones del terreno (DEM, por sus siglas en inglés). El DEM del municipio de La Unión fue generado por el grupo de cartografía y SIG, incluyendo curvas de nivel cada 5 m. El siguiente paso consiste en delimitar de la manera más precisa posible el área a modelar. El área del modelo debe ser lo suficientemente grande de tal manera que el fenómeno de inundaciones en la zona urbana puedan ser representados y simulados correctamente, pero al mismo tiempo debe ser la menor posible con el fin de optimizar el tiempo computacional. El área a modelar debe incluir el área de principal interés del estudio como son las zonas urbana y de expansión urbana del municipio de La Unión y los cauces y corrientes que se desbordan durante las crecientes y ocasionan daños en estas zonas.

También es importante ubicar de manera apropiada las fronteras abiertas del modelo, es decir, los sitios o secciones a través de los cuales ingresan y salen las corrientes de agua y flujos de lodos del área modelada. Se recomienda localizar las fronteras abiertas en aquellos sectores donde se cuente con la mayor cantidad de información posible (batimétrica, hidrológica, sedimentológica), como son las estaciones hidrométricas en los cauces. En la quebrada La Unión la frontera abierta superior se localizó aproximadamente 2900 m aguas arriba del punto de la confluencia de la cañada El Lucero en la quebrada La Unión. Frecuentemente durante la etapa de aplicación del modelo matemático (simulación de escenarios) se requiere plantear y evaluar la implementación de diferentes estructuras (tales como diques de protección, espolones, vertederos, puentes, bocatomas, etc.); estas estructuras generan variaciones las condiciones hidrodinámicas en el sector intervenido, pudiendo propagarse hasta alcanzar el sector de las fronteras abiertas del modelo; si esto

llegase a presentarse se generaría un conflicto con las condiciones hidrodinámicas de frontera preestablecidas por el modelador. Para evitar este conflicto, debe procurarse que las fronteras abiertas del modelo se encuentren suficientemente distanciadas de los sitios de mayor interés en el estudio.

Un aspecto importante dentro del proceso de construcción de la malla computacional consiste en la selección del tamaño más apropiado de las celdas de la malla. La dimensión de las celdas depende de varios factores como son, la extensión del área de estudio (es decir, del área a modelar), el grado de detalle requerido o aceptable para describir el flujo, el tiempo computacional, la estabilidad numérica del modelo y las limitaciones del modelo matemático en cuanto al número máximo de celdas. De acuerdo con las recomendaciones del manual de FLO-2D, una malla de más de 30000 celdas implica un esfuerzo y tiempo computacional excesivamente altos. Teniendo en cuenta la extensión del área de estudio en el municipio de La Unión (800 ha, que incluyen la zona urbana y el área de expansión urbana) se planteó una única malla de celdas de 20 m de lado, con alrededor de 28000 celdas.

Posteriormente se realizó la interpolación de los niveles topográficos disponibles en la planicie de inundación para asignar los niveles o elevaciones a cada una de las celdas de la malla computacional. Para ello el programa GDS dispone de distintas opciones de interpolación en las que el usuario elige el número mínimo de puntos de elevación a considerar en la vecindad de cada celda y el radio de interpolación, entre otros parámetros de acuerdo con la densidad de la información topográfica. En este proyecto se utilizó el promedio de la cantidad de puntos de elevación por celda y el método de la desviación estándar. De esta forma es asignado un único valor de elevación -que puede ser modificado manualmente- a cada celda de la malla computacional.

6.2.1.2. Rugosidad de las llanuras

Cada celda de la malla computacional tiene un valor de rugosidad de Manning de 0.04 (valor que trae el modelo FLO-2D por defecto). Por ello es necesario implementar la variabilidad espacial de la rugosidad para representar correctamente los diferentes obstáculos presentes en la zona de estudio. En la planicie del municipio de La Unión existen cultivos de uva, guayaba, papaya, pastos naturales, árboles, rastrojo y zona urbana (superficies en concreto). Los valores de rugosidad de las llanuras se ingresan inicialmente para 0.15 m de profundidad de inundación; se debe realizar una primera simulación sin tener en cuenta la variabilidad vertical de la rugosidad. Posteriormente se ingresan los valores de rugosidad de las planicies para 1 m de inundación, realizando otra simulación teniendo en cuenta la variación en la vertical de la rugosidad en las llanuras (ver Sección 6.1.8). Luego los dos resultados son comparados para efectos de calibración y análisis de sensibilidad. En la Tabla 6.1 se presentan los valores del coeficiente de rugosidad de Manning estimados para las diferentes coberturas vegetales existentes en la zona de estudio del municipio de La Unión, para profundidades de inundación de 0.15 y 1 m.

Tabla 6.1. Valores estimados del coeficiente de rugosidad de Manning en la planicie aluvial de la zona de estudio del municipio de La Unión.

Tipo de cobertura vegetal	Coeficiente de rugosidad de Manning n ($s/m^{1/3}$)	
	Profundidad de inundación de 1 m	Profundidad de inundación de 0.15 m
Rastrojo	0.100	0.100
Pasto natural	0.035	0.032
Zona urbana	0.025	0.025
Árboles (bosques)	0.043	0.033
Cultivos de uva	0.069	0.036
Cultivos de papaya	0.052	0.034
Cultivos de guayaba	0.043	0.033

En los cultivos de uva se asumió una densidad de 0.39 árboles de uva por metro cuadrado; en los cultivos de guayaba se asumió una densidad de 0.05 árboles por metro cuadrado; y en los cultivos de papaya se asumió una densidad de 0.125 árboles por metro cuadrado en la zona de estudio del municipio de La Unión.

6.2.1.3. Esquematización de los ríos y canales

Posteriormente se realiza, dentro de la malla computacional, el trazado de los ríos y los canales siguiendo su alineamiento de acuerdo con los planos topográficos; este trazado de ríos y canales se efectúa siguiendo la margen izquierda de cada uno de ellos (mas no el eje de los ríos y canales); el modelo calcula o determina la margen derecha de acuerdo con el ancho de cada sección. En el modelo del municipio de La Unión se incluyeron todos los cauces y canales existentes y que pueden originar problemas de inundaciones en el casco urbano, como son: quebradas La Unión y El Rincón, zanjones Los Muertos y Negro y la cañada El Lucero. Inicialmente se ingresan las secciones transversales solamente del cauce principal de cada uno de los canales, es decir, sólo se introduce la sección del cauce comprendida entre las bancas derecha e izquierda, obviando la información topográfica de las llanuras puesto que ésta se encuentra incluida en el modelo digital de elevaciones del terreno DEM. Este trazado de las corrientes de agua se realiza en el preprocesador *GDS*, procurando que el alineamiento de cada canal esquematizado en el modelo se asemeje a cada cauce, sin cambios bruscos en el trazado.

Es necesario señalar que el modelo FLO-2D calcula las profundidades de flujo promedio y, por consiguiente, es más significativo para la exactitud final de los resultados representar correctamente las características batimétricas promedio en un sector que representar de manera exacta la batimetría de todos los puntos de la malla. Como se mencionó

anteriormente, cada elemento de canal debe tener una sección transversal. Debido a que los levantamientos batimétricos se realizaron con un determinado espaciamiento entre secciones transversales del cauce, de acuerdo con la irregularidad de su geometría, fue necesario interpolar entre las secciones transversales levantadas en campo. Este procesamiento se efectúa a través de los programas preprocesadores *GDS* o *PROFILES*.

Los valores del coeficiente de rugosidad de Manning en las quebradas La Unión y El Rincón y el zanjón Negro o Moral estimados e ingresados al modelo inicialmente se muestran en las Tablas 6.2 a 6.3; la determinación de estos valores se presentó en la Sección 4.3 (ver Tablas 4.1 a 4.3). En el zanjón Negro o Moral se ingresó al modelo matemático un valor de rugosidad constante de $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$. En el zanjón Los Muertos o de Aguas Negras y en la cañada El Lucero se asumió un valor de rugosidad constante de Manning de $0.07 \text{ s/m}^{1/3}$ en todas las secciones transversales de estos cauces ya que estos cauces presentan materiales del lecho considerablemente grandes.

Tabla 6.2. Factores de rugosidad de Manning en el cauce principal de la quebrada La Unión.

Secciones	Abscisas	n ($\text{s/m}^{1/3}$)
1-16	K0 + 000.00 – K1 + 608.28	0.033
16 - 24	K1 + 608.28 – K2 + 279.34	0.031
24 - 26	K2 + 279.34 – K2 + 476.17	0.032
26 - 29	K2 + 476.17 – K2 + 774.03	0.030
29 - 34	K2 + 774.03 – K3 + 282.87	0.031

Tabla 6.3. Factores de rugosidad de Manning en el cauce principal de la quebrada El Rincón.

Secciones	Abscisas	n ($\text{s/m}^{1/3}$)
1-7	K0 + 000.00 – K1 + 372.77	0.033
7 - 15	K1 + 372.77 – K3 + 474.43	0.032

Puentes

En la zona de estudio y sobre la quebrada La Unión y la quebrada El Rincón existen varios puentes, los cuales fueron implementados en el modelo. Entre los puentes ubicados sobre la quebrada La Unión se encuentran el puente de la Calle 12, de la Carrera 21, de la Carrera 19, de la Calle 8, de la Carrera 14, de la Carrera 13, de la Carrera 11, de la Carrera 9 y el puente de la Carrera 15. Sobre la quebrada El Rincón se encuentran los puentes de la Carrera 9, en la sección 10 (abscisa K1 + 999.49) y en la sección 12 (abscisa K2 +502.69). En el zanjón Los Muertos se encuentran los puentes en las secciones 2, 3, 4, 5, 5A, 7, 8, 9A y 10, con abscisas K0 + 155.50, K0 + 299.73, K0 + 344.25, K0 + 453.03, K0 + 703.99, K0

+ 955.05, K1 + 130.11, K1 + 784.29 Y K1 + 838.10, respectivamente. Fue necesario incluirlos en el modelo ya que éstos generan un efecto de remanso, originando mayores niveles de inundación hacia aguas arriba de ellos.

Para representar en el modelo FLO-2D diferentes estructuras existentes en los cauces, tales como puentes, alcantarillas y vertederos es necesario determinar las curvas de calibración de cada una de estas estructuras. Para la generación de estas curvas se implementó el modelo matemático unidimensional HEC-RAS.

Al introducir estructuras hidráulicas al modelo FLO-2D se genera automáticamente en la carpeta del proyecto un archivo llamado HYSTRUC.DAT, el cual contiene la información correspondiente a todas las estructuras hidráulicas en la zona de estudio. En dicho archivo se encuentra el nombre de las estructuras y las curvas o tablas de calibración que relacionan los niveles de flujo con los caudales correspondientes.

Las tablas de calibración en los puentes y obtenidas mediante la implementación del modelo unidimensional HEC-RAS se presentan en el Anexo 6.1.

6.2.1.4. Infiltración

Teniendo en cuenta las características geomorfológicas y la cobertura vegetal de la cuenca, los suelos se pueden clasificar, desde el punto de vista hidrológico, con base en los criterios propuestos por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) de los Estados Unidos. Esta metodología supone que en un suelo totalmente impermeable la infiltración es nula y la precipitación es igual a la escorrentía superficial es igual a la precipitación; en contraste, en un suelo completamente permeable el volumen total de lluvia se infiltra y la escorrentía superficial es igual a cero.

Para la aplicación de la metodología del SCS se deben clasificar los suelos de acuerdo con su grado de permeabilidad, como se describen a continuación:

- Suelos tipo A: Suelos con un potencial de escurrimiento bajo, altas capacidades de infiltración cuando están completamente húmedos y alta transmisión de agua (principalmente arenas y gravas muy bien gradadas).
- Suelos tipo B: Suelos con capacidad de infiltración moderada cuando están completamente húmedos y velocidades medias de transmisión de agua. Son principalmente suelos medianamente profundos y drenados, de textura entre moderada y muy fina.
- Suelos tipo C: Suelos con capacidad de infiltración y transmisión de agua bajas cuando están completamente húmedos. Son principalmente suelos de textura fina o moderadamente fina.

- Suelos tipo D: Suelos con capacidad de infiltración y transmisión de agua muy bajas cuando están completamente húmedos. Se expanden significativamente cuando se mojan (principalmente arcillas altamente plásticas).

La información de cobertura y usos del suelo de la zona de estudio del municipio de La Unión se empleó para determinar los números de curva, *CN*, y, finalmente, implementarlos en el modelo matemático FLO-2D.

6.2.1.5. Condiciones de frontera

Las condiciones hidrodinámicas a definir en las fronteras abiertas del modelo se denominan Condiciones de Frontera y revisten especial importancia durante el proceso de implementación de un modelo matemático. En el primer elemento o sección de cada canal (es decir, en la frontera superior) se deben ingresar las hidrógrafas para los diferentes periodos de retorno que se requiere simular; la frontera inferior, es decir, en el último elemento o sección de cada canal (si éste no deriva sus aguas directamente a otro cauce) el modelo FLO-2D ofrece varias opciones de salida de flujo, entre las que se encuentran: los niveles de agua (si se dispone de ellos), la curva de calibración Nivel - Caudal (cuando se tiene) o el vertimiento libre del flujo. Aunque lo ideal sería disponer de alguna de las dos primeras opciones para propósitos de calibración, en muchos casos en la práctica no se cuenta con suficiente información medida en campo. Tal es el caso en el municipio de La Unión, por lo cual en los cauces modelados se introdujo en las fronteras inferiores de los cauces, la opción de “Salida libre del flujo”. Además de asignar los elementos de salida de los cauces y canales se deben definir los elementos de salida del flujo de la planicie de la zona de estudio, pues, de lo contrario, se crearía un efecto de remanso que no representa la realidad. Para ello se definen los nodos de salida que se encuentran ubicados en los bordes del dominio computacional, donde las elevaciones presentan los niveles más bajos. Se pueden definir cuantos nodos de salida se requieran; sin embargo, hay algunas especificaciones que deben ser tenidas en cuenta para su ubicación (deben estar alejados de las zonas de interés y no deben contener ningún otro elemento como calles u obstrucciones).

Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales en el modelo hidrodinámico se refieren a las características hidrodinámicas (niveles de agua y caudales) que se presentan en el instante inicial ($t = 0$) del periodo a simular en toda el área de estudio. Estas características hidrodinámicas deben corresponder a las condiciones reales en la naturaleza o prototipo y, por lo tanto, deben ser medidas en campo simultáneamente en toda la zona de estudio. Sin embargo, frecuentemente no es posible disponer de esta información debido a las dificultades económicas para llevarlas a cabo. El modelo matemático FLO-2D, teniendo en cuenta lo anterior, tiene la opción de no exigir al modelador el ingreso de estas condiciones iniciales. Considerando que en la zona de estudio del municipio de La Unión no se dispone de esta información se optó por esta facilidad del modelo FLO-2D. En este caso el modelo FLO-

2D genera las condiciones iniciales a partir de los caudales correspondientes al instante inicial de las hidrógrafas de caudales definidas en las fronteras del modelo.

6.2.2. Simulación

Una vez introducida la información esquematizada o discreta de toda el área a analizar en el modelo matemático FLO-2D se debe dar inicio al proceso de calibración y verificación del modelo con base en la información disponible de caudales, niveles, áreas inundables y registros históricos. Igualmente, se realiza el análisis de sensibilidad con el fin de investigar la influencia de los principales parámetros numéricos y físicos en el comportamiento hidrodinámico de los cauces y canales de la zona de estudio del municipio de La Unión.

6.2.2.1. Calibración

Generalidades

La calibración de un modelo consiste en el proceso de ajuste de los elementos geométricos simplificados (batimetría, contornos de estructuras, etc.) y de los valores de los coeficientes empíricos (hidráulicos, de transporte, de sedimentos, etc.) que aparecen en las diferentes ecuaciones (hidrodinámicas, de los sedimentos, etc.), de tal manera que los eventos simulados en el modelo reproduzcan de la mejor manera posible los eventos de la naturaleza.

Generalmente los resultados del modelo al inicio del proceso de calibración difieren en mayor o menor grado de los valores medidos en la naturaleza. El objetivo fundamental de la calibración es, por lo tanto, afinar el modelo de tal manera que las diferencias entre los valores calculados en la simulación y los valores medidos en la naturaleza sea mínima o despreciable. Este ajuste debe realizarse siempre teniendo en cuenta las características físicas de los diferentes parámetros y variables involucradas en los procesos hidrodinámicos y sedimentológicos en los cauces, de tal manera que los mismos (parámetros y variables) deben encontrarse dentro de rangos característicos de los cauces como de la zona de estudio (rangos físicamente válidos).

El potencial de un modelo para reproducir y predecir los eventos reales (flujos, sedimentación, erosión, etc.) y la calidad potencial de su calibración dependerá de la calidad y cantidad de los datos topográficos, topológicos, hidráulicos y sedimentológicos disponibles para el sistema en estudio (Cunge y otros, 1980).

Parámetros susceptibles de ajuste en el modelo matemático FLO-2D

El proceso de ajuste se debe iniciar por los parámetros que más afectan los resultados del modelo. Para identificar estos parámetros, el análisis de sensibilidad puede ser de gran ayuda.

Los siguientes son los parámetros usualmente susceptibles de ajuste en el modelo matemático FLO-2D:

- Batimetría (área de flujo de las secciones transversales)
- Topografía de la planicie
- Rugosidad del lecho y de la planicie
- Factor de variación en la vertical de la rugosidad del lecho y la planicie
- Limitación del número de Froude
- Intervalo de tiempo, Δt

Es importante mencionar que la información con la cual se cuenta para realizar la calibración es muy limitada; únicamente se tienen, con base en los registros de eventos históricos de inundaciones, la delimitación aproximada de las zonas del casco urbano y de expansión urbana del municipio de La Unión en donde se han presentado estos eventos. Por lo tanto, la calibración del modelo se debe realizar con base en el área inundada, asumiendo que dicha área fue afectada por inundaciones correspondientes al periodo de retorno de 100 años.

6.2.2.2. Verificación del modelo

La verificación del modelo consiste en efectuar una o más simulaciones hidrodinámicas para otras condiciones de niveles y caudales diferentes a las empleadas durante el proceso de calibración. Para ello se deberá disponer de la información de campo suficiente (para el modelo hidrodinámico son los niveles de agua, las velocidades de la corriente y los caudales) en las secciones de control preestablecidas. Los resultados del modelo para estas nuevas condiciones se compararían con los datos de campo disponibles en las secciones o estaciones de control. Si se obtiene un buen ajuste, se considera que el modelo ha sido verificado. En caso contrario, se deberá revisar el proceso de calibración y realizar los ajustes correspondientes al modelo (p.e. revisar los factores de rugosidad, niveles batimétricos, condiciones de frontera, etc.).

En el caso particular del modelo matemático de la zona de estudio del municipio de La Unión no se dispone de información de campo suficiente para poder realizar una verificación adecuada del modelo. Únicamente se cuenta con las hidrógrafas de caudales en los cauces modelados, correspondientes a los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.

Debido a esta limitación el modelo debe ajustarse lo mejor posible una vez terminada la calibración, de acuerdo con los mapas de registros de eventos históricos de inundaciones existentes en la zona de estudio.

6.2.2.3. Análisis de sensibilidad

Generalidades

Un análisis de sensibilidad permite evaluar la influencia de un determinado parámetro físico o numérico en los resultados de la simulación de un proceso en un sistema; es decir, permite investigar la respuesta del sistema cuando un parámetro dado es modificado. De esta manera es posible establecer los parámetros más sensibles o influyentes en el proceso de simulación, por cuanto pequeñas variaciones en ellos originan grandes cambios en la hidrodinámica del sistema, en algún sector o en toda el área de estudio. Este proceso puede realizarse manualmente o usando programas elaborados con este propósito.

El análisis de sensibilidad suministra información valiosa para diferentes fines:

- Precisión requerida para los datos de entrada del modelo, las condiciones iniciales y otros parámetros como la rugosidad
- Establecer los parámetros que ejercen mayor influencia sobre las respuestas del modelo
- Calibración del modelo
- Diseño y ejecución de nuevos programas de campo, haciendo énfasis en las variables que mayor influencia ejercen en los procesos hidrodinámicos y sedimentológicos

Análisis de sensibilidad del modelo de la zona de estudio del municipio de La Unión

El análisis de sensibilidad del modelo matemático de la zona de estudio del municipio de La Unión se realizó variando de forma individual un número de factores asumidos independientemente para el fenómeno de inundaciones. Se evaluó la influencia de cada uno de los parámetros en la hidrodinámica del río, esto es, en la variación de las profundidades, los caudales y las velocidades de flujo. Esto se realizó con el fin de estimar las posibles variaciones que se generan en los resultados del modelo al modificar cada parámetro. La comparación de resultados se realizó en dos secciones transversales de la quebrada La Unión en su paso por la zona urbana, en las secciones 7 y 30, con abscisas $K0 + 814.06$ y $K2 + 883.20$, respectivamente, y en dos secciones de la quebrada El Rincón (secciones 4 y 13, con abscisas $K0 + 781.018$ y $K2 + 778.739$, respectivamente). Estas secciones fueron seleccionadas ya que representan sitios de interés en el modelo. Finalmente, y como parte del proceso de calibración del modelo, se escogieron los valores de los parámetros que al ser implementados en el modelo matemático de la zona de estudio arrojan los resultados de las áreas inundadas que se asemejan más a las áreas inundadas registradas en el mapa de eventos históricos para el fenómeno de inundaciones.

Para el análisis de la influencia en las quebradas La Unión y El Rincón de cada uno de los parámetros físicos y numéricos se realizaron diferentes simulaciones numéricas, variando en cada una de ellas solamente el valor del parámetro en consideración dentro de un rango relativamente amplio, así:

- Rugosidad del lecho de las quebradas La Unión y El Rincón: los valores de rugosidad de Manning se variaron desde 0.055 hasta $0.070 \text{ s/m}^{1/3}$. Finalmente, el valor adoptado de la rugosidad para ambos cauces fue de $0.070 \text{ s/m}^{1/3}$, al igual que para el zanjón los Muertos.
- Rugosidad de las planicies de inundación: para establecer la influencia de la rugosidad de la planicie de inundación sobre las características hidrodinámicas del flujo en la misma se realizaron dos simulaciones diferentes. En la primera se adoptó una rugosidad constante en la vertical, la cual se calculó de acuerdo con la metodología presentada en la Sección 5.4 para una profundidad de flujo de 0.15 m (los valores ingresados al modelo se presentan en la Tabla 6.1). La segunda simulación se efectuó considerando una rugosidad variable en la vertical de acuerdo con la metodología del modelo FLO-2D (ver Sección 6.1.8). Las rugosidades introducidas en todas las celdas de la malla corresponden a las calculadas para una profundidad del flujo de 1 m en la planicie (ver Sección 6.4 y Tabla 6.1); para una profundidad de 0.06 m se adoptó una rugosidad de $0.2 \text{ s/m}^{1/3}$. El análisis de los resultados obtenidos mediante estas dos simulaciones permitió adoptar finalmente la segunda alternativa, es decir, considerando en la planicie de inundación una rugosidad variable en la profundidad, puesto que de esta forma se reproducen mejor las áreas inundadas históricamente.
- Factor de variación en la profundidad de la rugosidad del lecho de los cauces: al igual que la rugosidad de las llanuras, ésta también puede ser variada en los canales respecto a la profundidad de flujo (de acuerdo con la metodología del modelo matemático FLO-2D, ver Sección 6.1.8). Este factor (factor r2) fue variado desde 0 hasta 0.4, adoptándose en la simulación, finalmente, un valor de 0.4 puesto que las áreas inundadas estimadas se asemejan más a las áreas inundadas registradas en el mapa de eventos históricos.
- Limitación del número de Froude en la planicie: teniendo en cuenta la topografía relativamente plana de las planicies en el casco urbano del municipio de La Unión se utilizó la herramienta del modelo FLO-2D que permite limitar el número de Froude en la planicie de inundación ($Fr_{\text{máx}} = 0.99$), ya que las velocidades en ella resultan muy bajas, presentándose siempre un régimen subcrítico. Durante las primeras simulaciones se observaba alguna inestabilidad numérica en algunos sectores de la planicie de inundación. Al implementar esta herramienta se eliminaron las oscilaciones originadas por la inestabilidad numérica.
- Limitación del número de Froude en los canales: considerando que varios de los cauces que atraviesan el municipio de La Unión presentan pendientes relativamente altas y que durante las crecientes se incrementan de manera considerable los caudales y, en especial, las velocidades del flujo, se pueden presentar flujos supercríticos en diferentes sectores de los cauces. Por esta razón no se adoptó la opción disponible en el modelo FLO-2D que permite limitar el número de Froude en los canales. No obstante, y sólo para

propósitos de comparación se realizó una simulación implementando esta opción. Los resultados arrojados son muy similares, lo cual indica que en los sectores donde se realizó la comparación de resultados el flujo es subcrítico.

- Intervalo de tiempo, Δt : este parámetro se redujo gradualmente hasta encontrar que las diferencias en las profundidades, los caudales y las velocidades del flujo calculadas para dos simulaciones consecutivas fueran despreciables. El intervalo de tiempo, Δt , fue variado desde 0.1 horas hasta 0.005 horas. De acuerdo con los resultados obtenidos, se seleccionó un intervalo de tiempo de 0.01 horas, es decir, 36 segundos, el cual permite reproducir de manera bastante aproximada las áreas inundadas históricamente. Cuando se utilizan intervalos de tiempo menores a 36 segundos no se mejora la precisión de los resultados pero sí se incrementa de manera apreciable el tiempo computacional.

Como se indicó previamente, el modelo matemático FLO-2D está basado en la conservación del volumen, siendo ésta una de las características más importantes de este modelo. El error máximo permisible en la conservación del volumen para considerar una simulación numérica confiable es de 0.001% del volumen total de las hidrógrafas de entrada. Durante el proceso de calibración del modelo se prestó especial atención para cumplir este requerimiento; para ello fue necesario en ocasiones realizar numerosas simulaciones variando algunos parámetros numéricos del modelo hasta satisfacer la conservación del volumen.

En las Figuras 6.4 a 6.63 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad efectuado considerando los diferentes parámetros numéricos y físicos del modelo, como se detalló previamente, en distintos sectores de las quebradas La Unión y El Rincón.

6.2.2.4. Resultados

Una vez definidos los valores de los diferentes parámetros mediante los procesos de análisis de sensibilidad y calibración, se procedió a realizar las simulaciones para la determinación de las áreas potencialmente inundables y los niveles de amenaza para los escenarios correspondientes a los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años para el fenómeno de inundaciones.

En las Figuras 6.64 a 6.87 se presentan los resultados de los parámetros hidrodinámicos (niveles, velocidades y caudales) en distintos sectores de la quebrada La Unión (secciones 7, 11 y 30, con abscisas $K0 + 814.06$, $K1 + 264.54$ y $K2 + 883.20$, respectivamente) y la quebrada El Rincón (secciones 4, 8 y 13, con abscisas $K0 + 781.02$, $K1 + 602.812$ y $K2 + 778.74$, respectivamente), para el fenómeno de inundaciones; también se presentan los resultados de los niveles máximos de flujo a lo largo de los cauces mencionados en la zona de estudio.

VARIACIÓN DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS CANALES

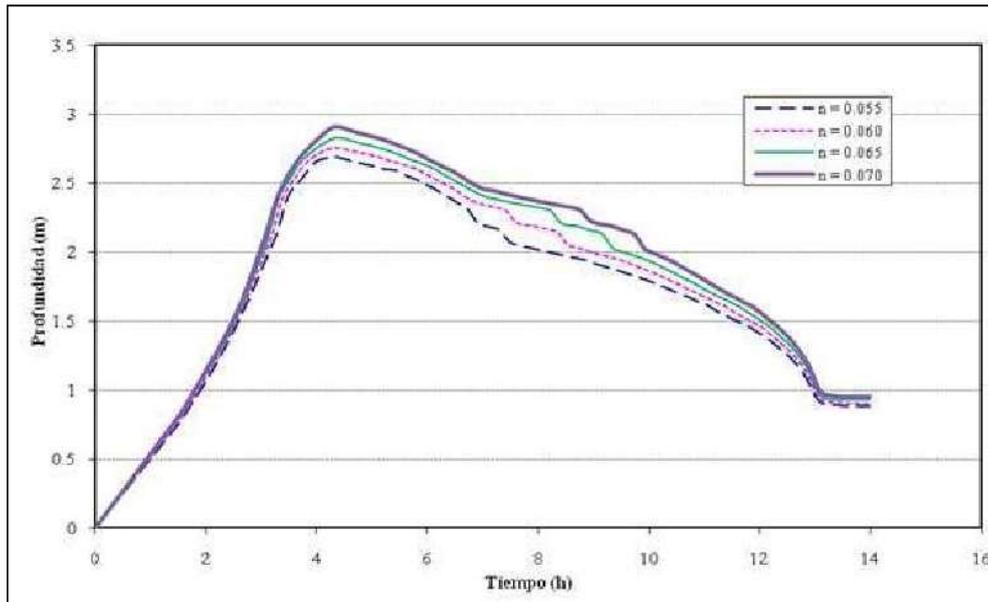


Figura 6.4 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la profundidad del flujo quebrada La Unión – Sección 7 – K0 + 814.06.

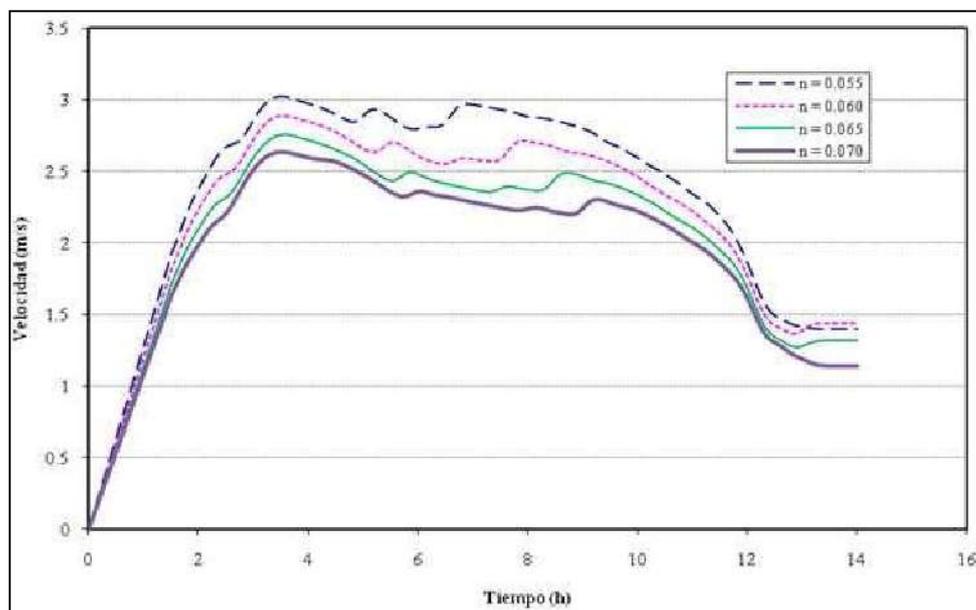


Figura 6.5 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la velocidad del flujo quebrada La Unión – Sección 7 – K0 + 814.06.

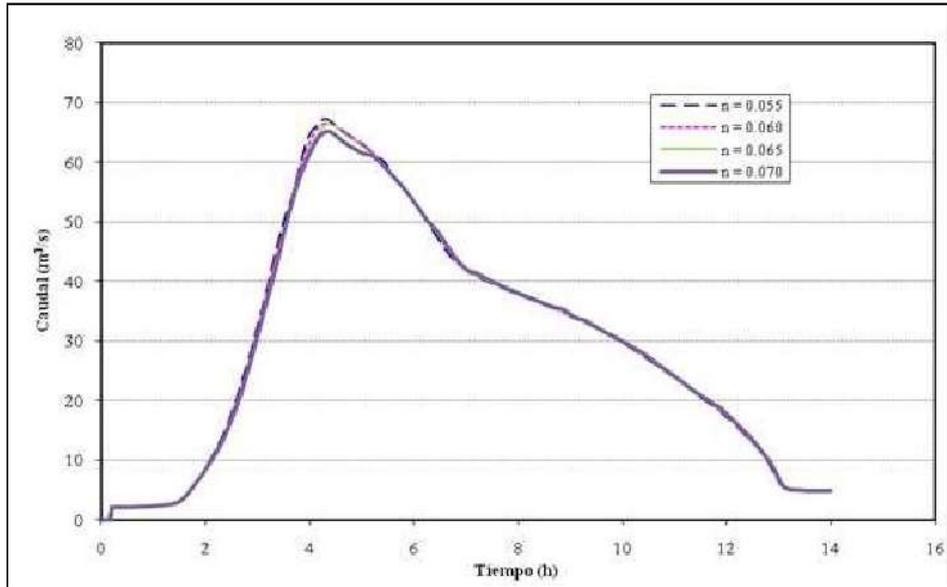


Figura 6.6 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del caudal en el canal quebrada La Unión – Sección 7 – K0 + 814.06.

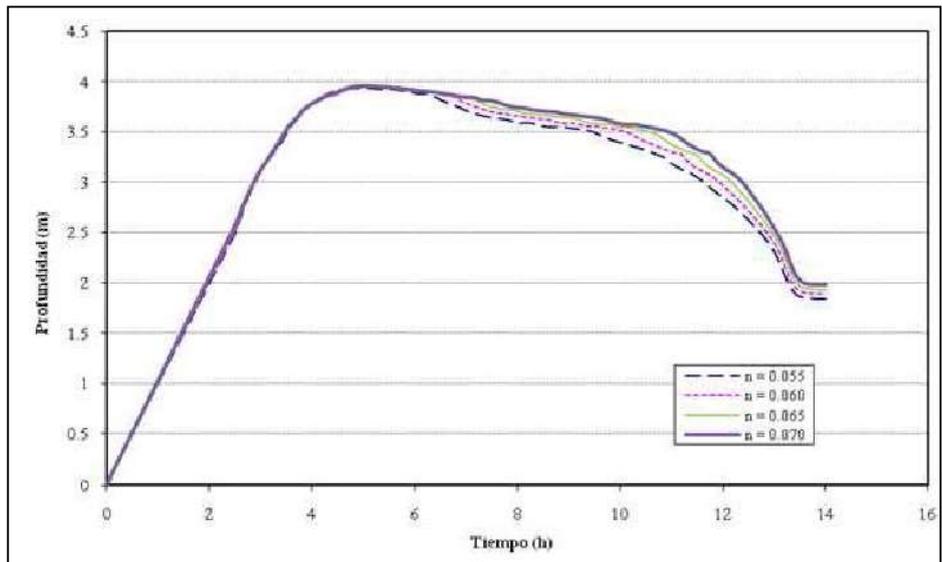


Figura 6.7 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la profundidad del flujo quebrada La Unión – Sección 30 – K2 + 883.20.

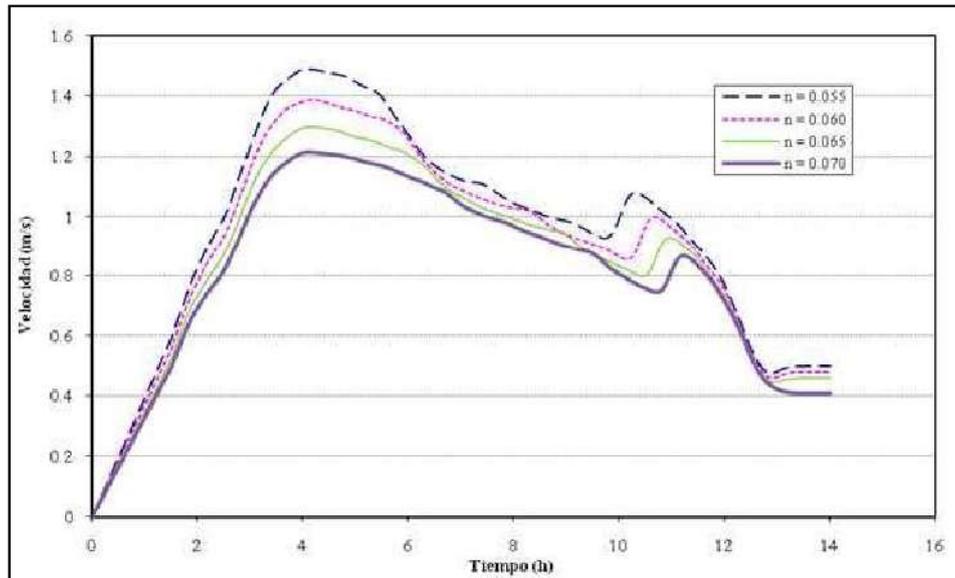


Figura 6.8 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la velocidad del flujo quebrada La Unión – Sección 30 – K2 + 883.20.

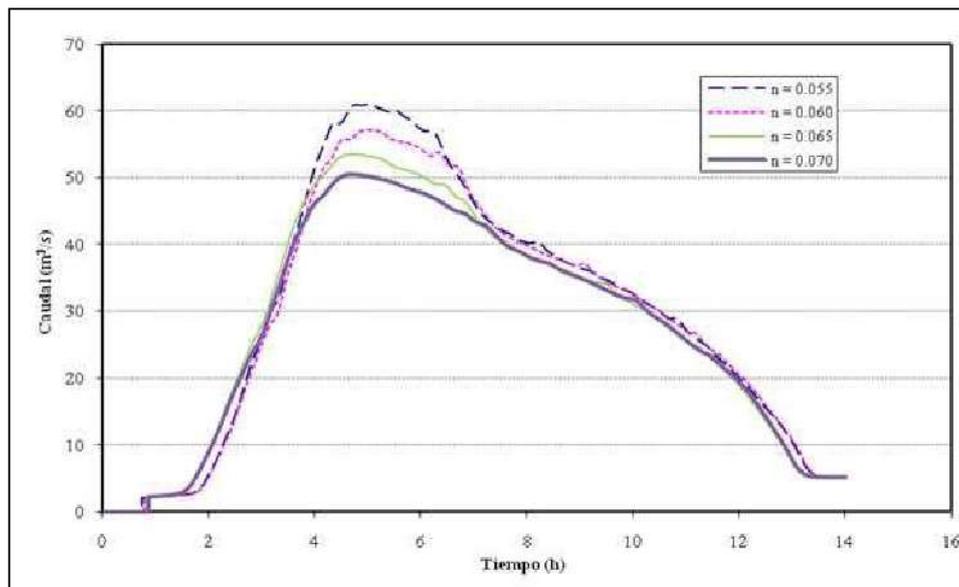


Figura 6.9 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en el caudal quebrada La Unión – Sección 30 – K2 + 883.20.

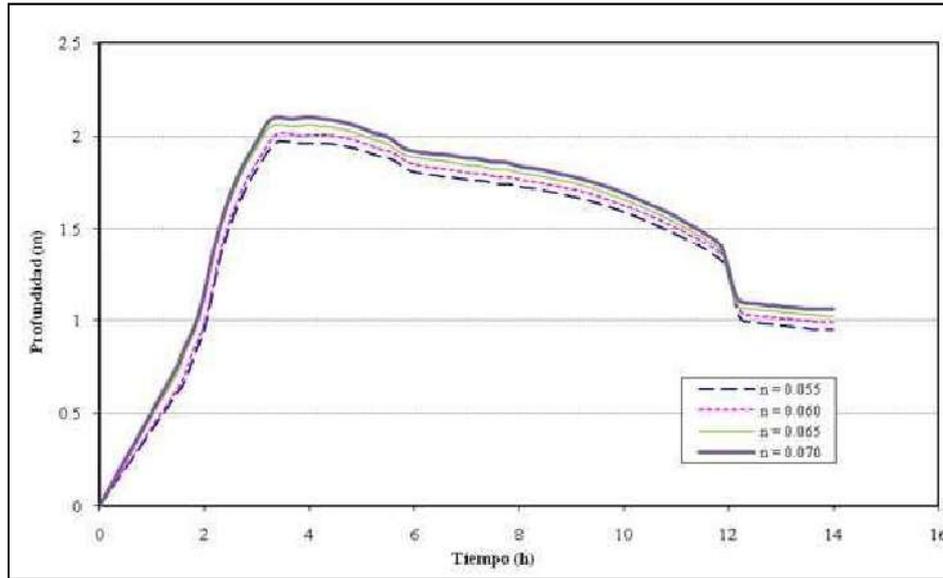


Figura 6.10 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 - K0 + 781.018.

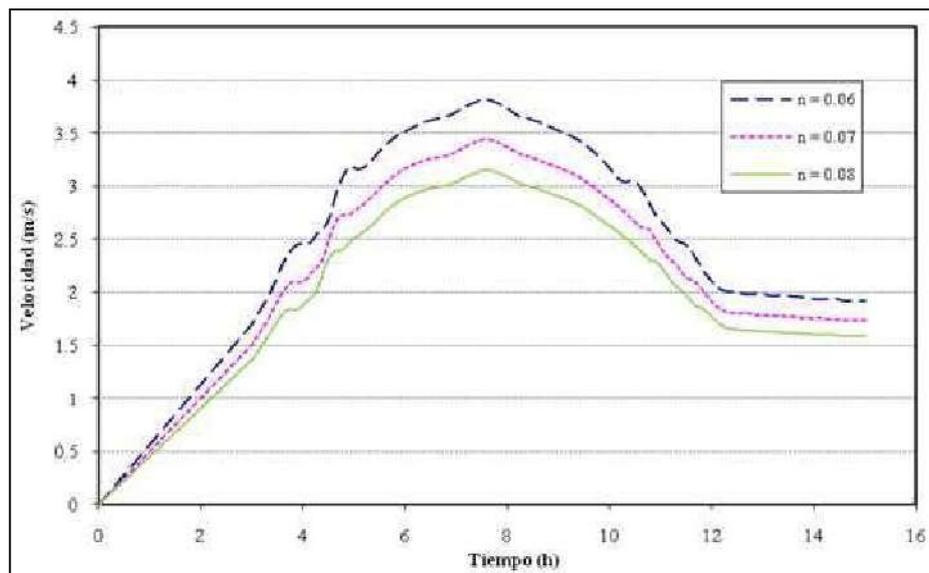


Figura 6.11 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 - K0 + 781.018.

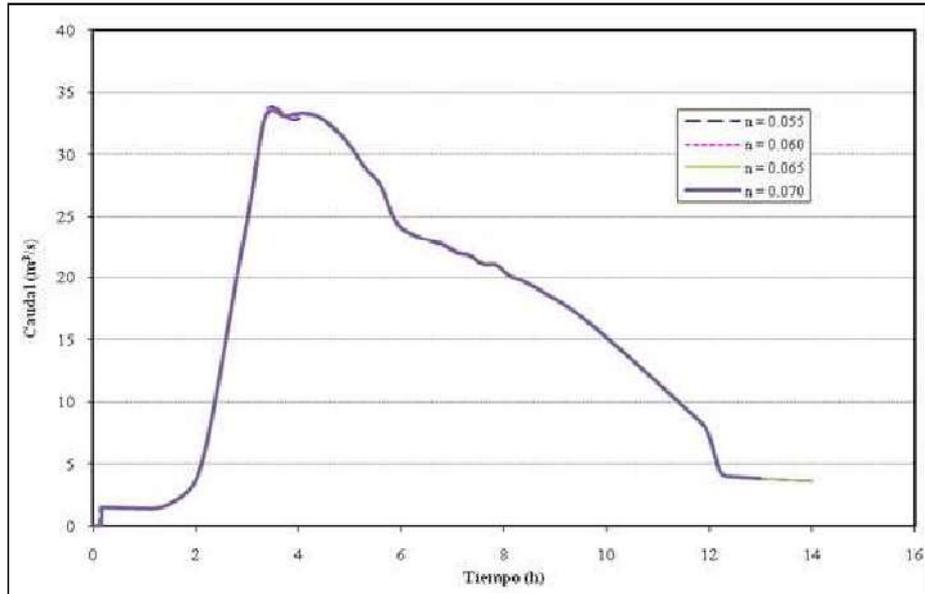


Figura 6.12 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en el caudal quebrada El Rincón – Sección 4 – K0 + 781.018.

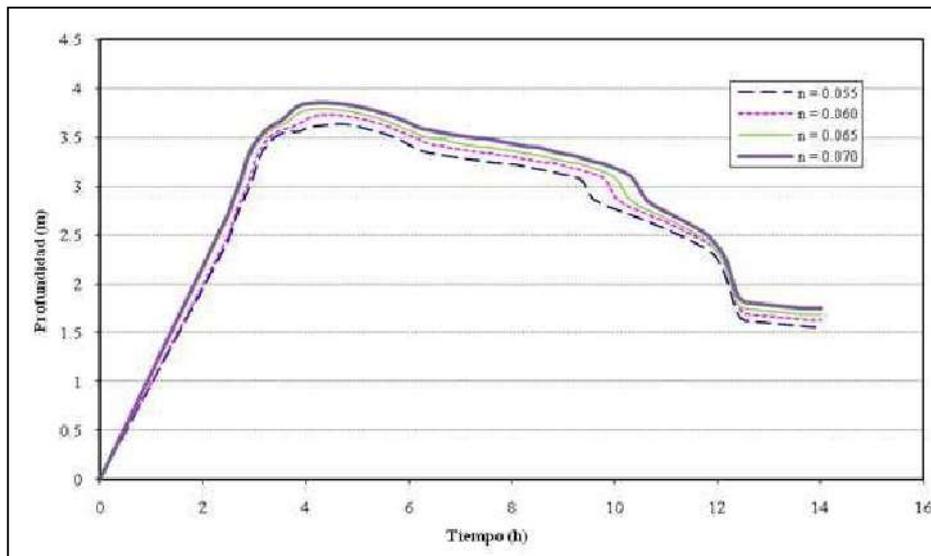


Figura 6.13 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la profundidad del flujo quebrada El Rincón – Sección 13 – K2 + 778.739.

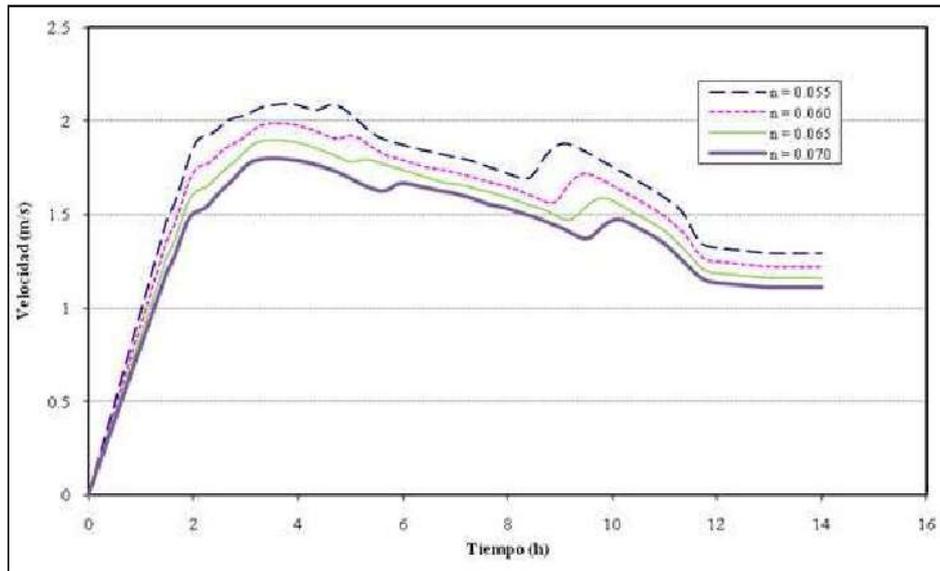


Figura 6.14 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en la velocidad del flujo quebrada El Rincón – Sección 13 – K0 + 397.66.

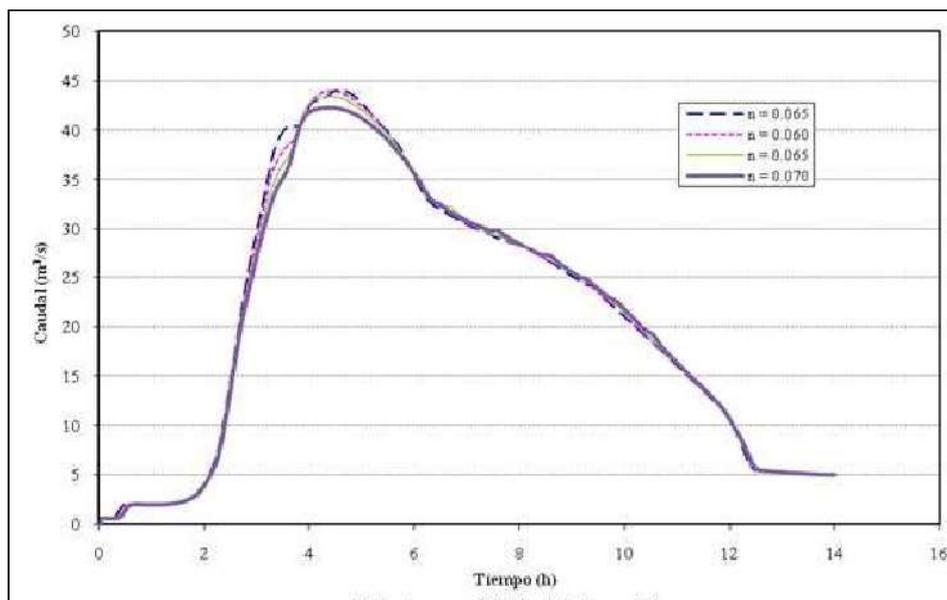


Figura 6.15 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la rugosidad de Manning del cauce en el caudal quebrada El Rincón – Sección 13 – K2 + 778.739.

VARIACIÓN EN LA VERTICAL DE LA RUGOSIDAD EN LA PLANICIE DE INUNDACIÓN

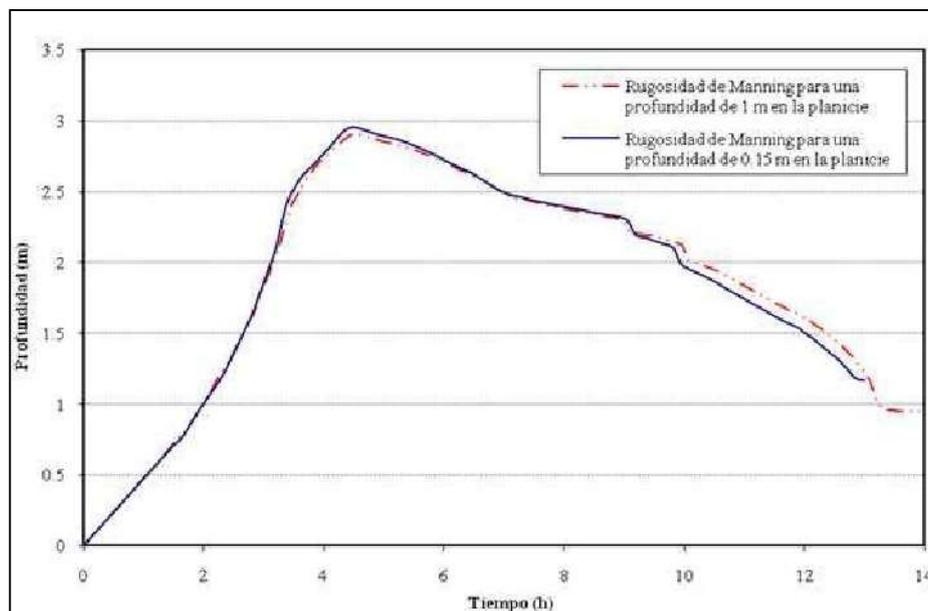


Figura 6.16 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 - K0 + 814.06.

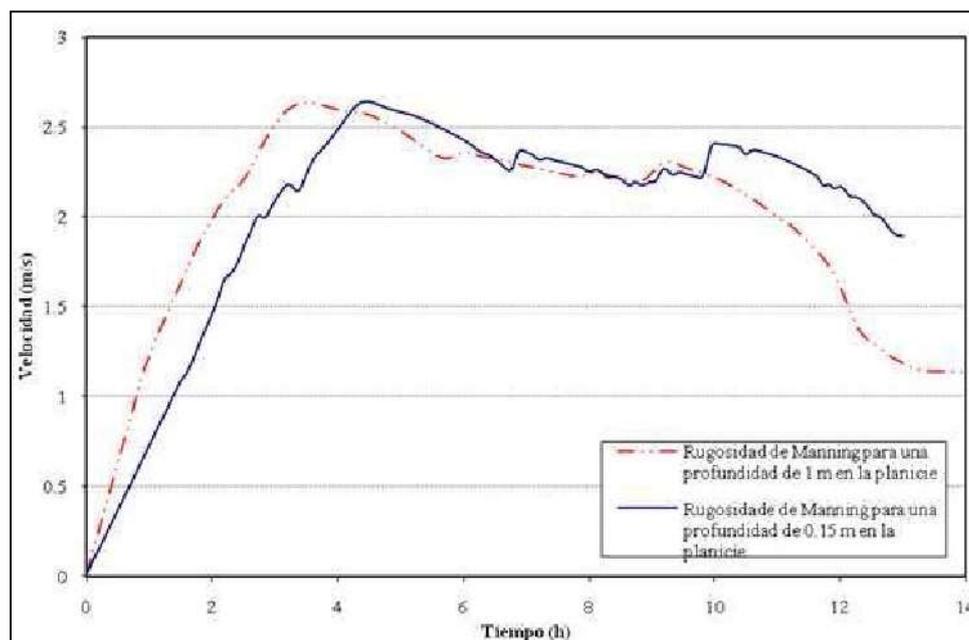


Figura 6.17 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 - K0 + 814.06.

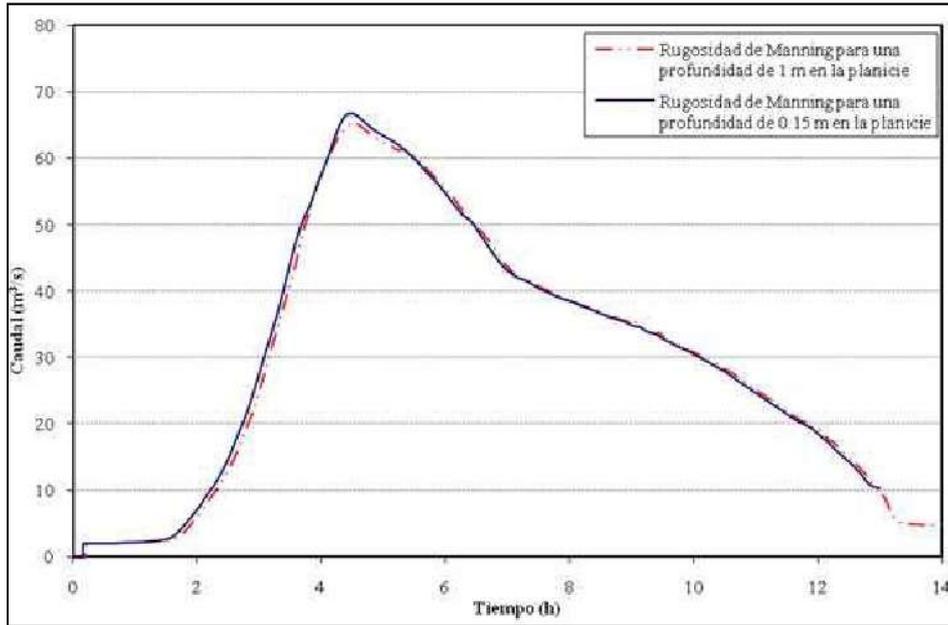


Figura 6.18 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en el caudal quebrada La Unión - Sección 7 – K0 + 814.06.

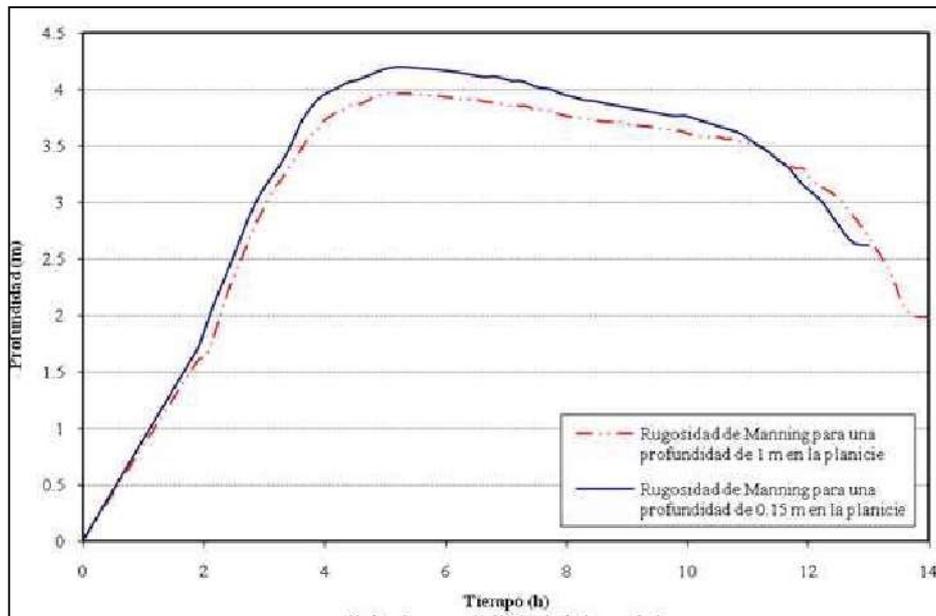


Figura 6.19 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2 + 883.2.

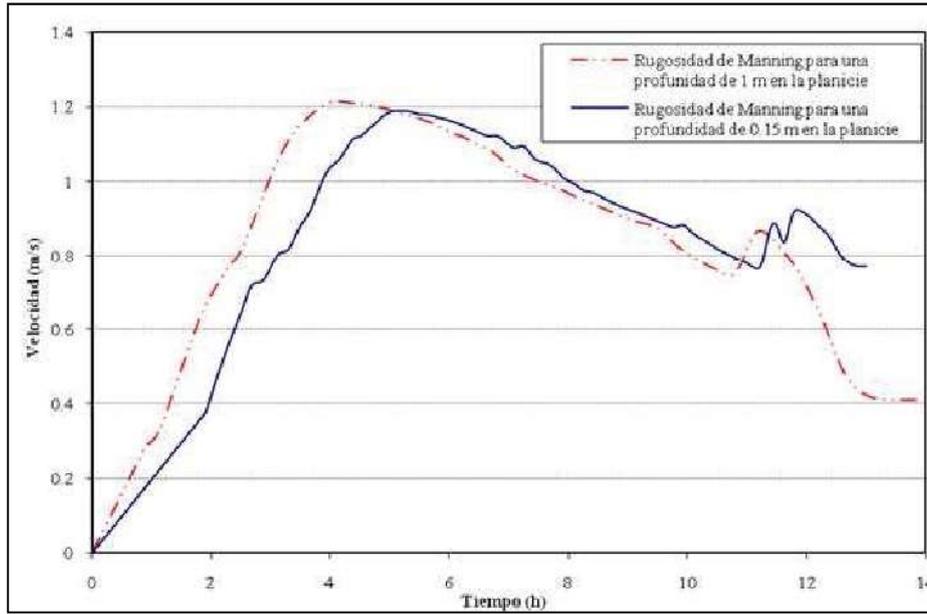


Figura 6.20 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 - K2 + 883.2.

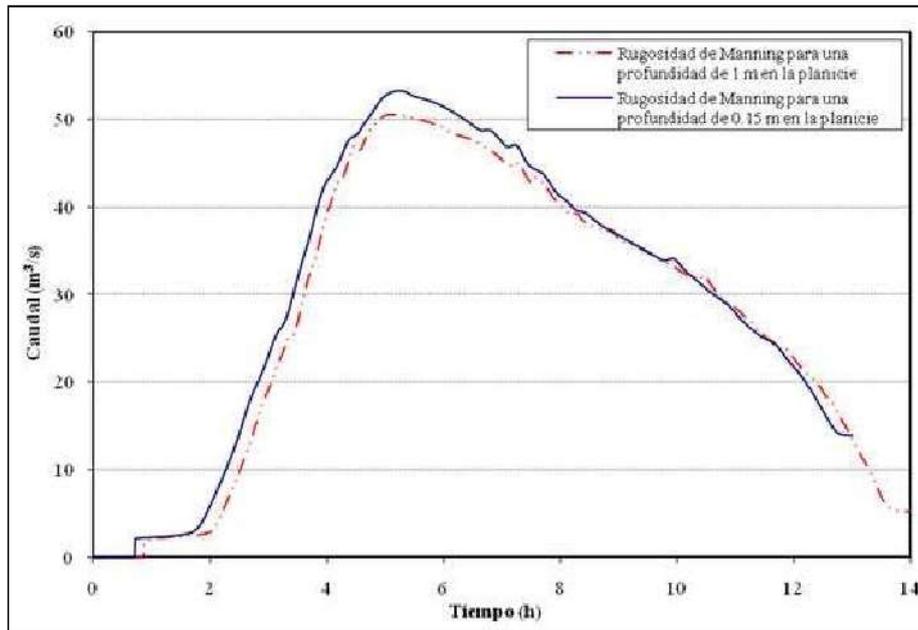


Figura 6.21 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en el caudal quebrada La Unión - Sección 30 - K2 + 883.2.

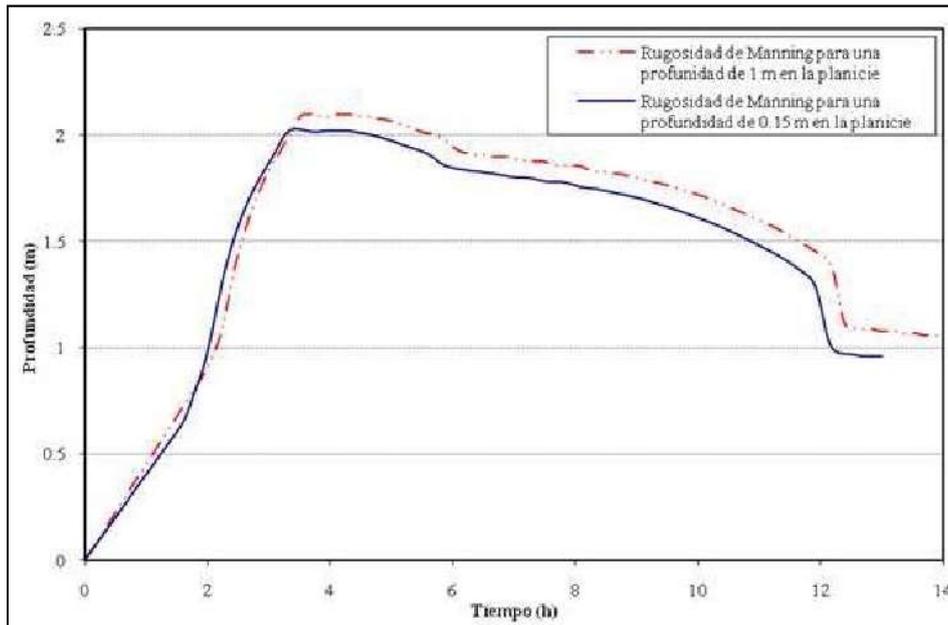


Figura 6.22 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0 + 781.018.

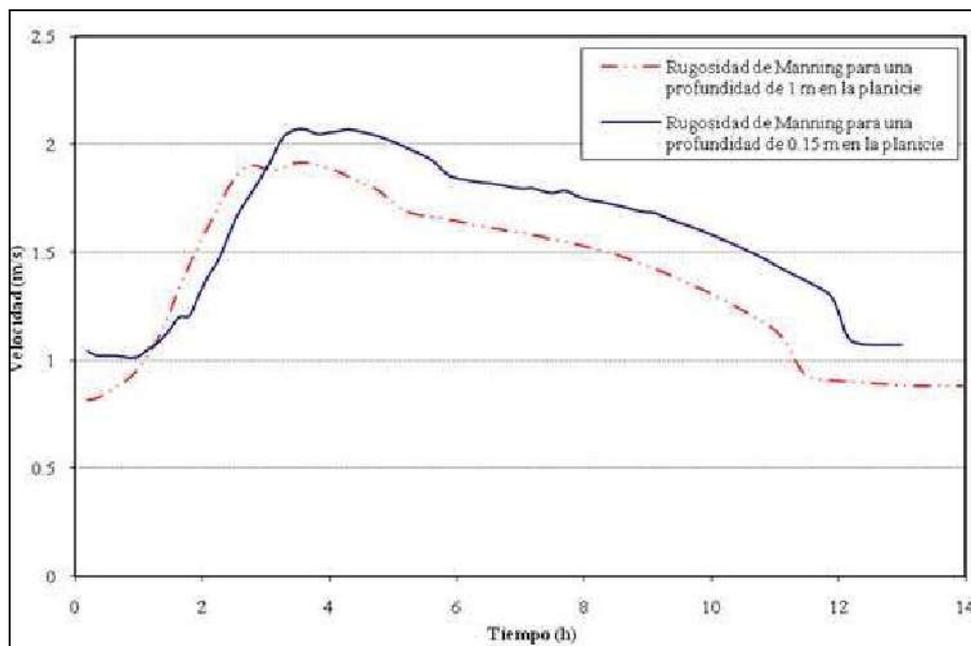


Figura 6.23 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0 + 781.018.

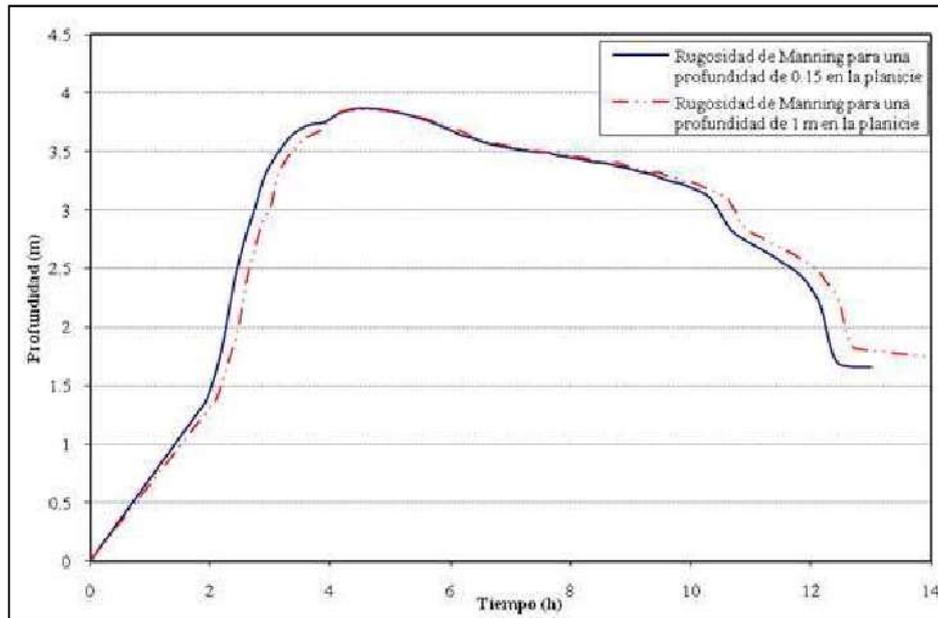


Figura 6.24 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 - K2 + 778.739.

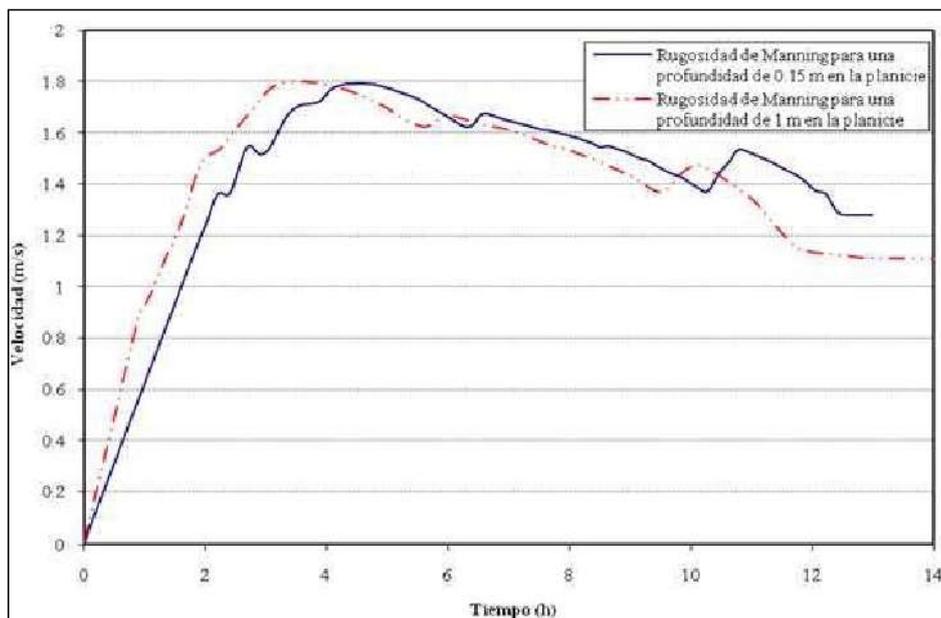


Figura 6.25 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 - K2 + 778.739.

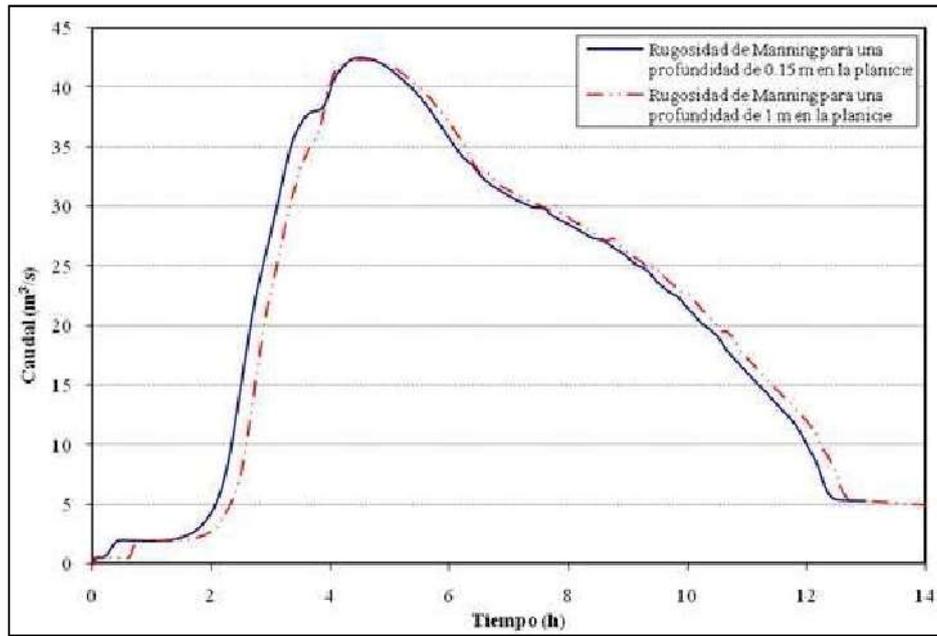


Figura 6.26 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de la planicie en el caudal quebrada El Rincón - Sección 13 - K2 + 778.739.

VARIACIÓN VERTICAL DE LA RUGOSIDAD DE MANNING DE LOS CANALES

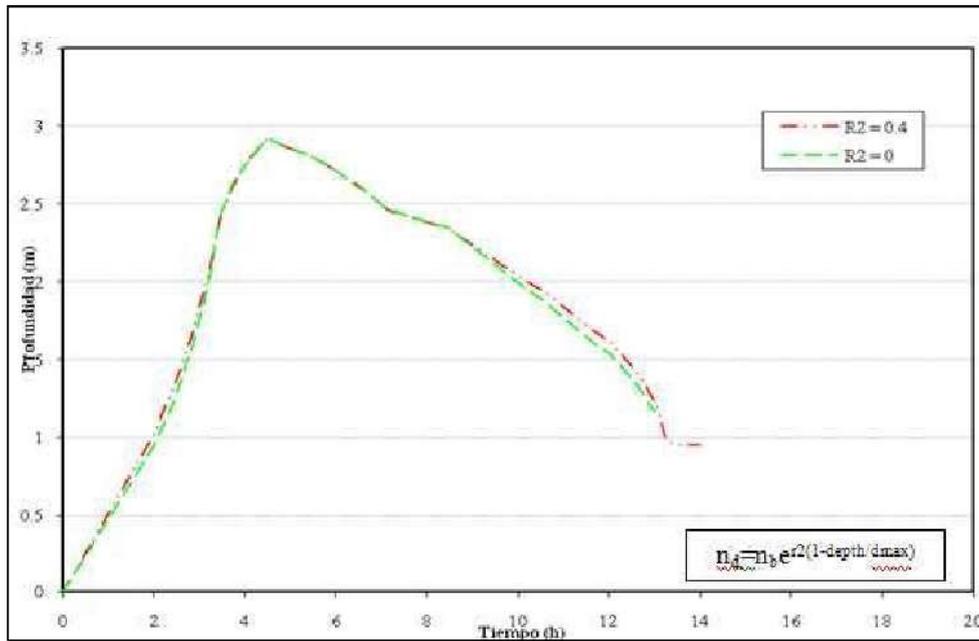


Figura 6.27 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 - K0+814.06.

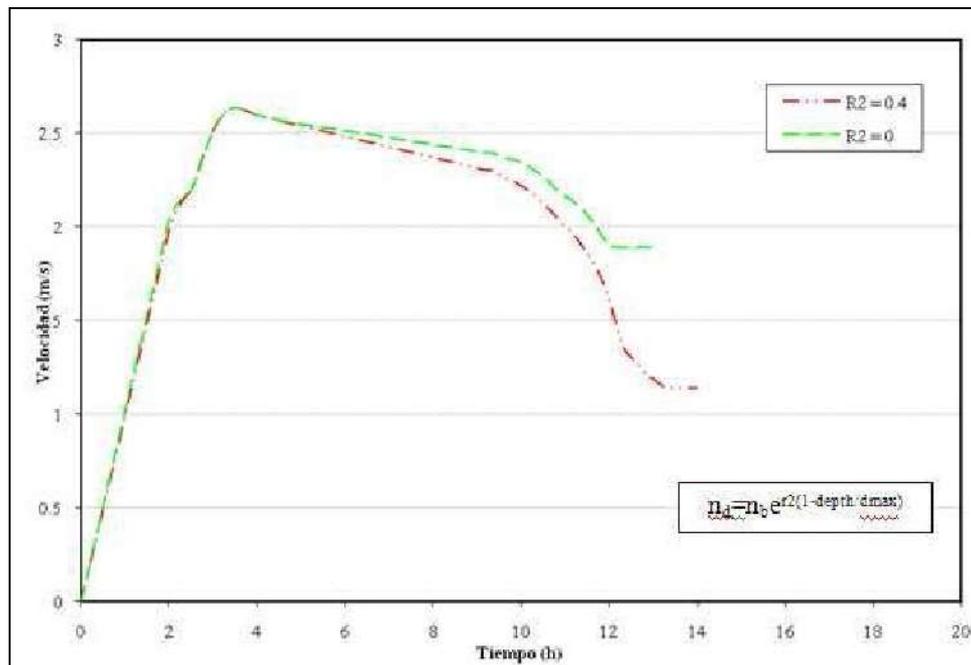


Figura 6.28 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 - K0+814.06.

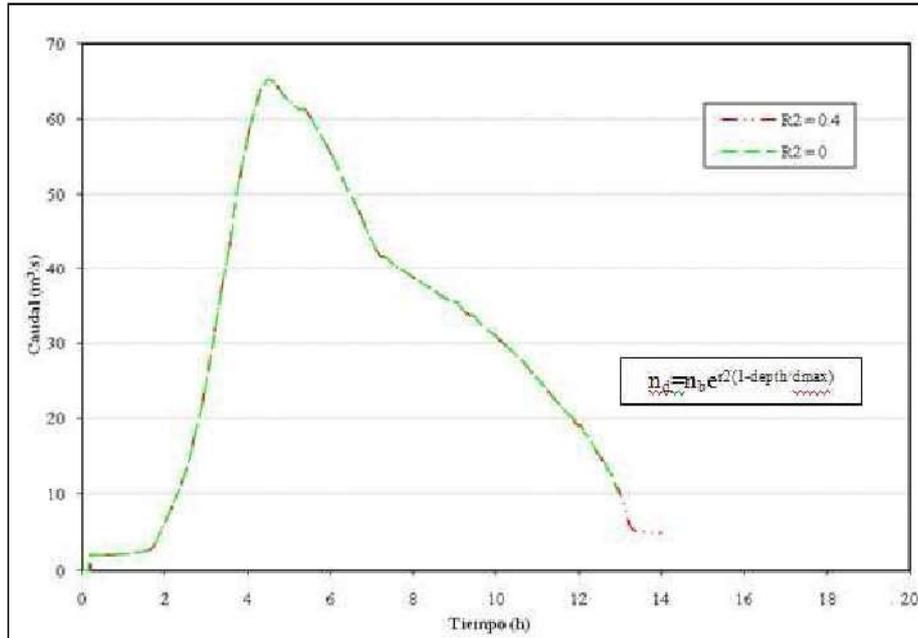


Figura 6.29 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en el caudal quebrada La Unión - Sección 7 – K0+814.06.

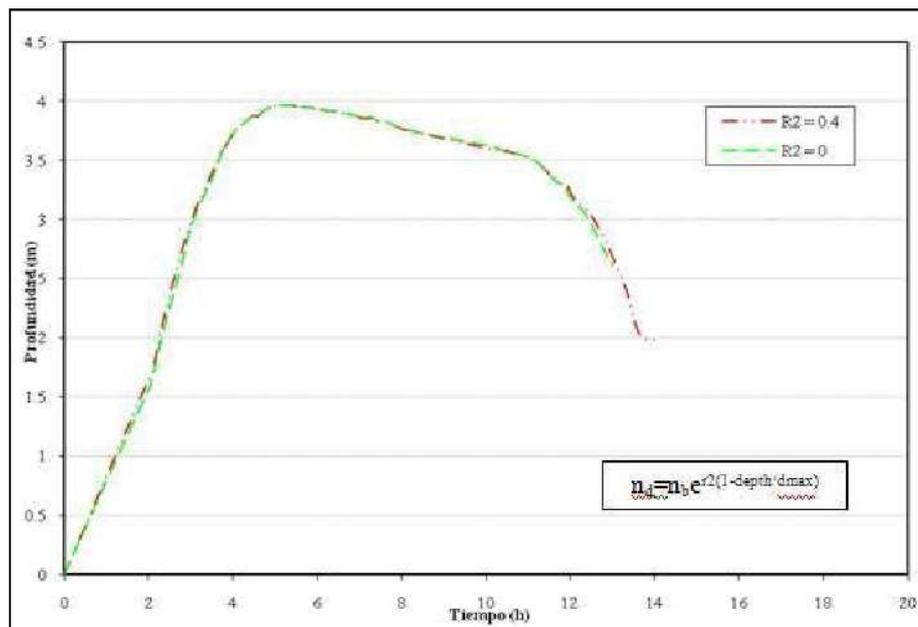


Figura 6.30 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2+883.20.

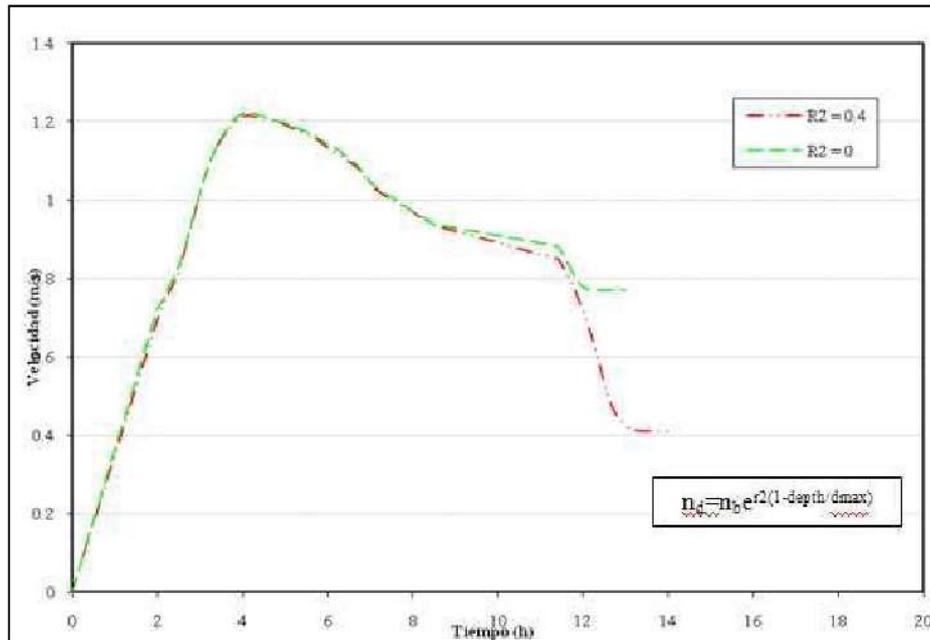


Figura 6.31 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 - K2+883.20.

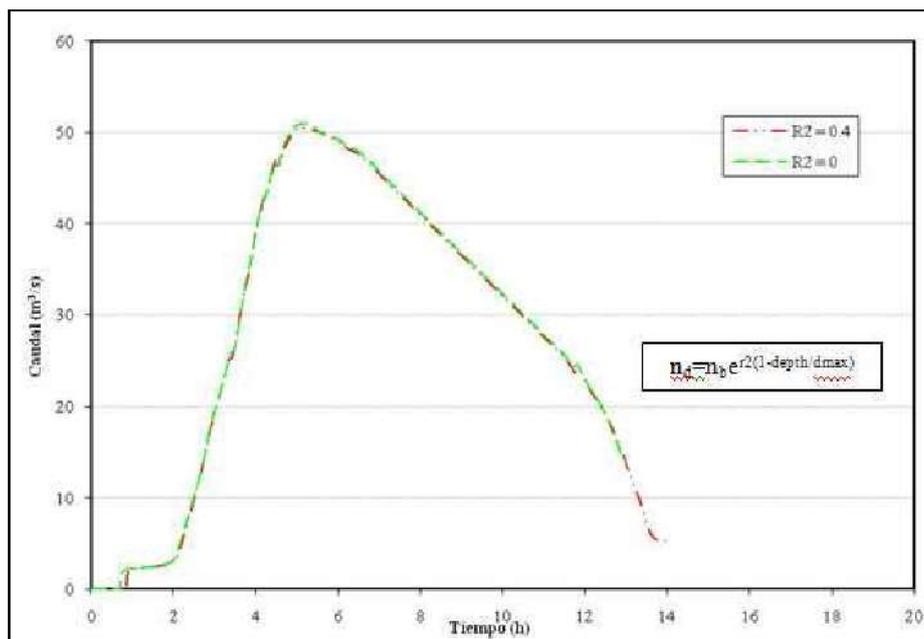


Figura 6.32 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en el caudal quebrada La Unión - Sección 30 - K2+883.20.

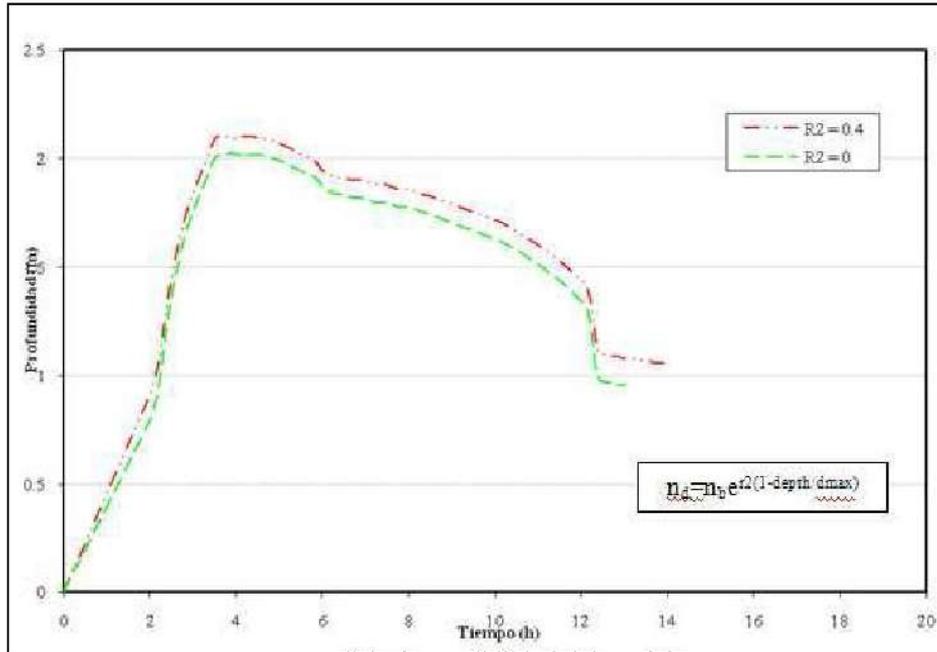


Figura 6.33 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0+781.018.

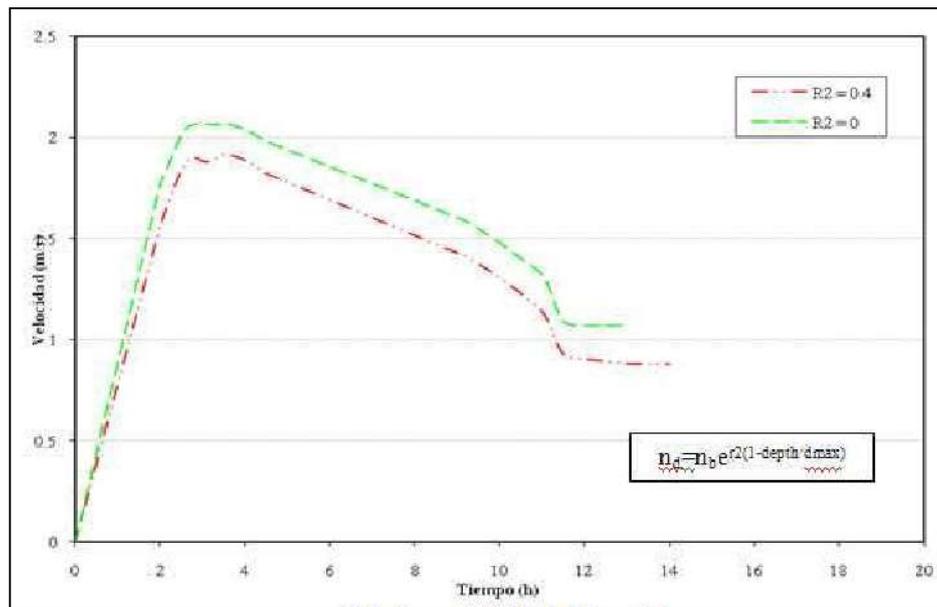


Figura 6.34 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0+781.018.

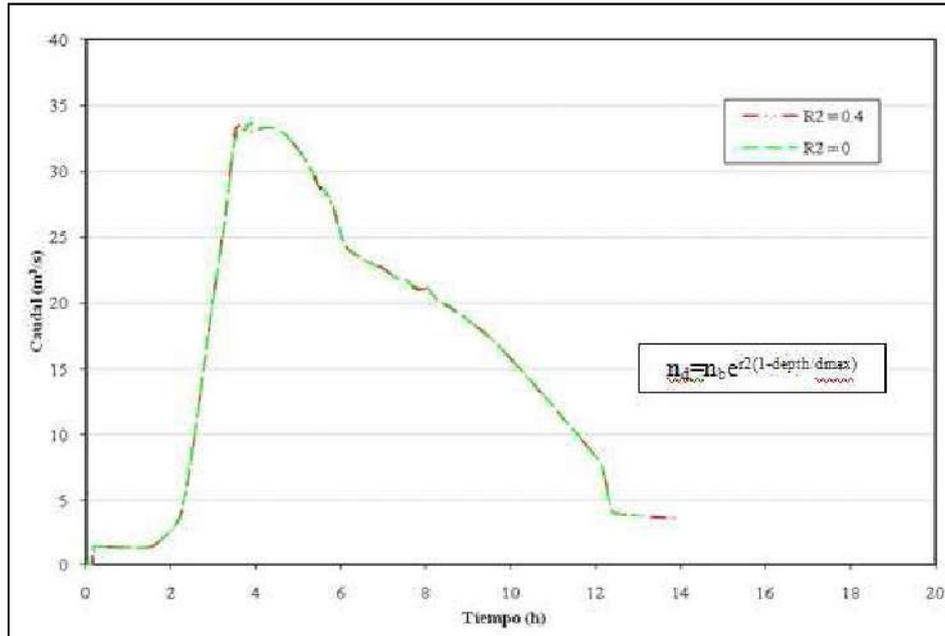


Figura 6.35 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en el caudal quebrada El Rincón - Sección 4 – K0+781.018.

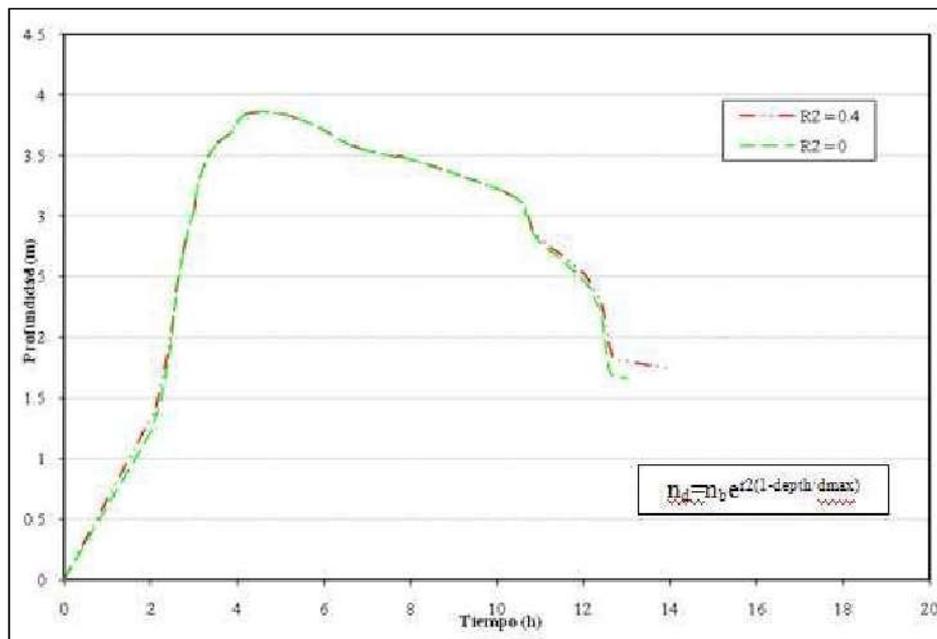


Figura 6.36 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 – K2+778.739.

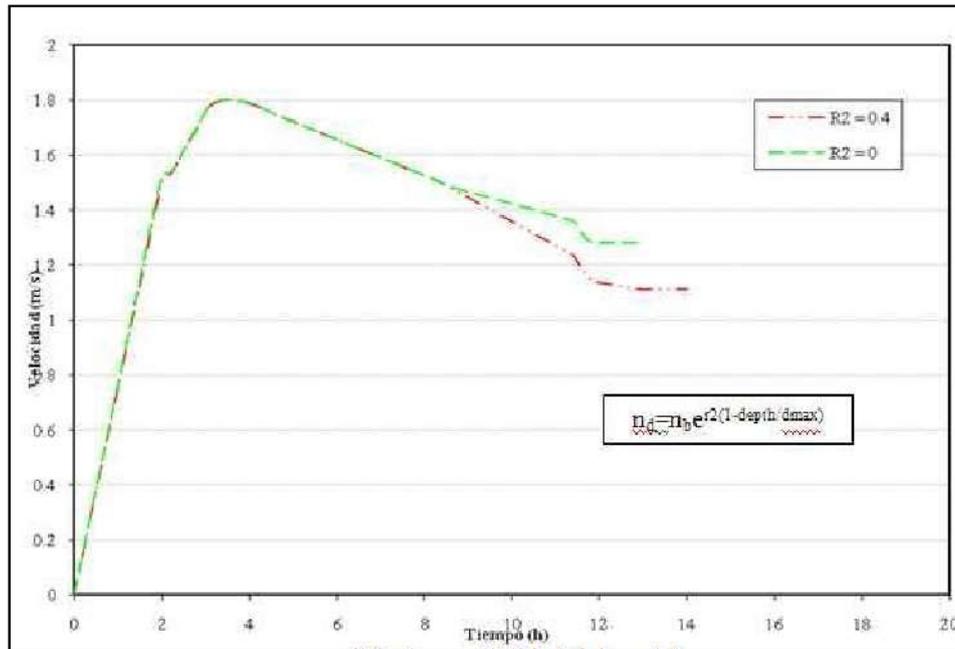


Figura 6.37 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 - K2+778.739.

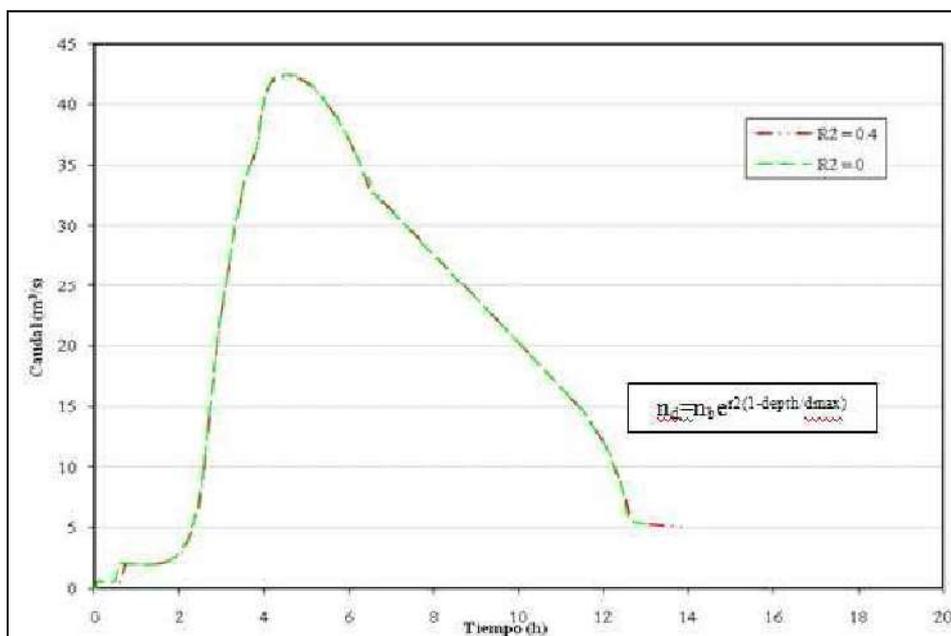


Figura 6.38 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la variación vertical de la rugosidad de los cauces en el caudal quebrada El Rincón - Sección 13 - K2+778.739.

VARIACIÓN DEL NÚMERO DE FROUDE EN LOS CANALES

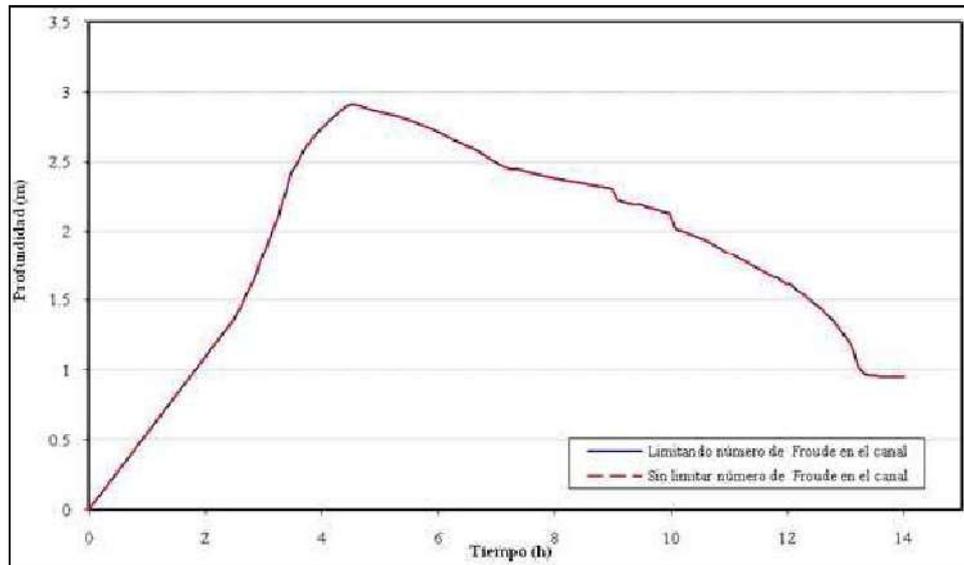


Figura 6.39 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 - K0+814.06.

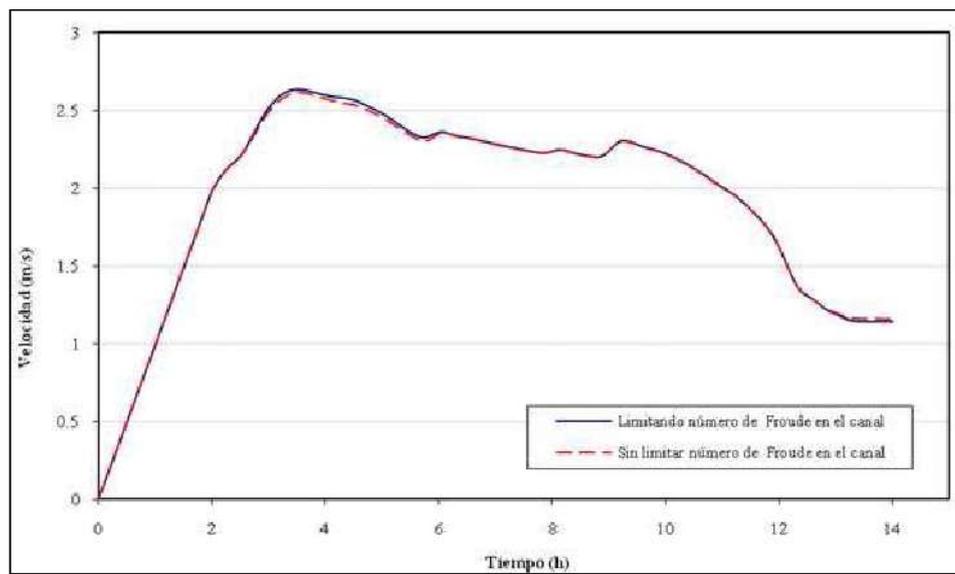


Figura 6.40 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la velocidad del flujo Quebrada La Unión - Sección 7 - K0+814.06.

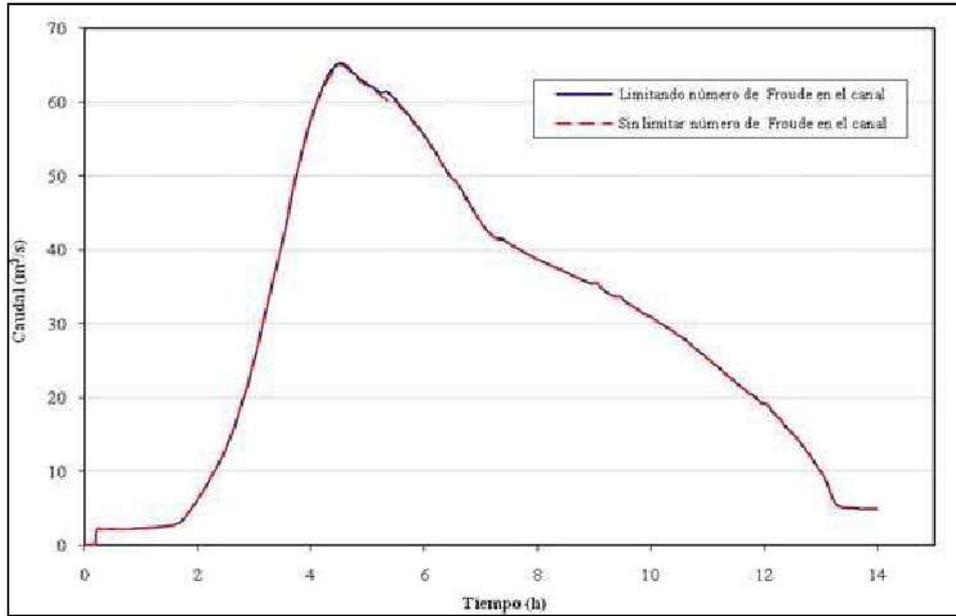


Figura 6.41 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en el caudal quebrada La Unión - Sección 7 – K0+814.06.

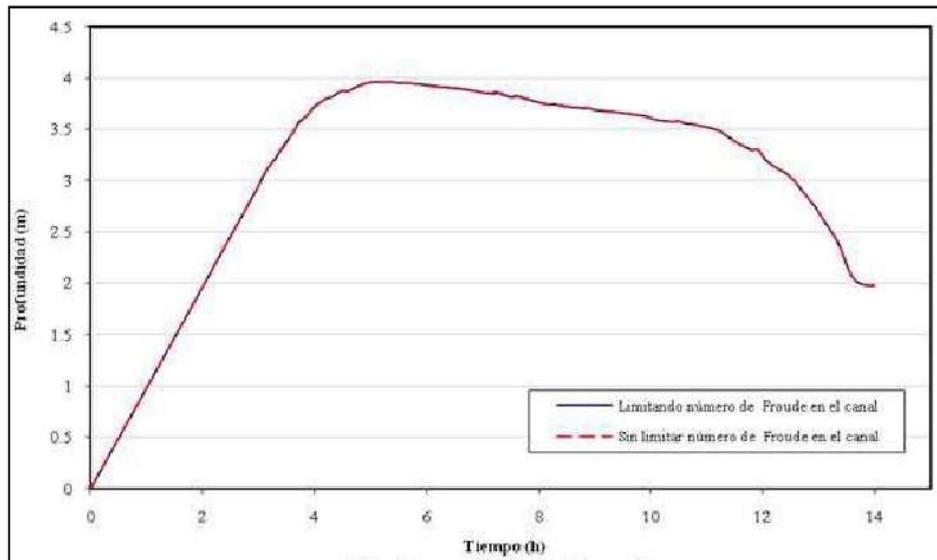


Figura 6.42 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2+883.20.

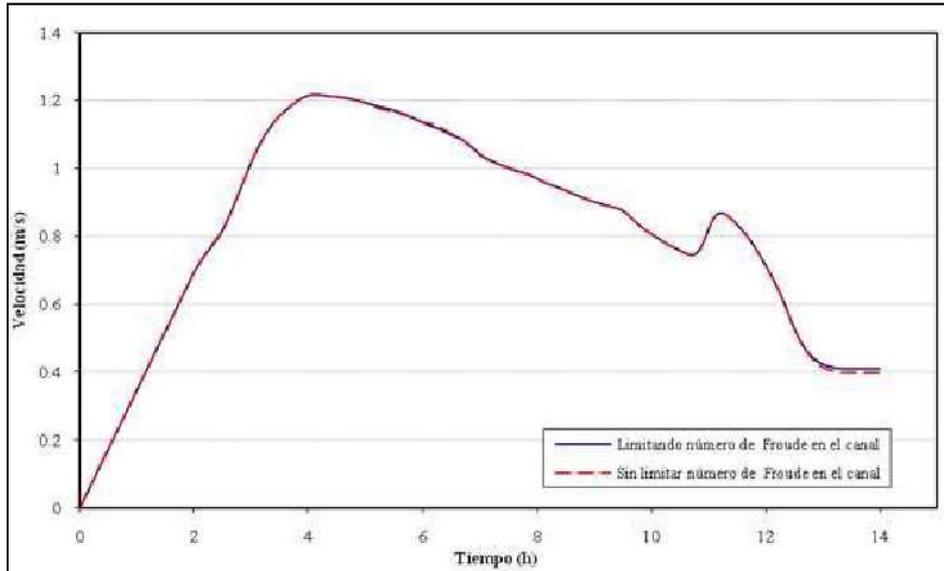


Figura 6.43 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2+883.20.

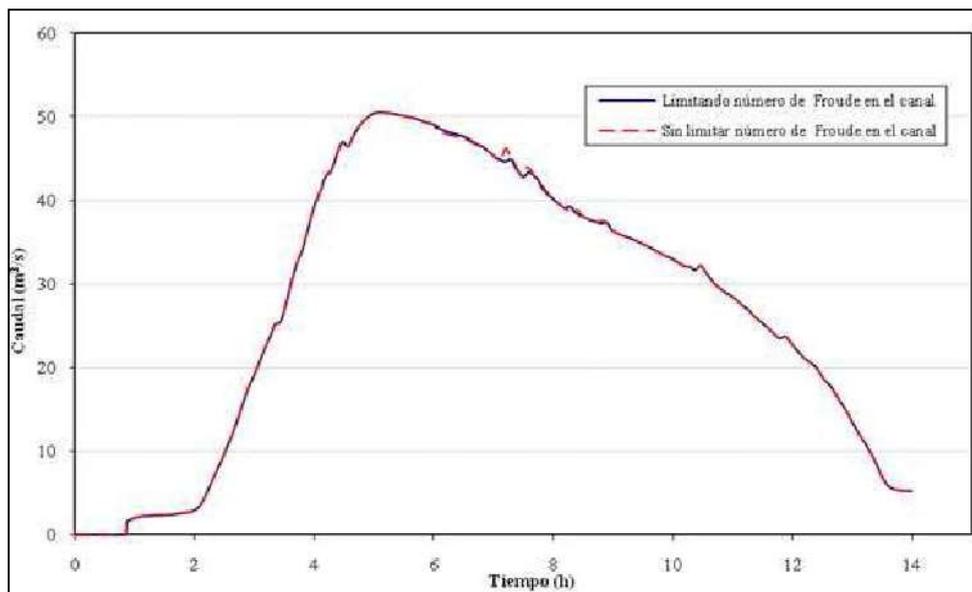


Figura 6.44 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en el caudal quebrada La Unión - Sección 30 – K2+883.20.

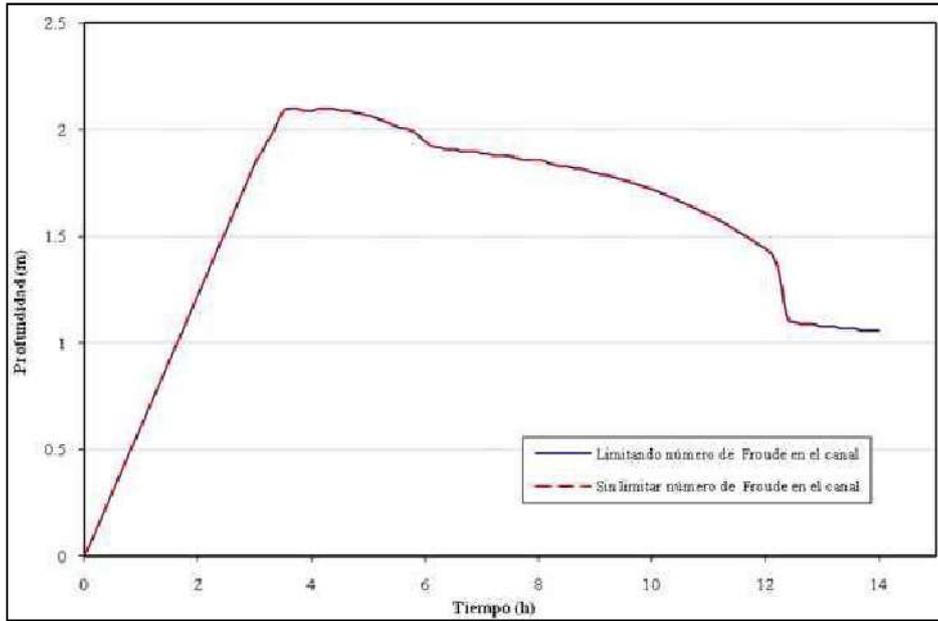


Figura 6.45 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 - K0+781.018.

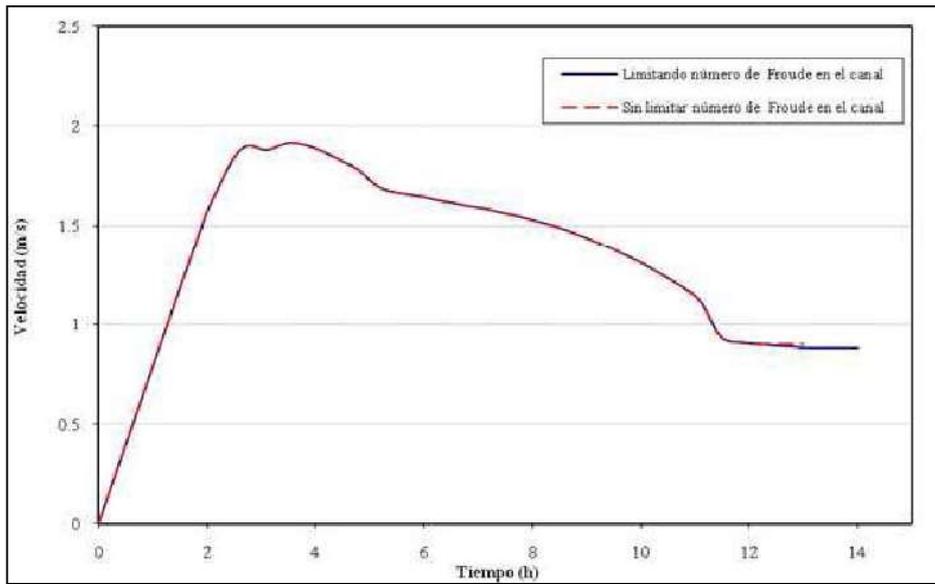


Figura 6.46 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 - K0+781.018.

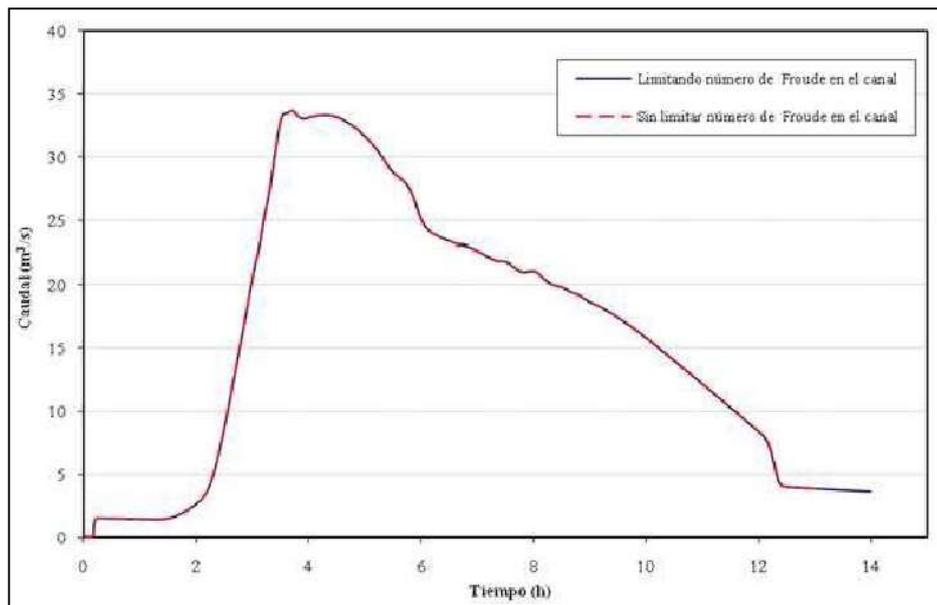


Figura 6.47 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en el caudal quebrada El Rincón - Sección 4 – K0+781.018.

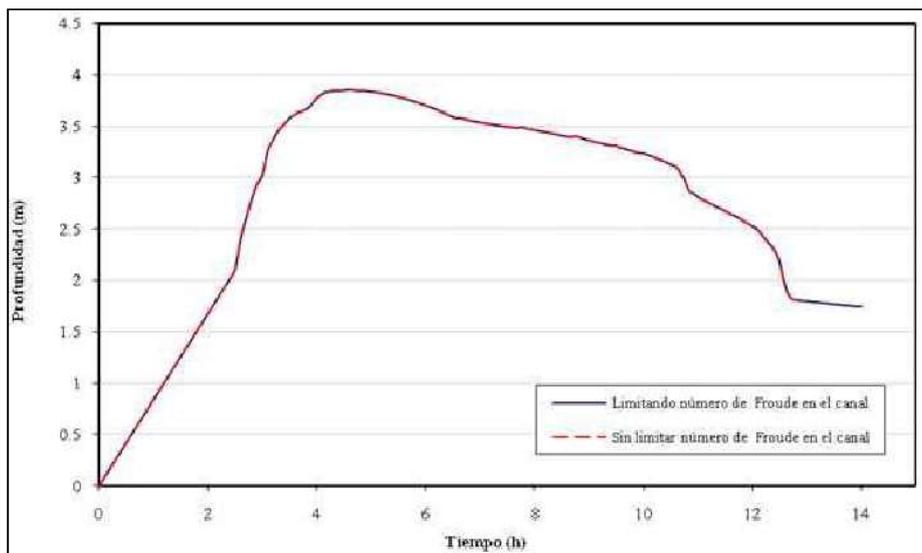


Figura 6.48 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 – K2+778.739.

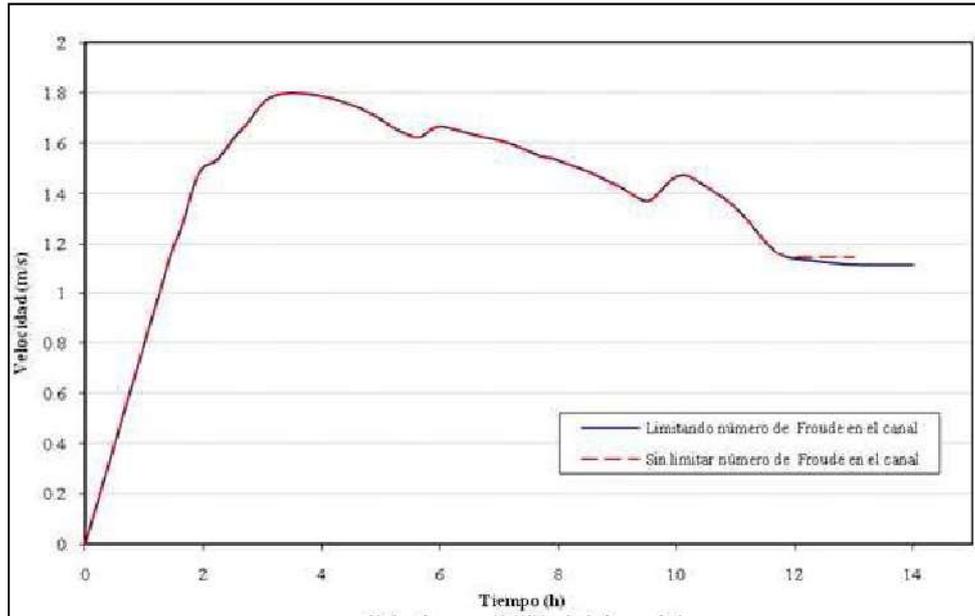


Figura 6.49 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 - K2+778.739.

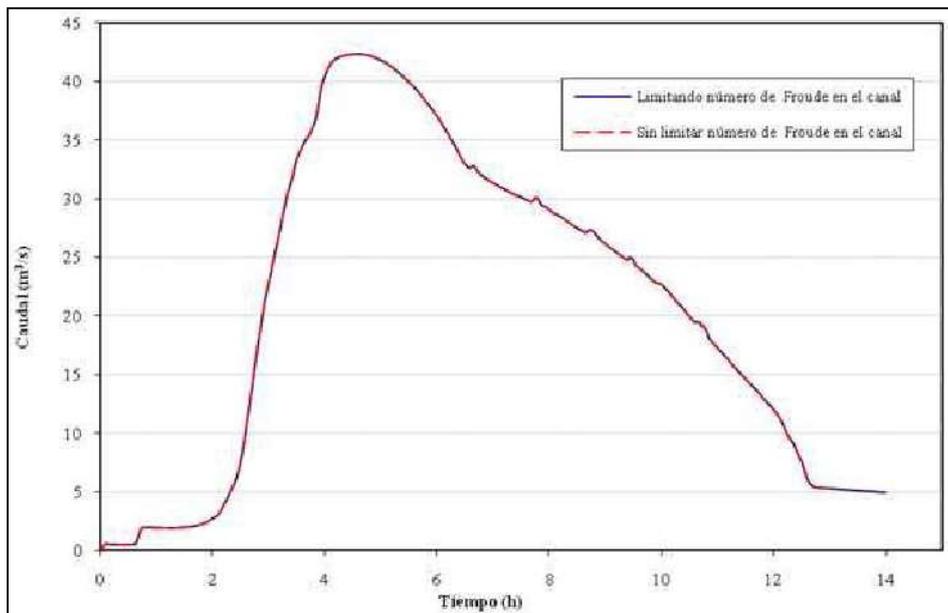


Figura 6.50 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia de la limitación del número de Froude del canal en el caudal quebrada El Rincón - Sección 13 - K2+778.739.

VARIACIÓN DEL INTERVALO DE TIEMPO COMPUTACIONAL

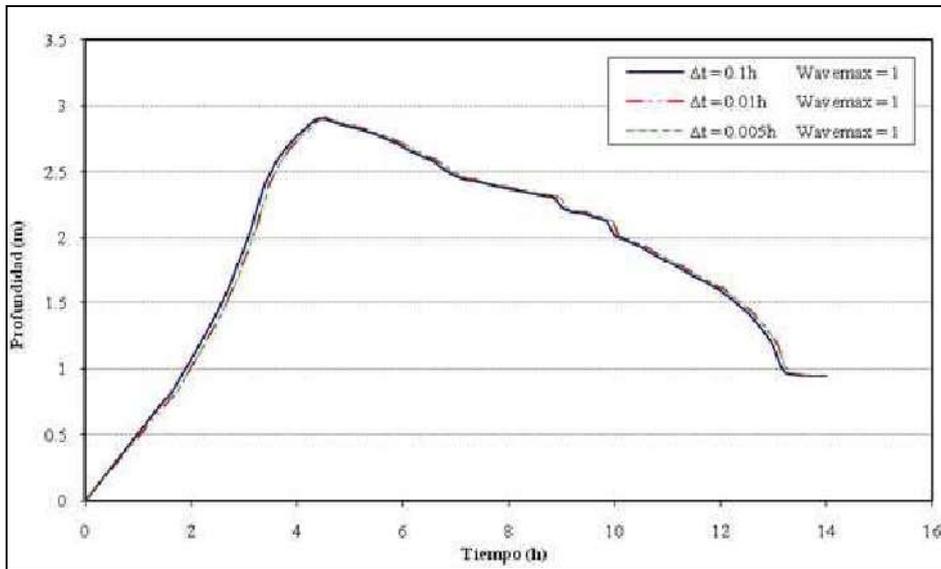


Figura 6.51 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 - K0 + 814.06.

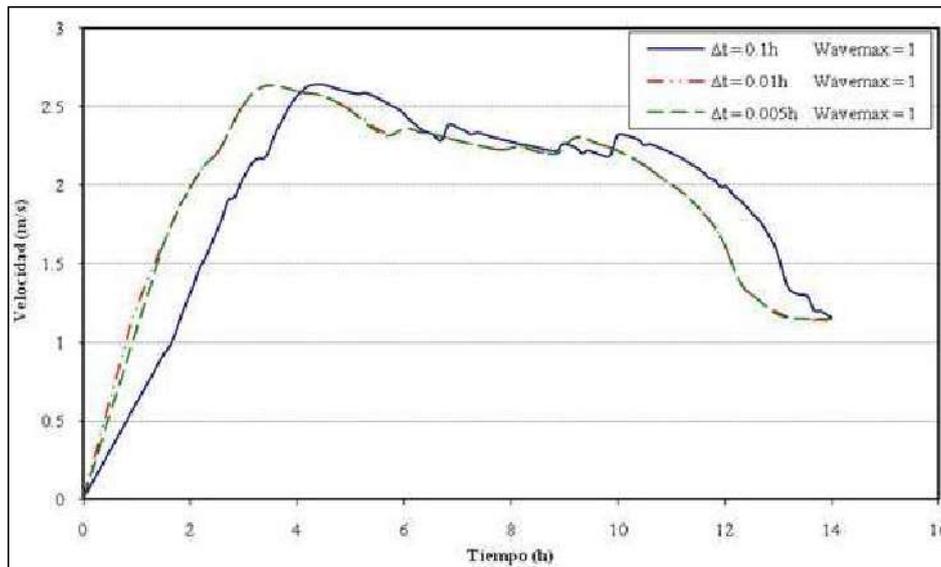


Figura 6.52 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 7 - K0 + 814.06.

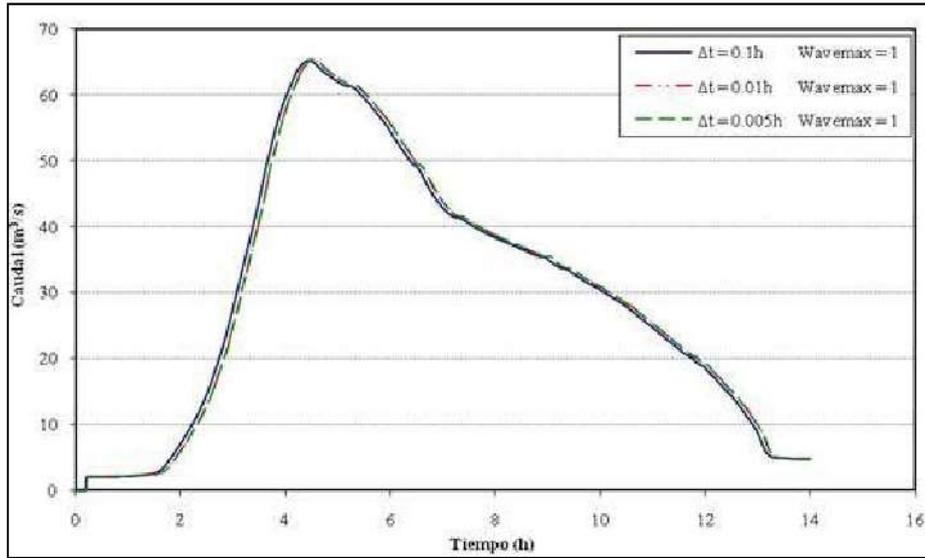


Figura 6.53 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en el caudal quebrada La Unión - Sección 7 - K0 + 814.06.

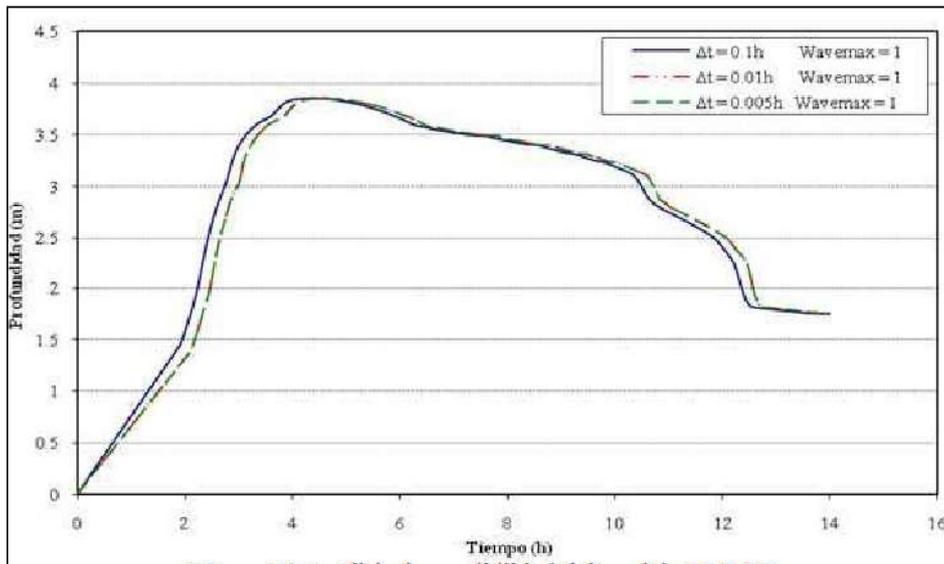


Figura 6.54 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la profundidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 - K2 + 883.2.

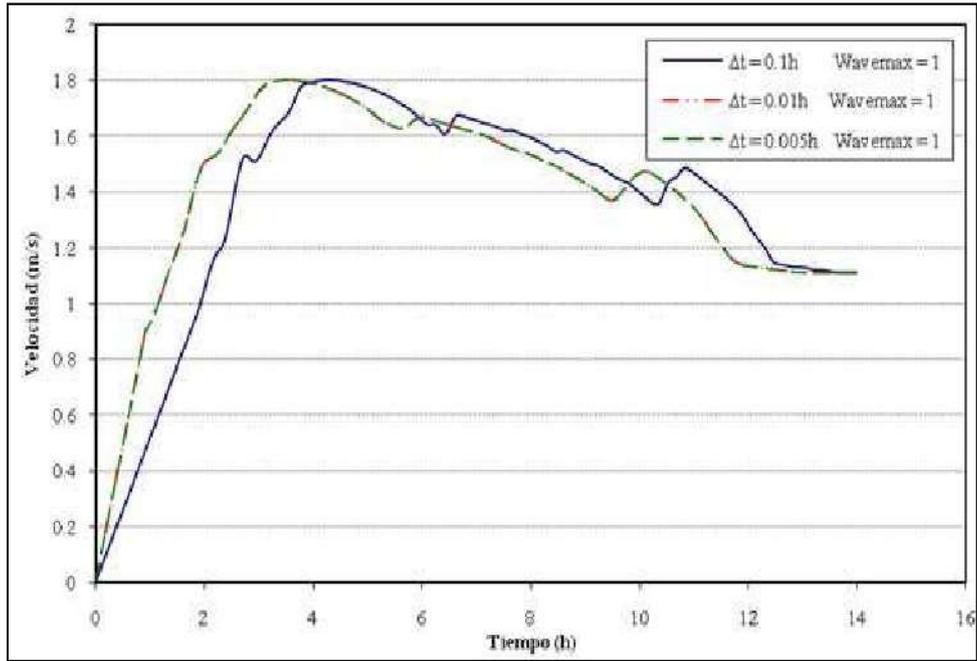


Figura 6.55 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la velocidad del flujo quebrada La Unión - Sección 30 – K2 + 883.2.

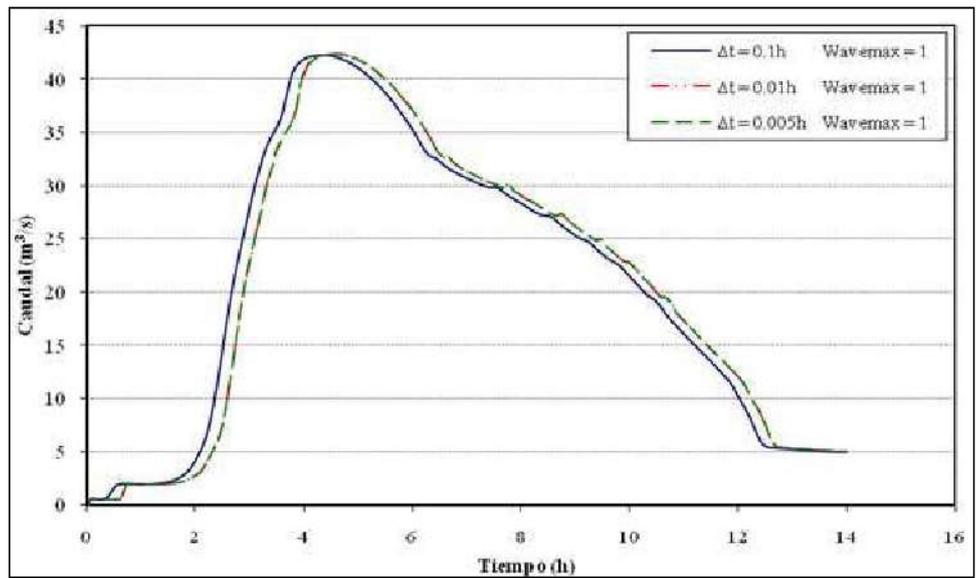


Figura 6.56 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en el caudal quebrada La Unión - Sección 30 – K2 + 883.2.

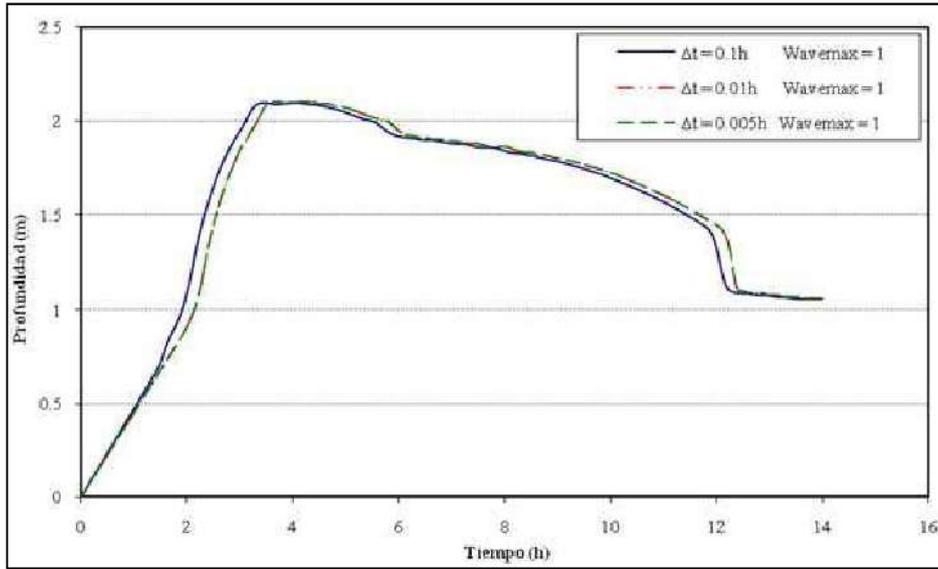


Figura 6.57 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0 + 781.018.

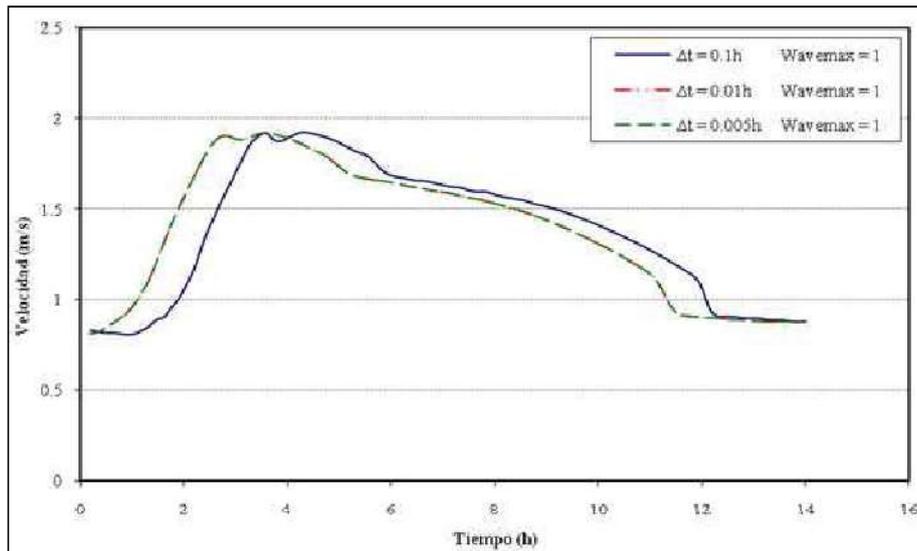


Figura 6.58 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 4 – K0 + 781.018.

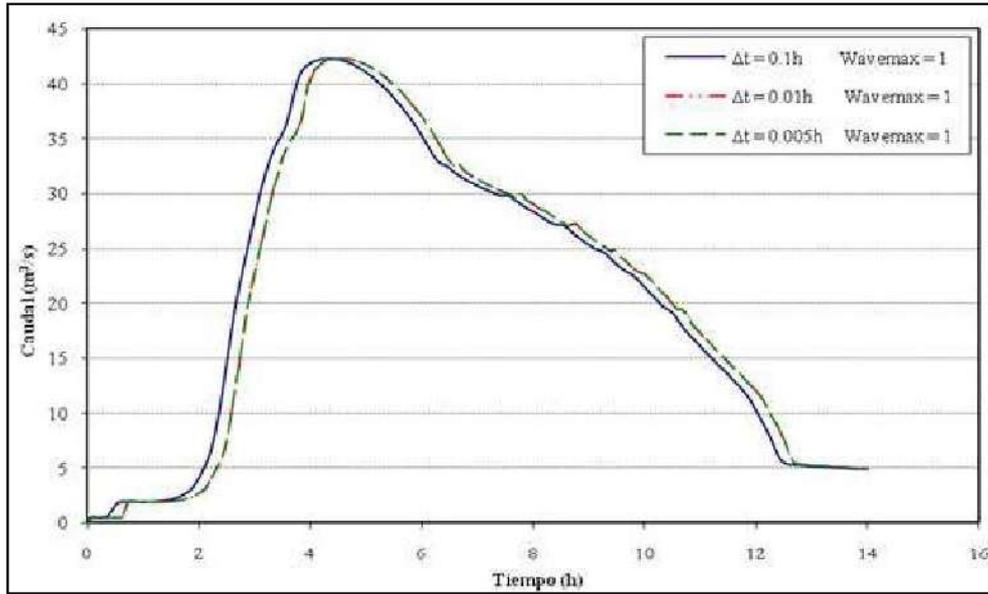


Figura 6.59 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en el caudal quebrada El Rincón - Sección 4 - K0 + 781.018.

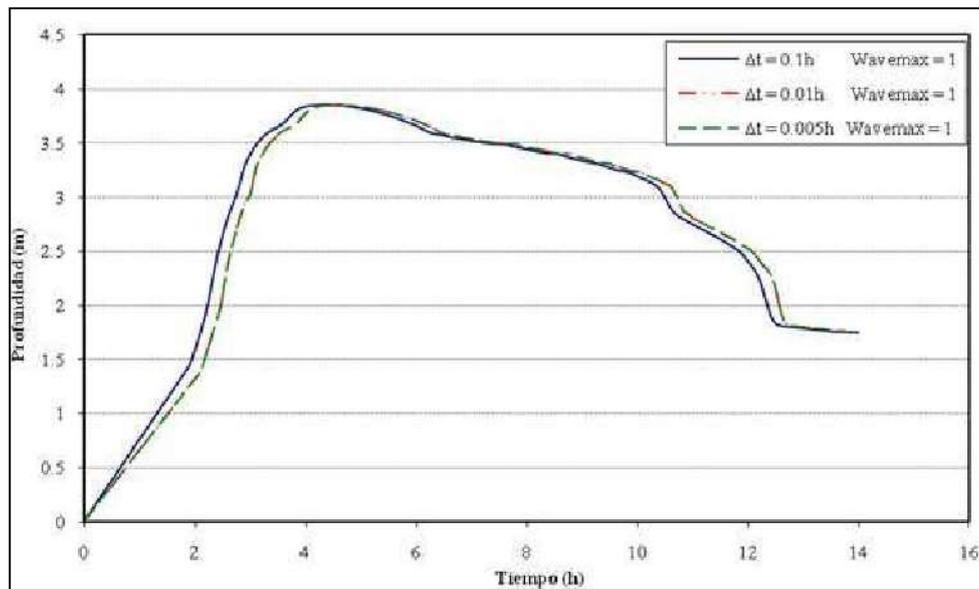


Figura 6.60 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la profundidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 - K2 + 778.739.

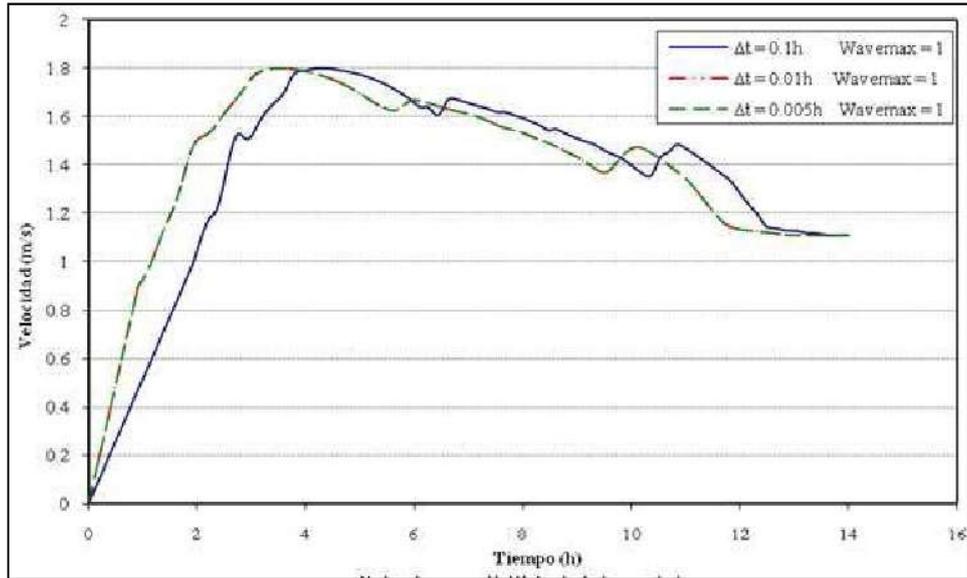


Figura 6.61 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en la velocidad del flujo quebrada El Rincón - Sección 13 - K2 + 778.739.

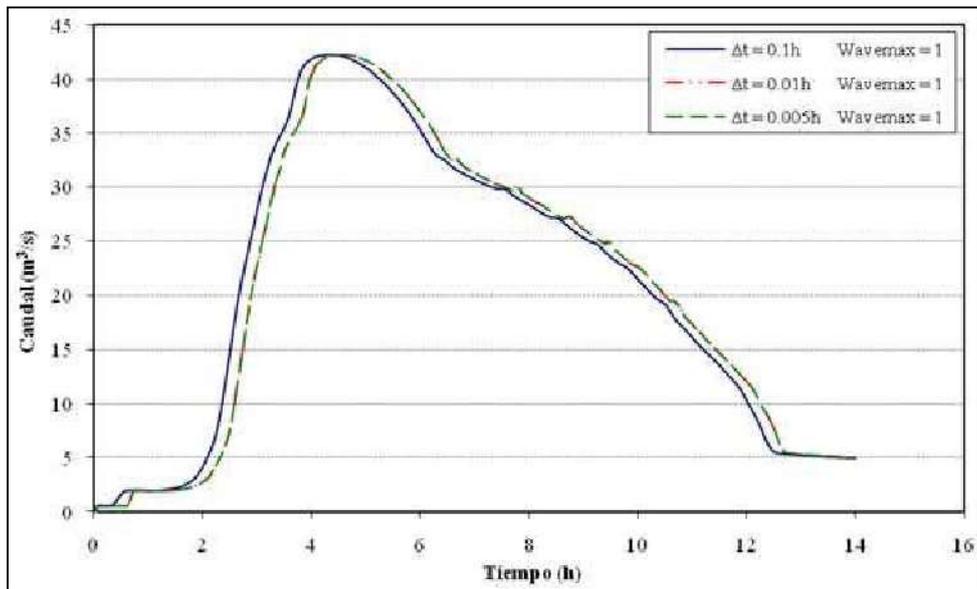


Figura 6.62 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D, Influencia del intervalo de tiempo computacional en el caudal, quebrada El Rincón - Sección 13 - K2 + 778.739.

RESULTADOS

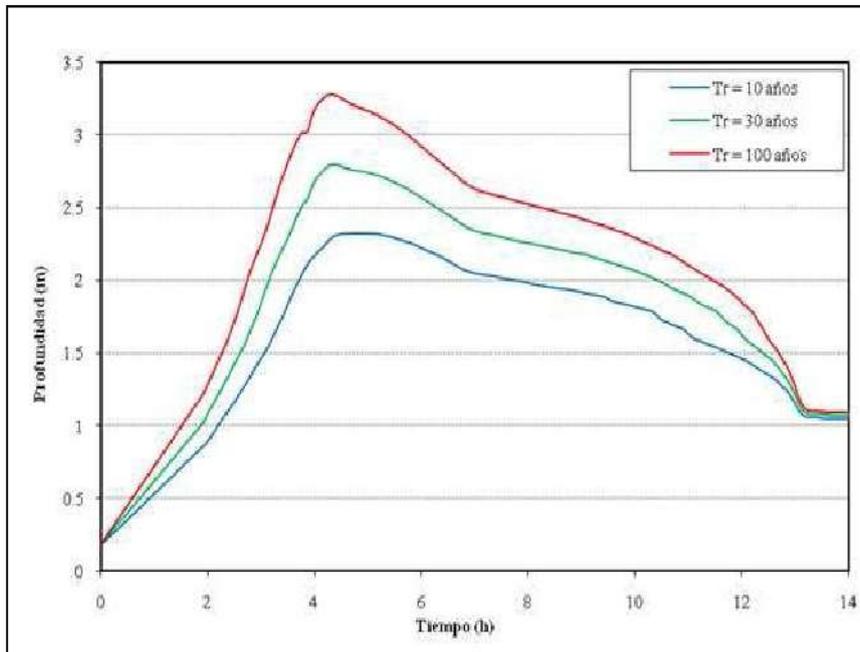


Figura 6.63 Variación de la profundidad del flujo durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 7 – K0 + 814.06.

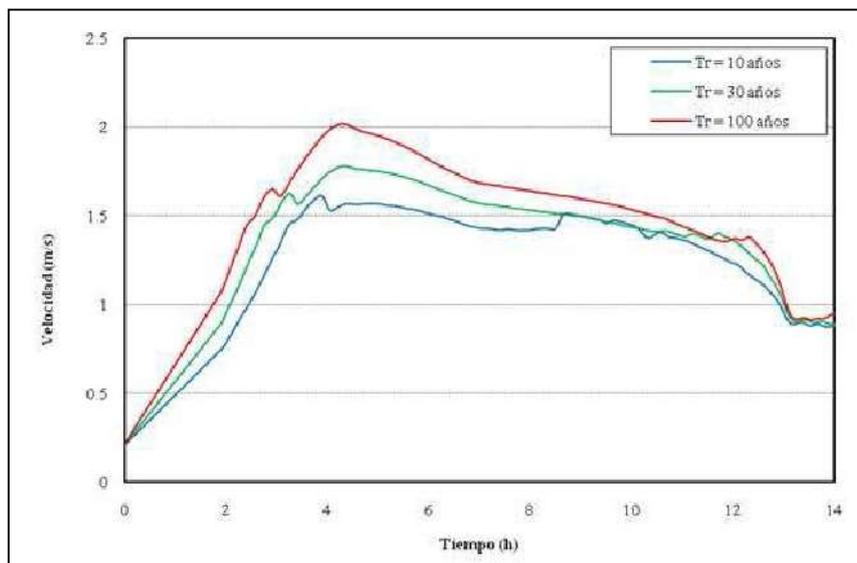


Figura 6.64 Variación de la velocidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años quebrada La Unión – Sección 7 – K0 + 814.06.

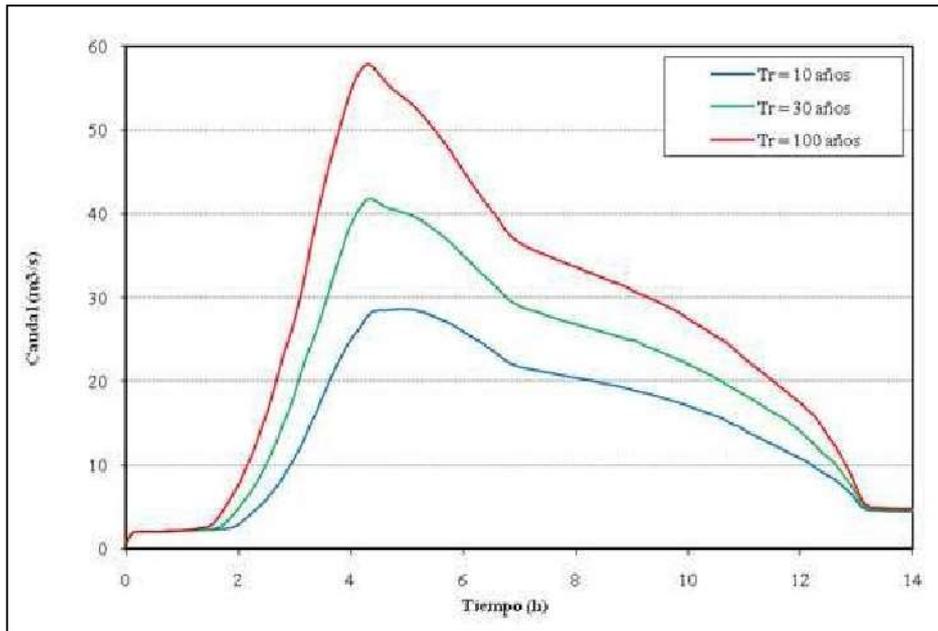


Figura 6.65 Variación del caudal durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 7 – K0 + 814.06.

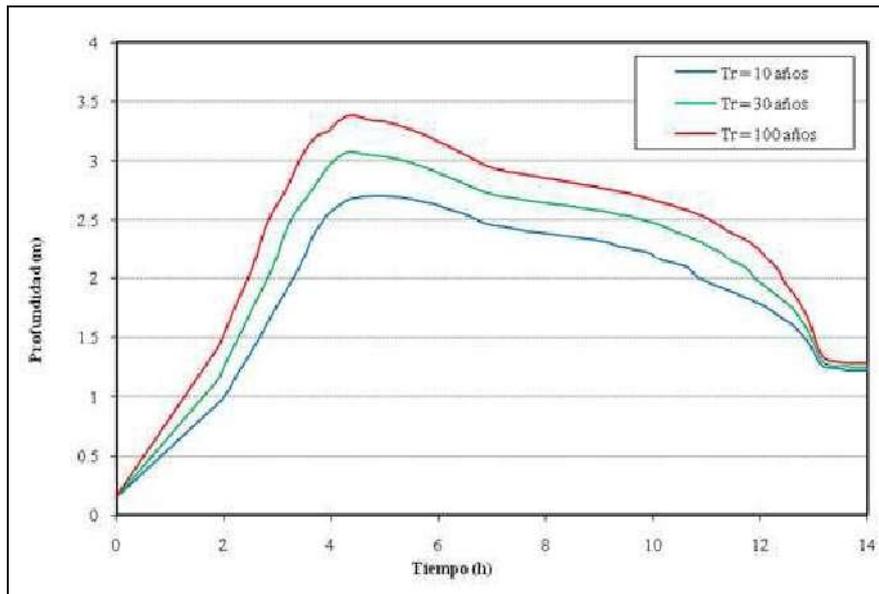


Figura 6.66 Variación de la profundidad del flujo durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 11 – K1 + 264.54.

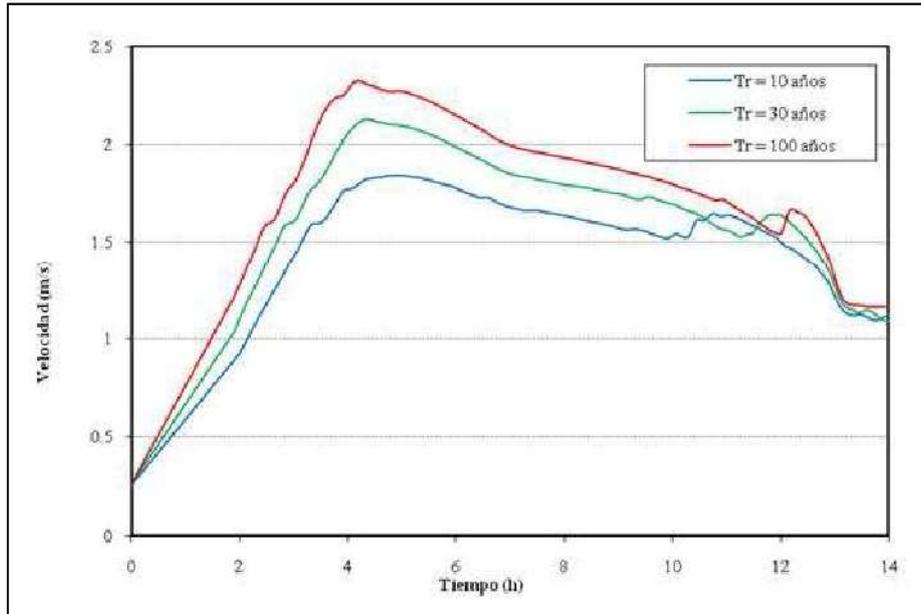


Figura 6.67 Variación de la velocidad del flujo durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 11 – K1 + 264.54.

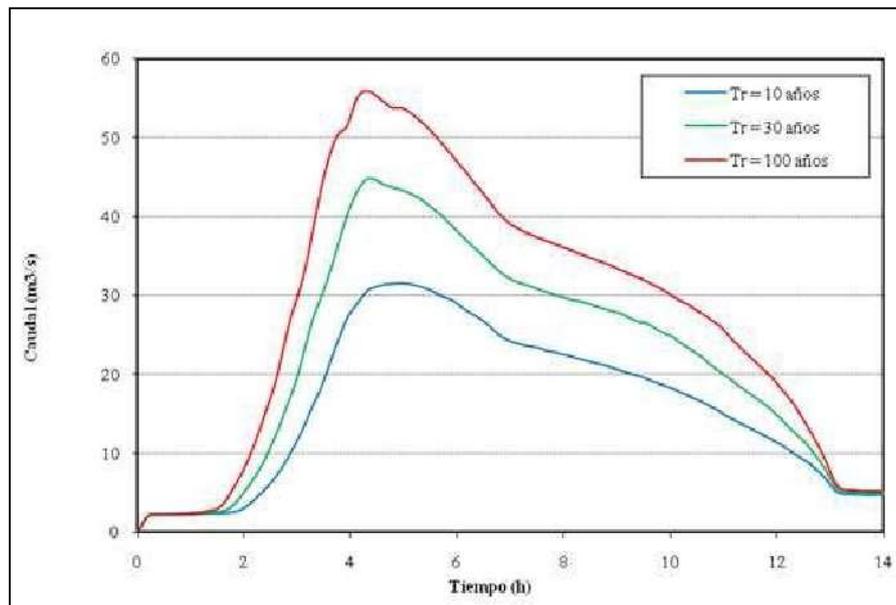


Figura 6.68 Variación del caudal durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 11 – K1 + 264.54.

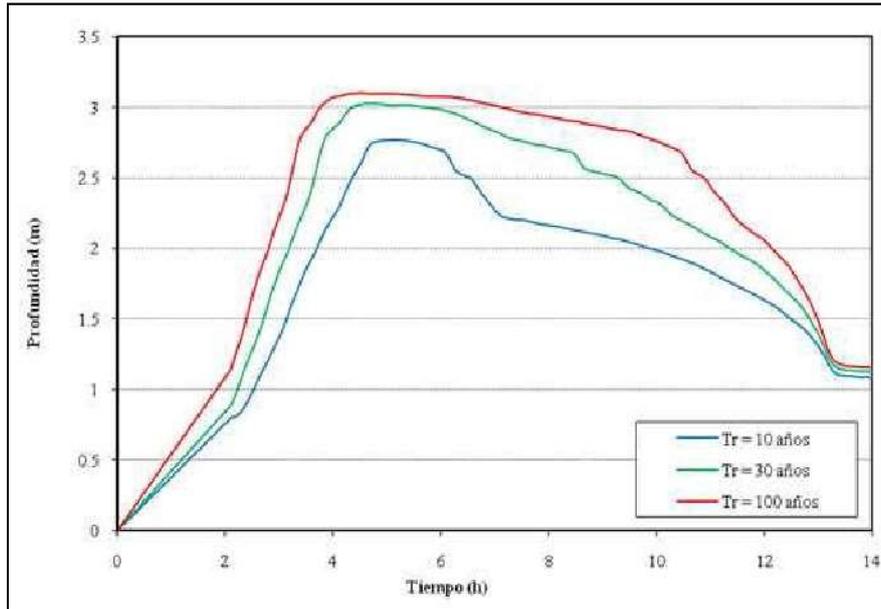


Figura 6.69 Variación de la profundidad del flujo durante la creciente. Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 30 – K2 + 883.20.

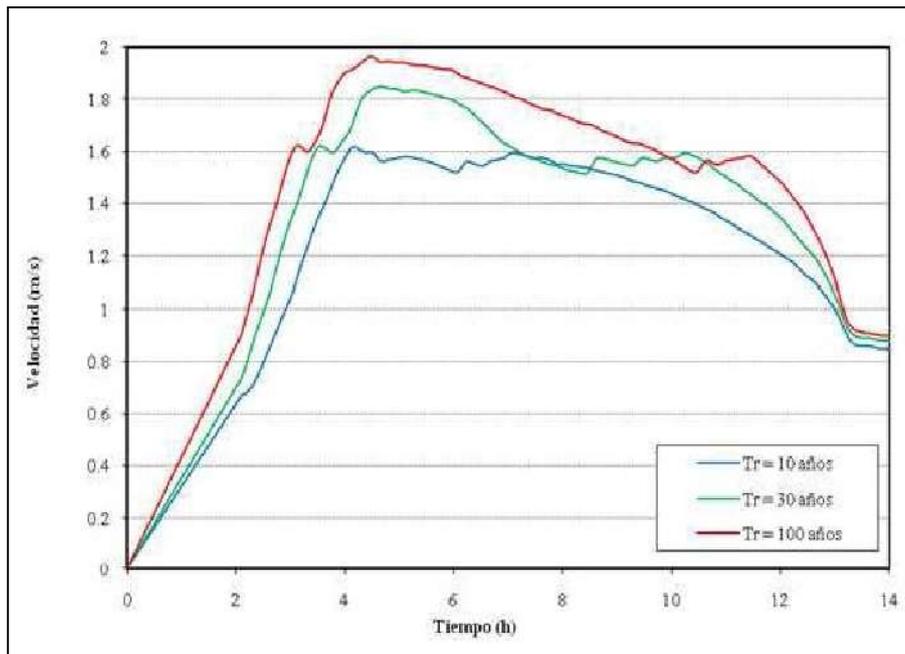


Figura 6.70 Variación de la velocidad del flujo durante la creciente, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 30 – K2 + 883.20.

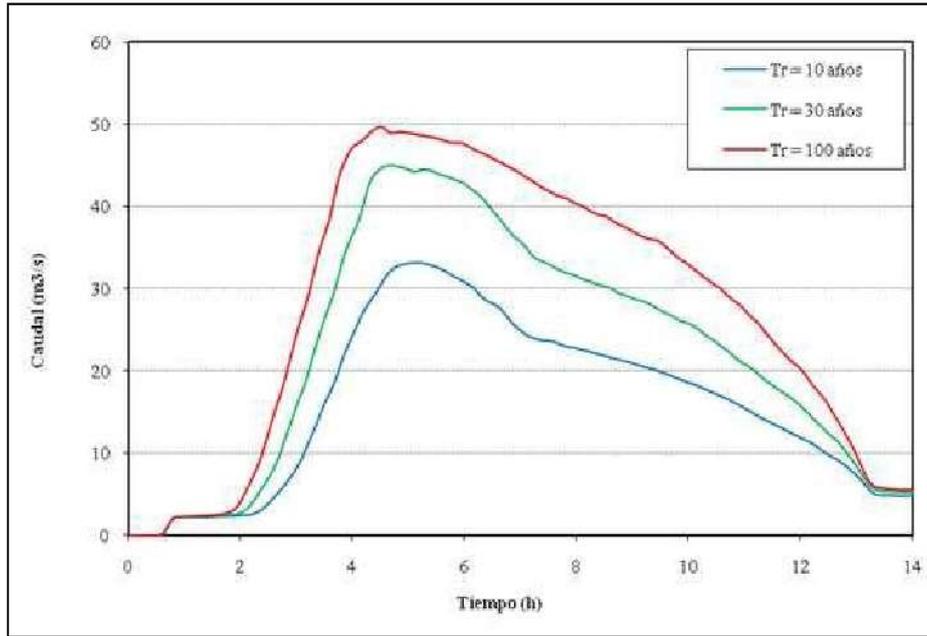


Figura 6.71 Variación del caudal durante la crecida, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada La Unión – Sección 30 – K2 + 883.20.

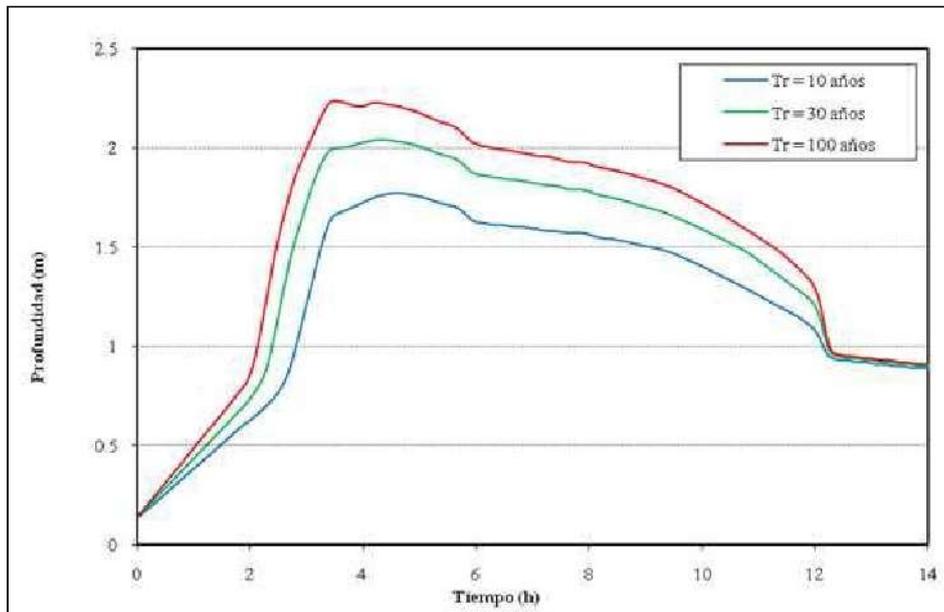


Figura 6.72 Variación de la profundidad del flujo durante la crecida, Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 4 – K0 + 781.018.

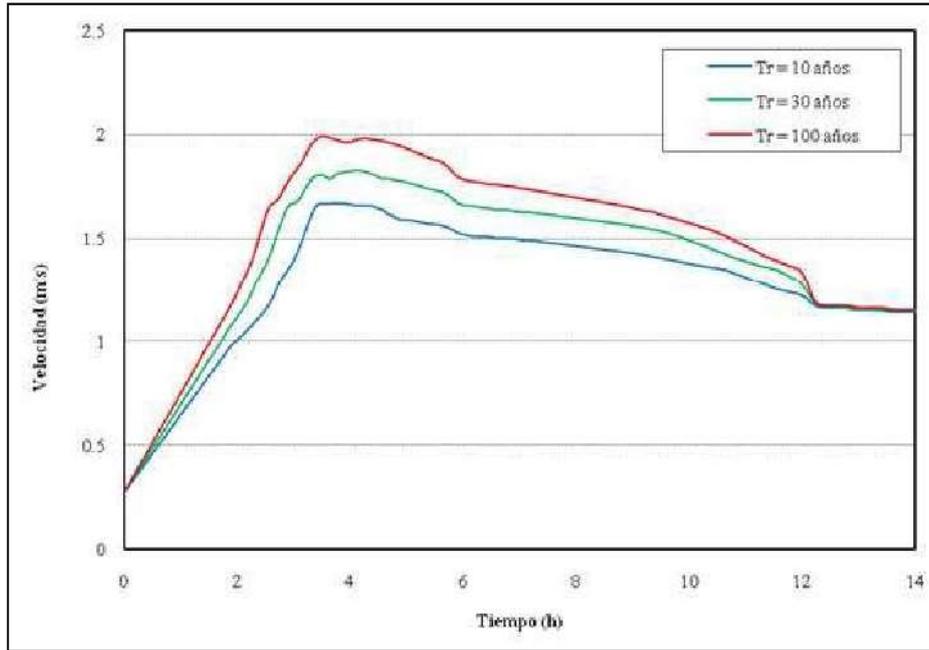


Figura 6.73 Variación de la velocidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 4 – K0 + 781.018.

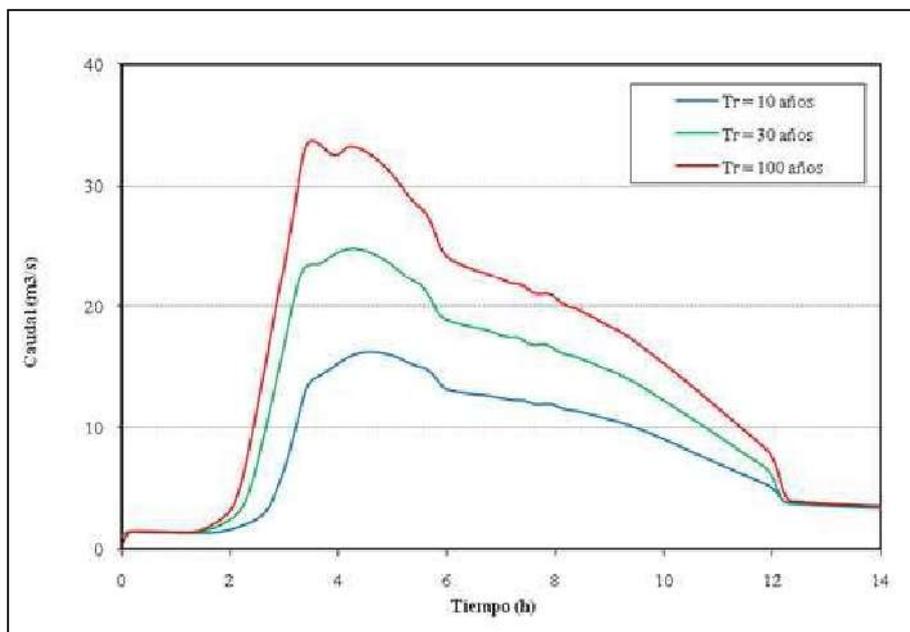


Figura 6.74 Variación del caudal durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 4 – K0 + 781.018.

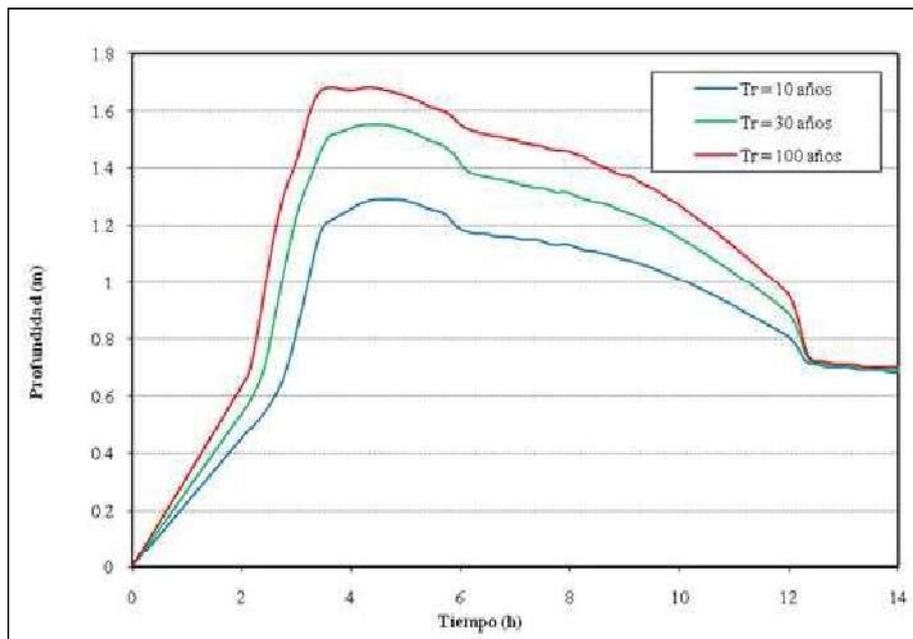


Figura 6.75 Variación de la profundidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 8 – K1 + 602.812.

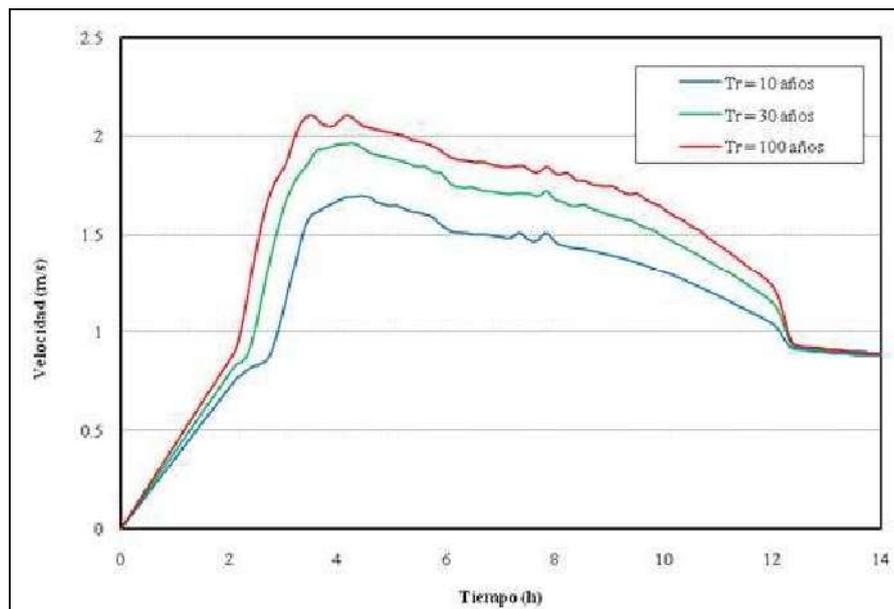


Figura 6.76 Variación de la velocidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 8 – K1 + 602.812.

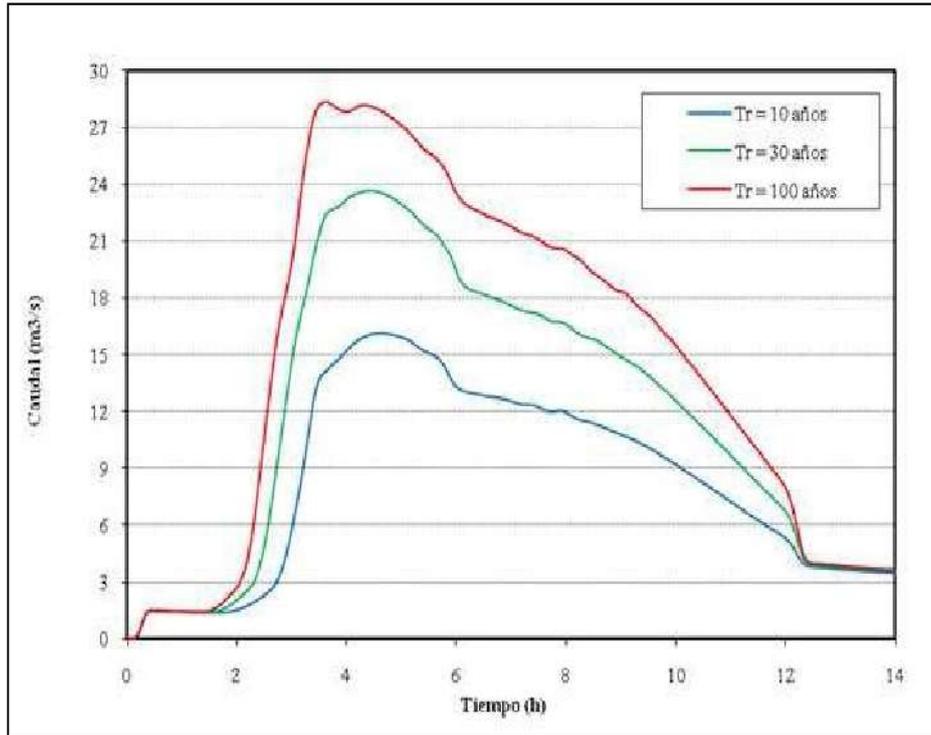


Figura 6.77 Variación del caudal durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 8 – K1 + 602.812.

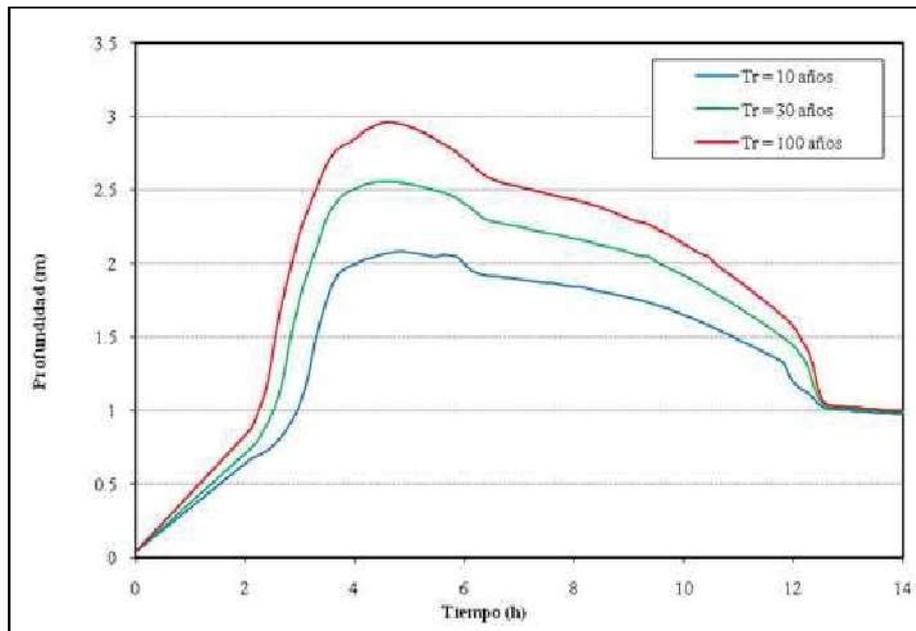


Figura 6.78 Variación de la profundidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 13 – K2 + 778.739.

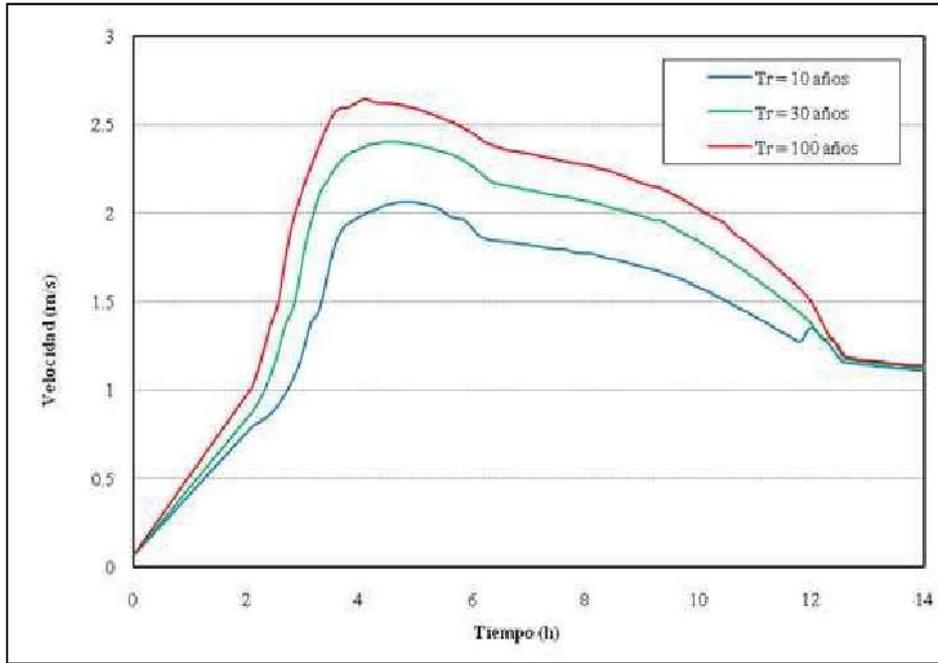


Figura 6.79 Variación de la velocidad del flujo durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 13 – K2 + 778.739.

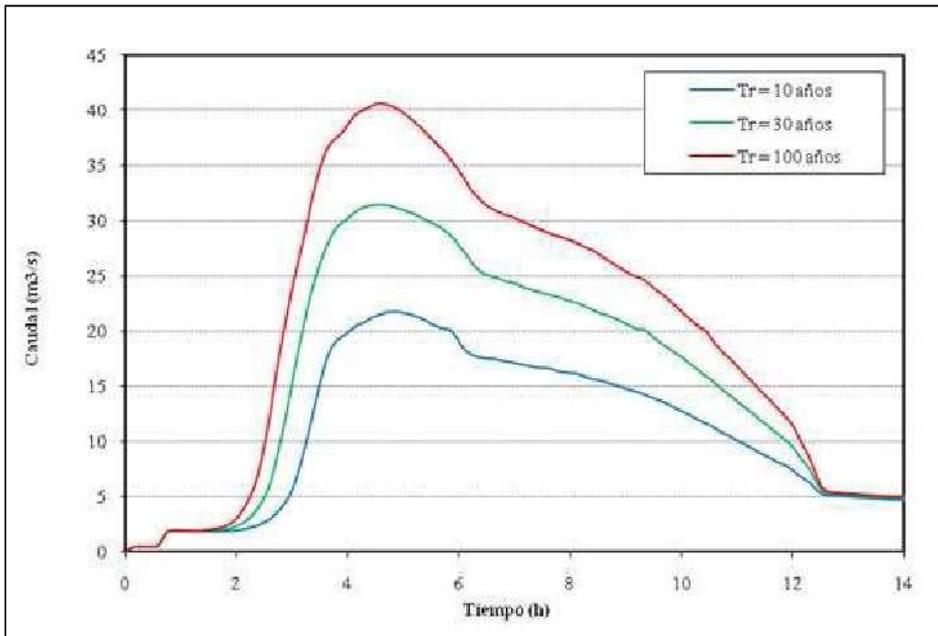


Figura 6.80 Variación del caudal durante la creciente Periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, Quebrada El Rincón – Sección 13 – K2 + 778.739.

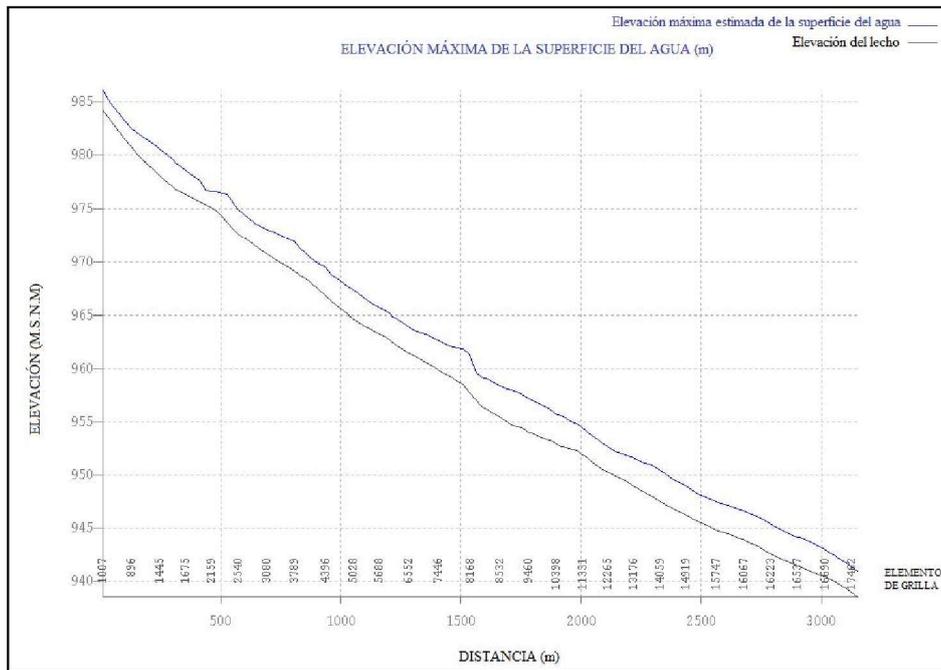


Figura 6.81 Perfil de la elevación máxima de la superficie del agua en la quebrada La Unión para el periodo de retorno de 10 años.

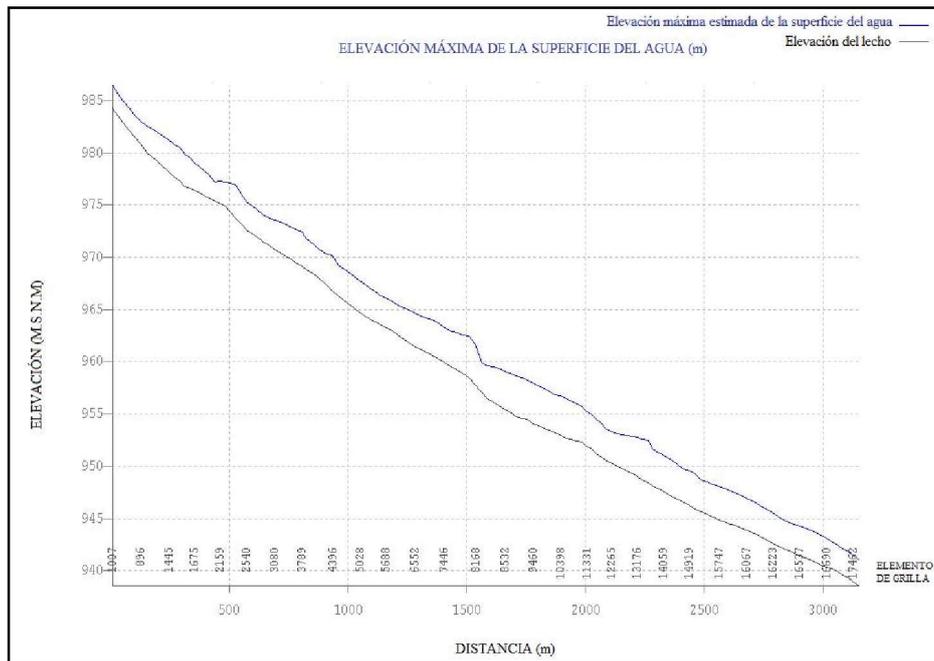


Figura 6.82 Perfil de la elevación máxima de la superficie del agua en la quebrada La Unión para el periodo de retorno de 30 años.

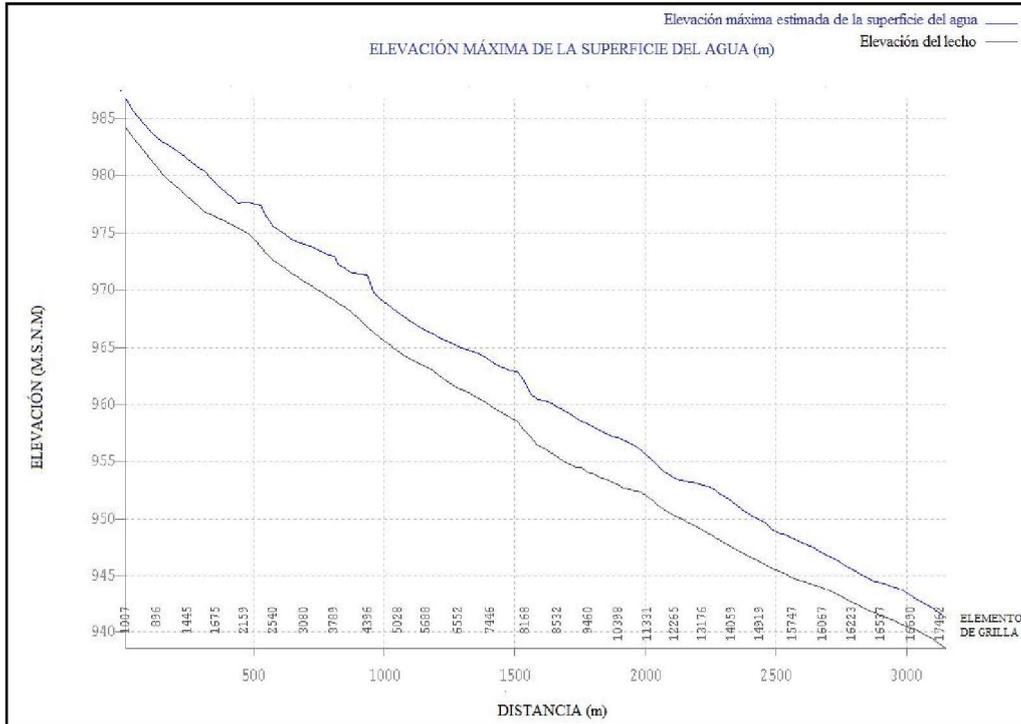


Figura 6.83 Perfil de la elevación máxima de la superficie del agua en la quebrada La Unión para el periodo de retorno de 100 años.

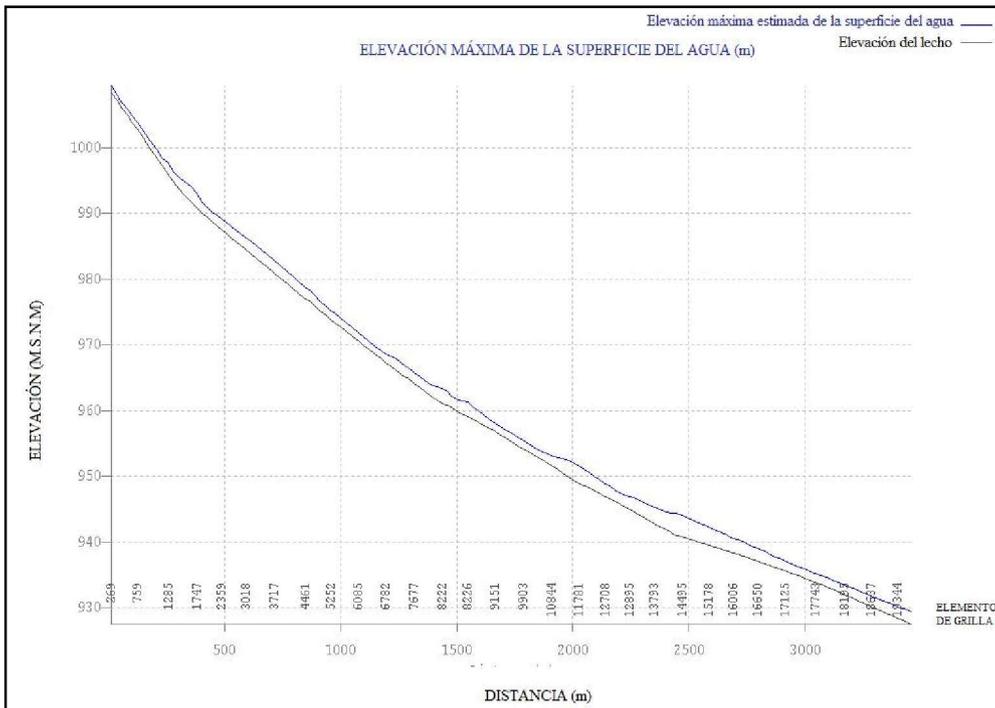


Figura 6.84 Perfil de la elevación máxima de la superficie del agua en la quebrada El Rincón para el periodo de retorno de 10 años.

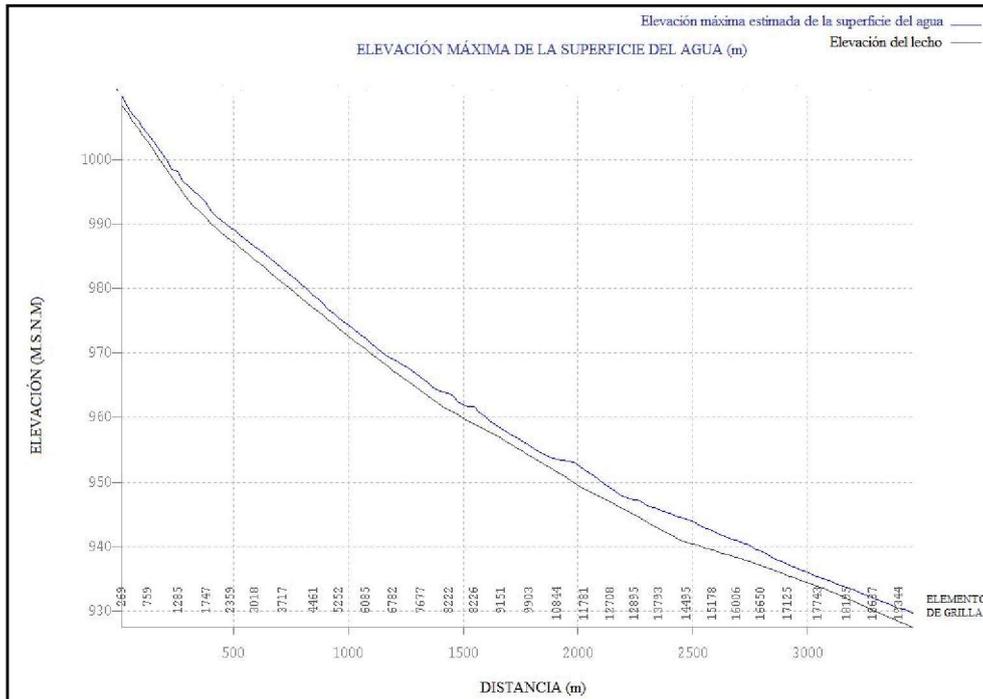


Figura 6.85 Perfil de la elevación máxima de la superficie del agua en la quebrada El Rincón para el periodo de retorno de 30 años.

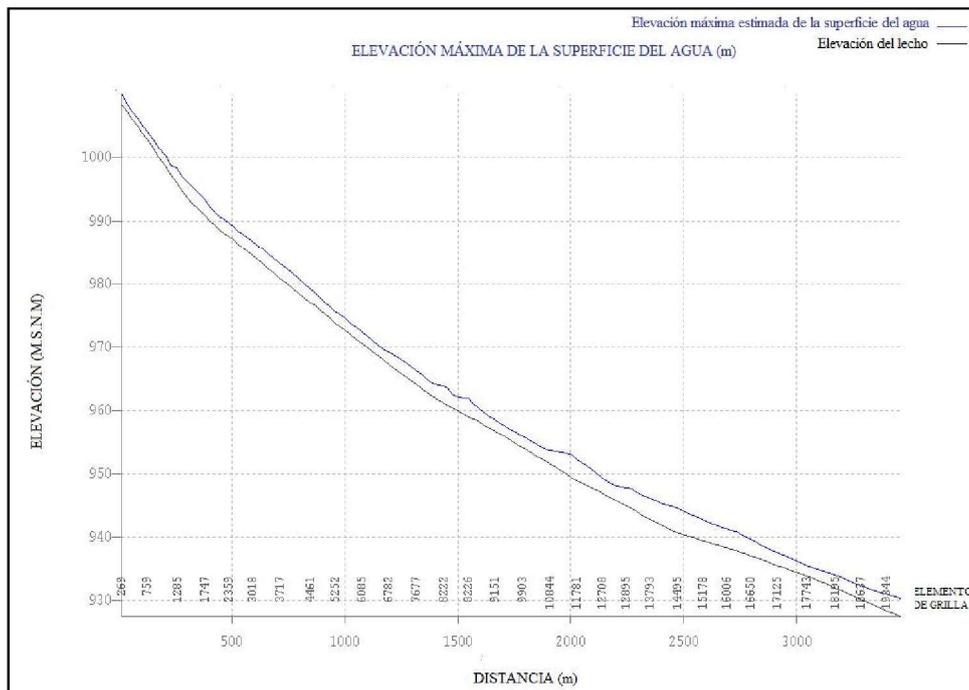


Figura 6.86 Perfil de la elevación máxima de la superficie del agua en la quebrada El Rincón para el periodo de retorno de 100 años-

6.2.2.5. Análisis de resultados

El análisis de sensibilidad realizado permitió determinar los parámetros físicos y numéricos que mayor influencia ejercen sobre el comportamiento hidrodinámico de los cauces durante las inundaciones, es decir, los parámetros que al ser modificados generan las mayores variaciones en los niveles, las profundidades y las velocidades de flujo. A continuación se describe la sensibilidad de cada parámetro evaluado.

Análisis de la influencia del factor de rugosidad de los cauces

La rugosidad en los canales es un parámetro sensible de gran importancia ya que los niveles del flujo aumentan (y con ello el área de la zona inundada) considerablemente al incrementar el valor de la rugosidad. De acuerdo con los resultados obtenidos es posible afirmar que la rugosidad del cauce afecta en mayor proporción los niveles de agua y las velocidades de la corriente con relación al grado de afectación de los caudales en las quebradas La Unión y El Rincón. Es decir, los niveles de agua y las velocidades del flujo son muy sensibles a los cambios en el factor de rugosidad mientras que los caudales son muy poco o moderadamente sensibles. En las Figuras 6.5, 6.8, 6.11 y 6.14 se presentan los resultados de las velocidades para distintos valores de rugosidad en distintos sectores de las quebradas La Unión y El Rincón. Las áreas inundadas estimadas utilizando un valor de rugosidad de $0.07 \text{ s/m}^{1/3}$ en ambas quebradas (el cual fue finalmente adoptado en las simulaciones) se asemejan más a las registradas en el mapa de eventos históricos.

Análisis de la influencia de la variación en la vertical de la rugosidad de las planicies de inundación

Este factor causó una variación más significativa en los caudales que en los niveles y las velocidades. La simulación en la cual este factor no fue utilizado arrojó resultados de niveles más bajos aún variando espacialmente la rugosidad en las planicies para profundidades de flujo de 0.15 m. Por otra parte, al definir una rugosidad constante de $0.2 \text{ s/m}^{1/3}$ para profundidades de flujo de 0.06 m, en la simulación donde fue utilizado el factor de variación en la vertical de rugosidad en las llanuras, tanto los niveles resultantes como las áreas inundadas dieron resultados más cercanos a los esperados de acuerdo con el mapa de eventos históricos.

Análisis de la influencia de la variación en la vertical de la rugosidad de los canales (factor r2)

Al emplear la facilidad o herramienta disponible en el modelo FLO-2D para definir una rugosidad variable con la profundidad en los canales se obtuvieron los niveles más altos y, por lo tanto, las áreas inundadas de mayor extensión, muy similar al mapa de registros de eventos históricos. La velocidad del flujo resultó más afectada con la variación de este parámetro, seguida de la profundidad, siendo el caudal la variable hidrodinámica con menor grado de afectación.

Análisis de la influencia de la limitación del número de Froude en las planicies

Cuando se tienen dificultades para establecer los valores más apropiados de la rugosidad en determinados sectores, a causa de las limitaciones de la información disponible en cuanto al tipo de vegetación y posibles obstrucciones en la planicie, el recurso disponible en el modelo FLO-2D denominado “Limitación del Número de Froude en las planicies” resultó de gran ayuda para determinar con mejor aproximación las áreas inundables. Esta herramienta permite limitar el número de Froude para mantener un régimen de flujo subcrítico en las planicies y también restringe las velocidades e incrementa las profundidades en las zonas inundadas, aumentando la extensión de estas zonas. Este recurso también ayuda en la conservación del volumen, disminuyendo el error en los cálculos del modelo.

Análisis de la influencia de la limitación del número de Froude en los canales

Al limitar el número de Froude en los canales para controlar posibles velocidades excesivamente altas, los resultados de las diferentes simulaciones no arrojaron variaciones considerables en las velocidades, los caudales y los niveles de agua en las quebradas La Unión y El Rincón.

Análisis de la influencia del intervalo de tiempo computacional y del tamaño de celda de la malla

El tamaño de las celdas de la malla computacional, Δx , y el intervalo de tiempo, Δt , son establecidos por el modelador durante el proceso de implementación de un modelo matemático. Para ello inicialmente se define un tamaño de celda de acuerdo con la extensión de la zona de estudio, el grado de detalle requerido para la representación adecuada de la topografía y la batimetría y la variación espacial de las características del flujo; además debe tenerse en cuenta la recomendación acerca del número máximo de celdas para que el tiempo computacional no sea excesivamente largo. Posteriormente, el usuario asigna un valor del intervalo de tiempo, el cual debe ser adecuado para garantizar la estabilidad numérica del modelo y al mismo tiempo permitir simulaciones con tiempos computacionales razonables. Esto se lleva a cabo teniendo en cuenta que grandes valores del intervalo de tiempo, Δt , conducen a resultados poco precisos, y, por el contrario, valores pequeños de Δt , generalmente incrementan la precisión de los resultados y la estabilidad numérica del modelo, pero pueden aumentar de manera considerable el tiempo total de simulación y los costos asociados.

El modelo matemático FLO-2D es un modelo que emplea un esquema explícito para resolver las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento, como se indicó anteriormente; esto quiere decir que el número de Courant debe ser menor o igual a 1. Para cumplir el criterio de Courant, el modelo reduce automáticamente el intervalo de tiempo, cuando Cr es superior a 1 en cualquier elemento de la malla. El modelo indicará en los resultados el número de veces que el intervalo de tiempo debió ser reducido porque el número de Courant calculado resultó superior a 1 en cualquier celda de la malla.

Si esto sucede en repetidas ocasiones (más de 50000 veces aproximadamente) se deben hacer ajustes manuales de la elevación y la rugosidad de dicha(s) celda(s) para disminuir la profundidad de flujo y, a su vez, disminuir el valor de la celeridad de las ondas, C_o , ya que el número de Courant depende, entre otros, de este parámetro.

Si después de realizar este proceso el problema continúa, es decir, se sigue presentando un número excesivo de veces en las que el intervalo de tiempo es disminuido para la(s) misma(s) celda(s), se debe contemplar la posibilidad de disminuir la relación $\Delta t/\Delta x$, ya sea reduciendo el intervalo de tiempo o incrementando el tamaño de las celdas. Sin embargo, debe aclararse que reducir la relación $\Delta t/\Delta x$ es un proceso que se realiza con el fin de disminuir el tiempo computacional y sólo es obligatorio si la simulación es interrumpida porque el intervalo de tiempo no pudo ser reducido más veces por el modelo.

Un procedimiento similar al implementado para garantizar la condición de Courant se aplica cuando el criterio de estabilidad numérica de la ecuación de onda dinámica es excedido, el cual también depende del intervalo de tiempo, y del tamaño de las celdas.

- Intervalo de tiempo, Δt

Se realizaron simulaciones considerando diferentes valores de Δt , desde 0.1 h (360 s) hasta 0.005 h (18 s). Los resultados de las simulaciones arrojaron variaciones apreciables en los parámetros hidrodinámicos (velocidad, profundidad, caudal) al emplear el mayor valor de Δt , respecto a los dos valores menores (0.01 y 0.005 h ó 36 y 18 s, respectivamente). Las diferencias entre dos simulaciones consecutivas se reducía al disminuir el Δt . Finalmente, las diferencias al utilizar intervalos de tiempo de 36 s y 18 s resultaron muy pequeñas, por lo cual se adoptó un intervalo de 36 s para todos los demás análisis y simulaciones.

7. DETERMINACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE LA AMENAZA

7. DETERMINACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE LA AMENAZA

Generalidades

Las condiciones morfológicas y climáticas del municipio de La Unión favorecen la ocurrencia periódica de inundaciones ocasionadas por las fuertes lluvias en las partes altas y medias de la cuenca de las quebradas La Unión y El Rincón que provocan el aumento de los caudales y los niveles de agua en estos cauces y la escorrentía directa que llega a la zona urbana y de expansión procedente de las laderas adyacentes, inundando los sectores más bajos de la población.

Los desbordamientos de los cauces en la zona de estudio durante las épocas de invierno siempre han generado efectos negativos en las zonas pobladas y los terrenos dedicados a la agricultura y a la ganadería. Desde las primeras décadas del siglo XX las planicies de inundación de estos cauces han venido siendo urbanizadas, originando con ello un gran problema social. Con el propósito de disponer de una herramienta para la planificación del uso del suelo y gestión del riesgo se adelanta este estudio de amenazas naturales por inundaciones en el municipio de La Unión.

En este capítulo se presentan los mapas de inundaciones (que registran las profundidades de agua en las áreas inundadas) y de amenaza por inundaciones (que indican la frecuencia y la magnitud de la inundación) originadas por los desbordamientos de las quebradas La Unión y El Rincón, los zanjones Negro y Los Muertos, la cañada El Lucero y la escorrentía superficial, producto de las lluvias, que desciende de las laderas y afecta las zonas urbana y de expansión urbana del municipio de La Unión.

En este estudio se evalúan las inundaciones causadas por los desbordamientos de los cauces durante las crecientes, las cuales transportan los sedimentos del propio cauce y aquellos generados por la erosión laminar de los suelos de la cuenca por la acción directa de las lluvias y que se ha definido amenaza por inundación.

7.1. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LAS INUNDACIONES

Las inundaciones constituyen eventos recurrentes en los ríos y se presentan como consecuencia de lluvias fuertes y continuas que superan la capacidad de transporte de los ríos y la capacidad de absorción del suelo. Debido a esto el nivel del agua supera el nivel de banca llena del cauce principal del río y se produce la inundación de las planicies y tierras adyacentes. Estos eventos ocurren de forma aleatoria en función de los procesos climáticos locales y regionales. Se ha determinado estadísticamente que los ríos igualan o exceden su nivel de banca llena, en promedio, cada 2.33 años (Leopold et al., 1984).

Las inundaciones pueden ocurrir debido al comportamiento natural de los ríos o a alteraciones producidas por el hombre. Las condiciones naturales corresponden a las características climáticas y físicas propiciadas por la cuenca en su estado natural, como son:

el relieve, el tipo de precipitación, la cobertura vegetal y la capacidad de drenaje. Entre las alteraciones provocadas por la acción del hombre se tienen: la impermeabilización de los suelos al urbanizarlos, la deforestación, la alteración de los cursos y la canalización de los ríos, la construcción de obras hidráulicas, etc.

Una cuenca en estado natural posee mayor interceptación vegetal, mayores áreas permeables, menor escurrimiento superficial del suelo y un drenaje más lento en relación con las características que presenta una vez es intervenida. Por esta razón las inundaciones se producen con menor frecuencia en una cuenca no intervenida.

Los problemas resultantes de los desbordamientos de las corrientes de agua dependen del grado de ocupación de la planicie de inundación y de la frecuencia con la cual ocurren las inundaciones. La población de mayor poder adquisitivo tiende a habitar las localidades seguras, mientras que la población más pobre tiende a ocupar las áreas de alta amenaza de inundación, provocando problemas sociales que se repiten durante cada creciente. Cuando la frecuencia de las inundaciones es baja la población subvalora la amenaza y ocupa las zonas inundables. Esta situación genera consecuencias catastróficas cuando se presentan nuevos desbordamientos. No obstante, la predicción de las inundaciones y sus efectos es una tarea bastante compleja, por cuanto el pronóstico del comportamiento hidrológico de largo plazo es difícil, debido, a la aleatoriedad de los fenómenos meteorológicos y, al gran número de parámetros y variables involucradas en los procesos hidrológicos (lluvia – escorrentía).

Normalmente las inundaciones suelen ser descritas en términos de su periodo de retorno, el cual corresponde al intervalo promedio de recurrencia entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada. Una inundación con un periodo de retorno de 100 años se refiere a un evento que presenta una probabilidad de ocurrencia del 1% en cualquier año, o también al evento que se presenta cada 100 años, en promedio. Estos periodos de retorno se determinan a partir de la información histórica existente, que en muchos casos corresponde a periodos demasiado cortos, por lo cual la estimación realizada tiene asociada una fuerte incertidumbre.

La variación del nivel del agua en una creciente de un río depende de las características climáticas y físicas de la cuenca hidrográfica y su predicción puede ser realizada a corto o largo plazo. La previsión a corto plazo, también llamada en tiempo real, permite establecer el nivel y su tiempo de ocurrencia en una sección de un río con una anticipación que depende de los tiempos de escurrimiento de la cuenca y las distribuciones temporal y espacial de la precipitación. Dado que estas distribuciones sólo pueden ser estimadas en forma confiable con antelación de pocos días u horas, la predicción de niveles no puede realizarse con una anticipación muy grande.

La predicción a largo plazo cuantifica la probabilidad de ocurrencia de inundaciones en términos estadísticos, sin precisar cuando ocurrirán. La predicción se basa en la estadística de ocurrencia de niveles en el pasado y permite escoger los niveles de crecientes para algunos riesgos escogidos.

7.2 MEDIDAS PARA EL CONTROL Y MANEJO DE LAS INUNDACIONES

Las medidas para el control y el manejo de las inundaciones pueden ser de tipo estructural y no estructural. Las medidas estructurales son aquellas que modifican el sistema fluvial evitando o mitigando los daños generados por las crecientes, en tanto que las medidas no estructurales son aquellas en que la magnitud de los daños se reduce como consecuencia de una mejor convivencia de la población con las crecientes. Las medidas estructurales son todas aquellas obras de ingeniería (diques, presas, canales de desviación, etc.) en las cuales se interviene el sistema fluvial natural afectando sus procesos hidrodinámicos y morfológicos. Estas intervenciones pueden originar efectos adversos en el sistema fluvial que requerirán para su manejo y control la construcción de nuevas obras.

Las medidas estructurales no pueden ser proyectadas para dar una protección total, ya que esto exigiría una protección contra la mayor creciente posible, lo cual física y económicamente no es factible. Es decir, las medidas estructurales no permiten controlar o evitar por completo las inundaciones, solamente tienden a minimizar los impactos originados por éstas (Tucci et al., 2003). Una medida estructural puede crear una falsa sensación de seguridad, generando una mayor ocupación de áreas inundables, lo cual podría ocasionar daños significativos cuando se presenten inundaciones superiores al evento de diseño.

En consecuencia, el control y el manejo más eficaz de las inundaciones se obtiene al establecer estrategias que combinen las medidas estructurales y no estructurales, permitiendo a la población minimizar las pérdidas y lograr una convivencia armónica con el río. Es decir, las medidas no estructurales complementan con gran efectividad las actuaciones estructurales por encima de su umbral de protección.

El costo de protección de un área inundable a través de medidas estructurales, en general, es superior al de las medidas no estructurales. Por esta razón, las medidas no estructurales en conjunto con las estructurales pueden disminuir significativamente los daños con un costo menor.

7.2.1. Medidas estructurales

Las medidas estructurales son obras de ingeniería construidas para reducir el riesgo originado por las crecientes. Estas medidas pueden ser extensivas o intensivas. Las medidas extensivas son aquellas que cubren toda la cuenca, procurando modificar la relación entre precipitación y caudal, como por ejemplo, un cambio en la cobertura vegetal del suelo, la cual reduce y retarda los picos de las crecientes y controla la erosión de la cuenca.

Las medidas intensivas son aquellas que se enfocan en el río y pueden ser de tres tipos: (i) obras que aceleran el escurrimiento, como son la construcción de diques, el aumento de la capacidad de descarga de los ríos y el corte de meandros; (ii) obras que regulan la creciente, como por ejemplo, las presas; y, (iii) obras que desvían parte del caudal, como son los

canales de desvíos. En la Tabla 7.1 se presentan las principales características de las medidas estructurales.

Tabla 7.1. Descripción de las principales obras estructurales para control de las crecientes e inundaciones.

Medidas		Ventaja	Desventaja	Aplicación
Extensivas	Cambio de la cobertura vegetal	Reducción pico de la creciente	Impracticable para grandes áreas	Cuencas pequeñas
	Control de pérdidas	Reducción del escurrimiento	Impracticable para grandes áreas	Cuencas pequeñas
Intensivas	Construcción de diques	Alto grado de protección	Generación de grandes daños si fallan	Ríos grandes
	Reducción de la rugosidad por desobstrucción	Aumento en la capacidad de drenaje con poca inversión	Efecto localizado	Ríos pequeños
	Corte de meandros	Aceleración del escurrimiento	Impacto negativo en ríos aluviales	Áreas de inundación estrechas
	Construcción de represas	Regulación de la creciente	Difícil localización	Cuencas medianas
	Canales de desvío	Reducción del caudal en el canal principal	Dependencia de la topografía	Cuencas medianas y grandes

7.2.2. Medidas no estructurales

Las medidas no estructurales corresponden al conjunto de programas y actividades que permiten tener una mejor convivencia con las crecientes, minimizando las pérdidas que éstas pueden generar en las áreas inundables. Entre las medidas de protección no estructurales se tienen: los mapas de amenaza y de riesgos por inundación, los sistemas de previsión y alertas de inundaciones, los programas de protección civil y los programas de seguros contra crecientes.

En una clasificación más general Jonson (1978) identificó las siguientes medidas no estructurales: creación de aberturas en las estructuras, levantamiento de las estructuras existentes, construcción de nuevas estructuras sobre pilotes, construcción de pequeñas paredes o diques circundando una estructura, relocalización o protección de artículos que puedan resultar afectados dentro de una estructura, reubicación de estructuras por fuera del área de inundación, construcción de cerramientos con materiales resistentes al agua, implementación de un código de construcciones adecuado, compra de áreas inundables, seguros contra inundaciones, instalación de sistemas de previsión y alerta con planes de evacuación, adopción de incentivos fiscales para un uso prudente del área inundables, instalación de avisos de alerta en áreas inundables y adopción de políticas de desarrollo que impongan restricciones de uso a las áreas inundables.

7.3. MAPAS DE AMENAZAS POR AVENIDAS TORRENCIALES

Los mapas de amenaza por inundaciones constituyen una medida no estructural para el control de inundaciones. Estos mapas son modelos que permiten la evaluación y predicción de las consecuencias de un evento de precipitaciones extraordinarias; es decir, permiten identificar, clasificar y valorar las áreas potencialmente inundables del territorio.

La condición de amenaza se presenta únicamente cuando ocurre un evento natural en un área ocupada por actividades humanas (elementos expuestos) que deben soportar las consecuencias de dicho evento. En consecuencia, el riesgo puede dividirse en tres componentes estrechamente interrelacionados: la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición.

La amenaza o peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural con una cierta magnitud, generalmente de carácter sorpresivo y de evolución rápida, que afecta a un componente o a la totalidad del sistema territorial expuesto. En consecuencia, las inundaciones constituyen las amenazas, que son el resultado de la combinación de la tipología, las características de los eventos lluviosos y el conjunto de factores físicos del área afectada. Desde esta perspectiva, la diferencia fundamental entre la amenaza y el riesgo es que la primera se refiere a la probabilidad de que se manifieste un evento natural, mientras que el segundo está relacionado con la probabilidad de que se den ciertas consecuencias (Fournier, 1985).

La vulnerabilidad se refiere a la predisposición o susceptibilidad de los componentes antrópicos del sistema territorial para ser dañados total (destrucción) o parcialmente (deterioro) debido al impacto de la amenaza. Representa la medida de probabilidad de daño o pérdida de un componente o sistema territorial expuesto a la acción de la amenaza. La vulnerabilidad depende de dos condiciones: la ubicación del componente respecto a la zona de impacto de la amenaza (exposición) y las características y el estado de conservación del mismo. Por tanto, la vulnerabilidad es esencialmente una condición humana (Lavell, 1994).

La exposición o elementos en riesgo se refiere a la distribución espacial de la población, actividades económicas, bienes materiales, obras de ingeniería, etc., sobre las que puede impactar la amenaza. En consecuencia, el riesgo de las inundaciones depende de la ocurrencia y magnitud de la amenaza natural y de la vulnerabilidad de un elemento o sistema territorial expuesto a ella.

Un desastre natural constituye la ocurrencia efectiva y real del riesgo que, debido a la vulnerabilidad de los elementos expuestos, causa efectos negativos sobre los mismos. En el caso de las inundaciones, la manifestación del desastre se presenta cuando el impacto de los desbordamientos supera los mecanismos de defensa adoptados por la sociedad, generando perjuicios económicos, sociales, físicos, etc. Así, para que un evento de desbordamiento se convierta en desastre es necesario que sus consecuencias tengan un impacto en una estructura humana vulnerable. Por esta razón, no todos los eventos de precipitaciones

fuertes o constantes pueden ser considerados como amenazas, por cuanto su peligrosidad depende del grado de vulnerabilidad de los elementos expuestos al riesgo.

Para la evaluación del riesgo de inundaciones es necesario determinar, en primer término, los mapas de amenazas (mapa de inundación) y de vulnerabilidad, para posteriormente integrarlos, obteniendo el mapa de riesgos.

La realización de una cartografía de riesgo es un paso previo ineludible a la puesta en práctica de cualquier tipo de medida no estructural y, por tanto, esencial para poder llevar a cabo una gestión eficaz de las zonas inundables (CEDEX *et al.*, 2002).

7.3.1. Clasificación de la amenaza en planicies de inundación

El estado del arte en los criterios de evaluación de la magnitud del evento está basado en las combinaciones de factores hidrodinámicos y características del terreno sobre el cual actúa el fenómeno. En general, la magnitud e intensidad de la amenaza, originada por el desbordamiento de un río, en una planicie de inundación se ha establecido a partir de cuatro criterios (Oñate *et al.*, 2002):

1. Magnitud e intensidad asociada a las profundidades de agua. Se estima que profundidades de agua superiores a cierto valor pueden causar daños importantes. Este criterio es el más utilizado y en algunas ocasiones el único implementado por las entidades encargadas de la administración de los recursos hídricos.

2. Magnitud e intensidad asociada a la velocidad del flujo. Se fundamenta en el peligro que representa para las personas y los vehículos la capacidad de arrastre y erosión de flujos de agua de altas velocidades.

3. Magnitud e intensidad asociada a la combinación de las profundidades de agua y las velocidades. A partir de ciertos valores esta combinación resulta peligrosa e impide que las personas permanezcan de pie o puedan maniobrar a través del flujo. Este criterio fue propuesto en la última década utilizando una cantidad limitada de datos experimentales. En la actualidad se están desarrollando experimentos tendientes a determinar la profundidad y la velocidad del flujo que generan inestabilidad en las personas.

4. Magnitud e intensidad asociada a la capacidad del flujo para generar erosión y transportar escombros.

Adicionalmente, el tiempo de duración de la creciente es otro parámetro importante en la determinación de la magnitud e intensidad de la amenaza por inundaciones.

7.3.2. Mapas de inundación para crecientes con periodos de retorno de 10, 30 y 100 años

Los mapas de inundación en el municipio de La Unión fueron generados utilizando el modelo ArcGIS con base en los resultados de la modelación hidrodinámica de las crecientes simuladas a través del modelo FLO-2D para los diferentes periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.

La generación de los mapas de inundación requeridos para implementar la metodología establecida para la determinación de la amenaza requiere estimar inicialmente los caudales extremos asociados a los diferentes periodos de retorno en cada una de las fronteras del modelo hidrodinámico (definidas en los cauces existentes, como las quebradas La Unión y El Rincón, los zanjones Negro y Los Muertos y la cañada El Lucero).

7.3.3. Determinación de caudales extremos

La extensión de las áreas inundadas durante un desbordamiento está asociada al caudal que genera la creciente. Entre mayor sea el caudal que discurre por el cauce mayores serán las áreas que resultarán anegadas. Los caudales que generan crecientes corresponden a eventos extremos que afectan eventualmente los sistemas hidrológicos. La magnitud de estos caudales está inversamente relacionada con la frecuencia de ocurrencia (caudales muy extremos se presentan con una frecuencia muy baja) a través de un análisis basado en distribuciones de probabilidad.

El número promedio de años en que un caudal de determinada magnitud es igualado o excedido se define como el periodo de retorno o de recurrencia de ese caudal. El periodo de retorno es un concepto estadístico que no implica que un determinado caudal no pueda ser superado dos veces en un número de años menor al especificado por dicho período.

La determinación de los caudales extremos en los diferentes cauces involucrados se realizó mediante la modelación hidrológica (a través de la implementación del modelo HEC-HMS del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos) con base en los análisis de los registros de precipitaciones en las estaciones climatológicas localizadas en la zona de estudio.

7.3.4. Modelación hidrodinámica y generación de mapas de inundación

Para la modelación hidrodinámica de las crecientes y la posterior generación de los correspondientes mapas de inundación se realizó inicialmente un análisis preliminar de las características de las inundaciones que se presentan en las quebradas La Unión y El Rincón, el zanjón Negro y la cañada El Lucero. Las crecientes de estos cauces presentan duraciones relativamente variables. Sin embargo, en promedio las crecientes presentan una duración entre 8 y 12 horas. En este estudio se adoptó el valor más crítico registrado que corresponde a 15 horas para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.

La modelación hidrológica permitió determinar las hidrógrafas de caudales en las fronteras seleccionadas de los cauces de la zona de estudio, las cuales describen el comportamiento o

evolución temporal de las crecientes. Posteriormente, mediante la implementación del modelo hidrodinámico FLO-2D, se realizó el tránsito de las hidrógrafas de caudales, generando de esta manera los mapas de inundaciones. Los parámetros de calibración de los modelos hidrodinámicos se determinaron siguiendo la metodología descrita previamente en la Sección 6.2.

7.3.5. Modelación hidrodinámica y generación de mapas de inundaciones por escenarios

La modelación hidrodinámica de las crecientes de los cauces y la escorrentía superficial de las lluvias correspondientes a los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años se inicia definiendo la zona de modelación, la cual debe incluir el área urbana y de expansión urbana del municipio. La quebrada La Unión es el cauce principal que atraviesa el municipio; la quebrada El Rincón, los zanjones Negro y Los Muertos y la cañada El Lucero son cauces importantes que atraviesan el casco urbano. Después de definir las hidrógrafas de caudales como condiciones hidrodinámicas en las fronteras del modelo se procedió a realizar la simulación hidrodinámica siguiendo las diferentes etapas como se describió detalladamente en la Sección 6.2 (implementación del modelo, análisis de sensibilidad, calibración y simulación de escenarios). Con base en los resultados del modelo hidrodinámico FLO-2D se generaron los mapas de inundación utilizando el software ArcGIS.

Los mapas de inundaciones obtenidos para cada periodo de retorno se presentan en las Figuras 7.1 a 7.3. En estos mapas se presentan los tres niveles de intensidad (alta, media y baja) definidos en la metodología de amenaza establecida para la profundidad de inundación.

Una vez obtenidos los mapas de inundaciones para los eventos correspondientes a periodos de retorno de 10, 30 y 100 años se procedió a implementar la metodología de amenaza (niveles de intensidad vs. niveles de frecuencia) para determinar los mapas de amenaza por inundaciones, permitiendo así establecer en cada escenario los niveles de amenaza (alta, media y baja) (Figuras 7.4 a 7.7) (también Mapas 7.1 a 7.4 respectivamente).

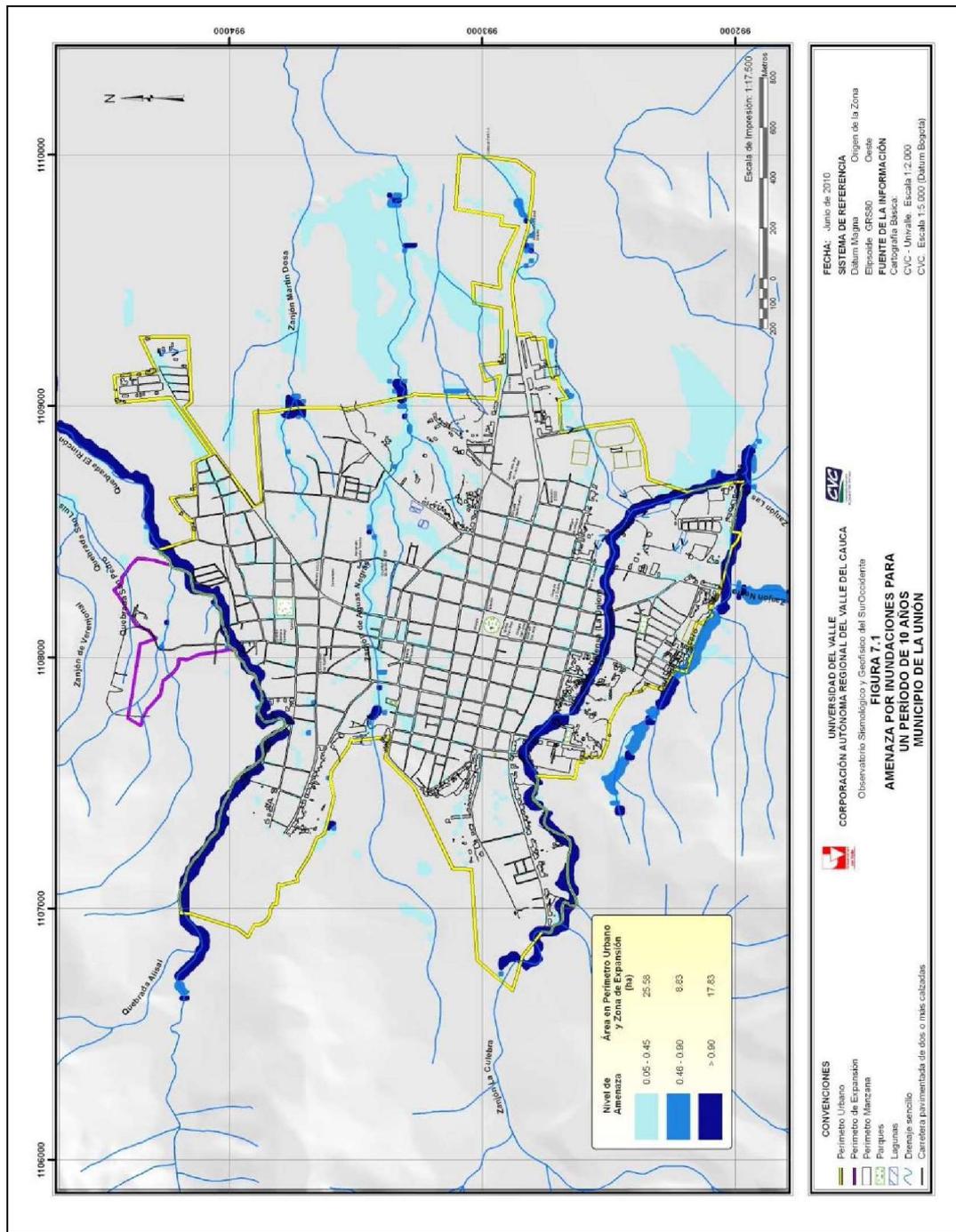


Figura 7.1 Inundaciones para un periodo de retorno de 10 años.

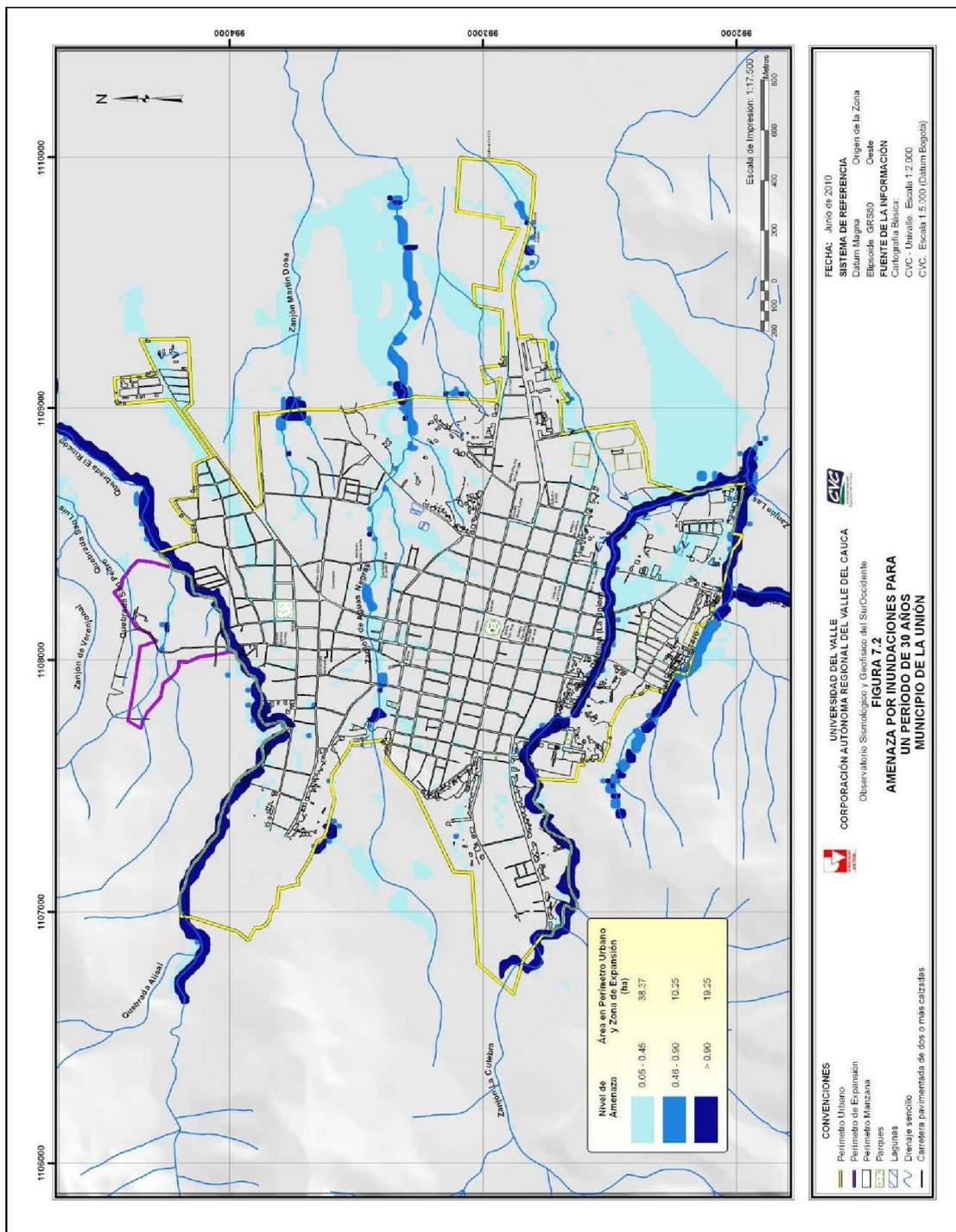


Figura 7.2 Inundaciones para un periodo de retorno de 30 años.

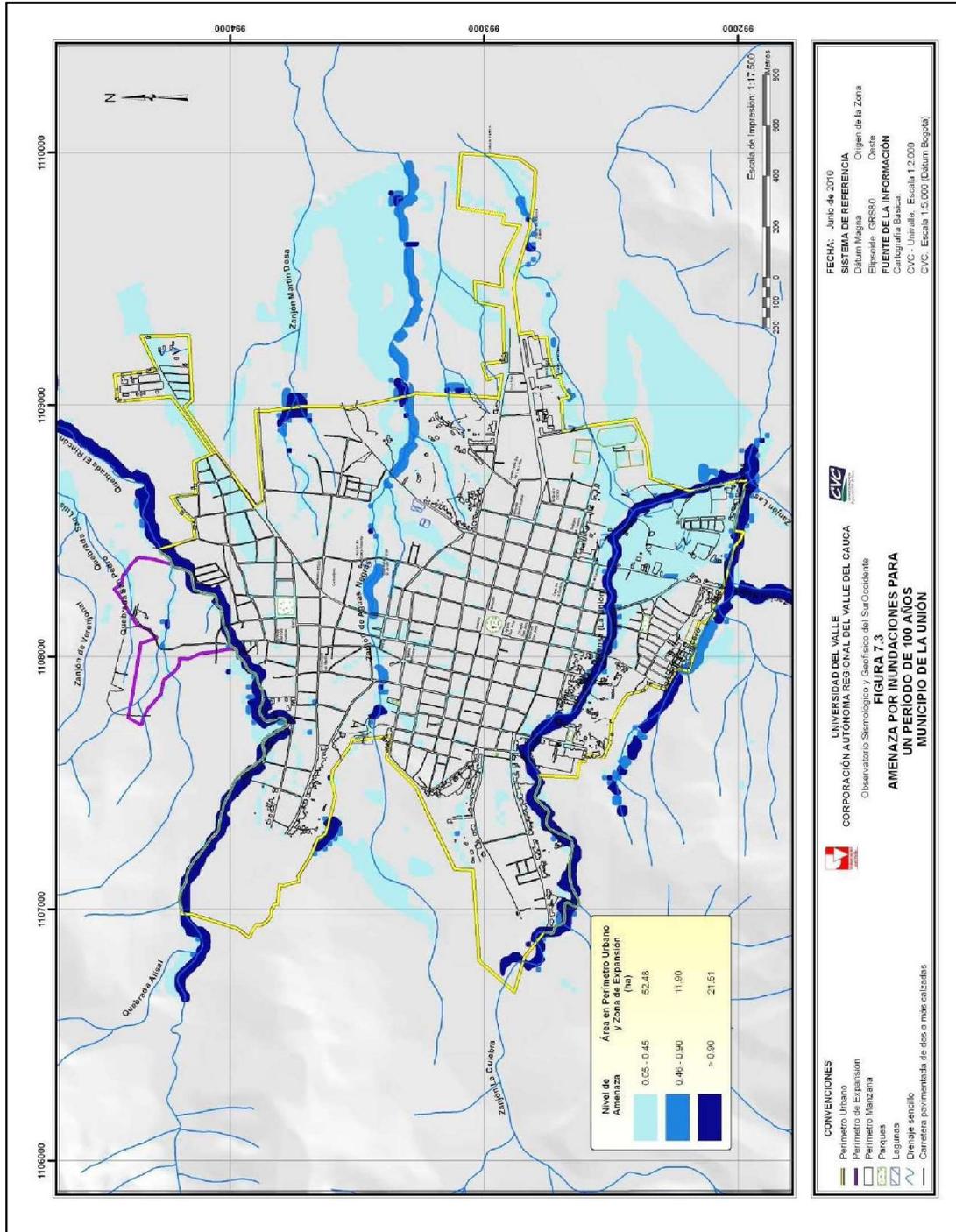


Figura 7.3 Inundaciones para un periodo de 100 años.

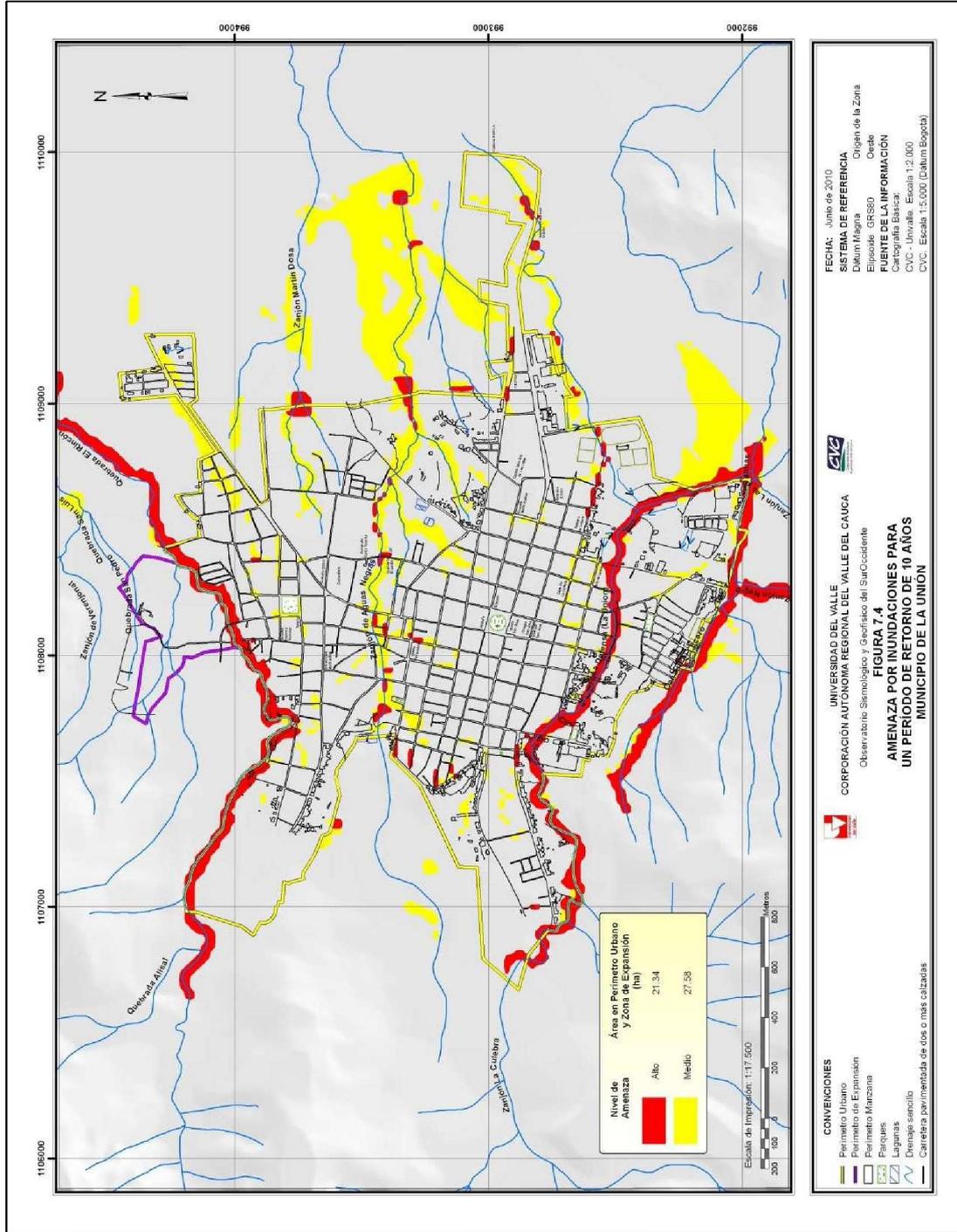


Figura 7.4 Amenaza por inundaciones para un periodo de retorno de 10 años.

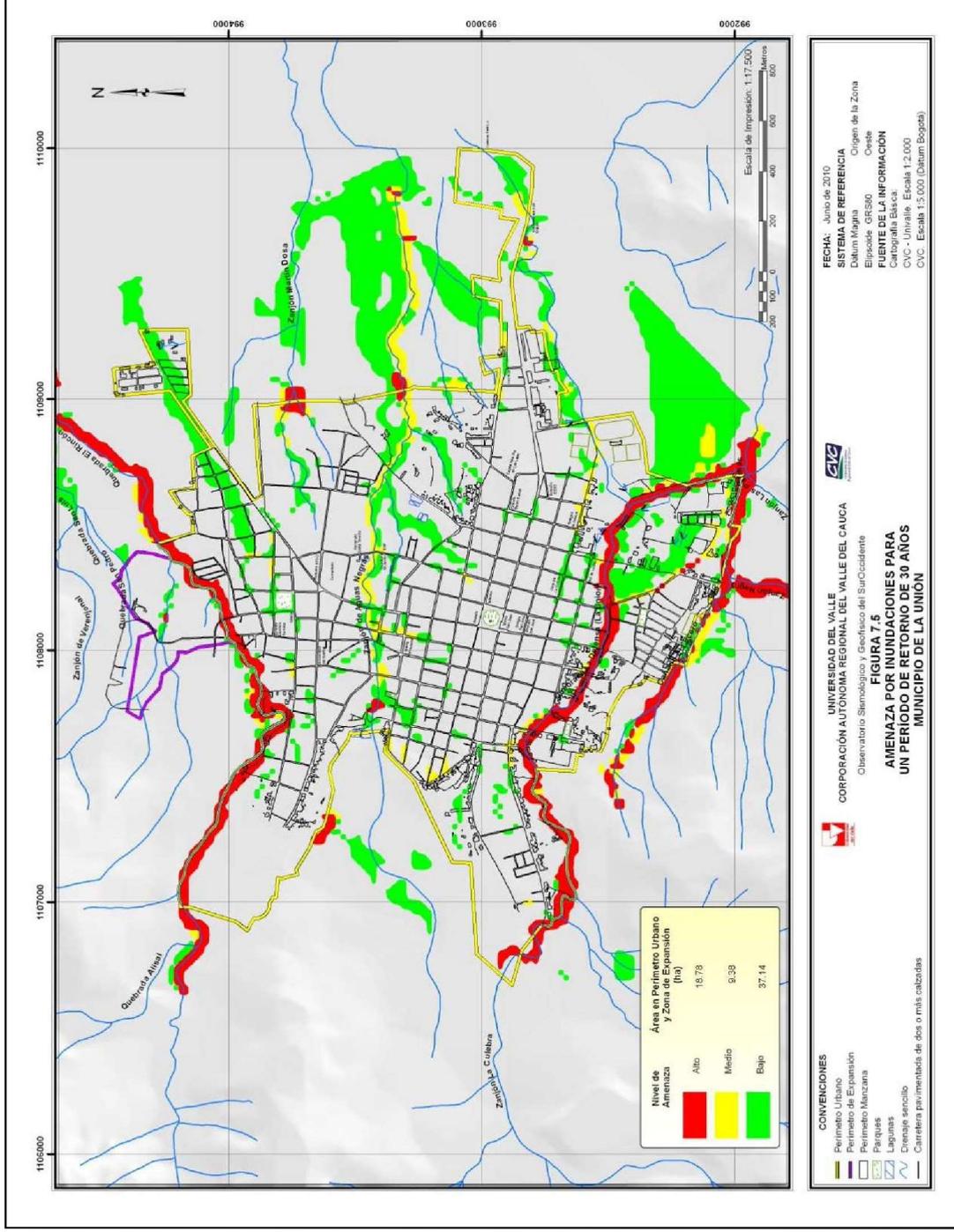


Figura 7.5. Amenaza por inundaciones para un periodo de retorno de 30 años.

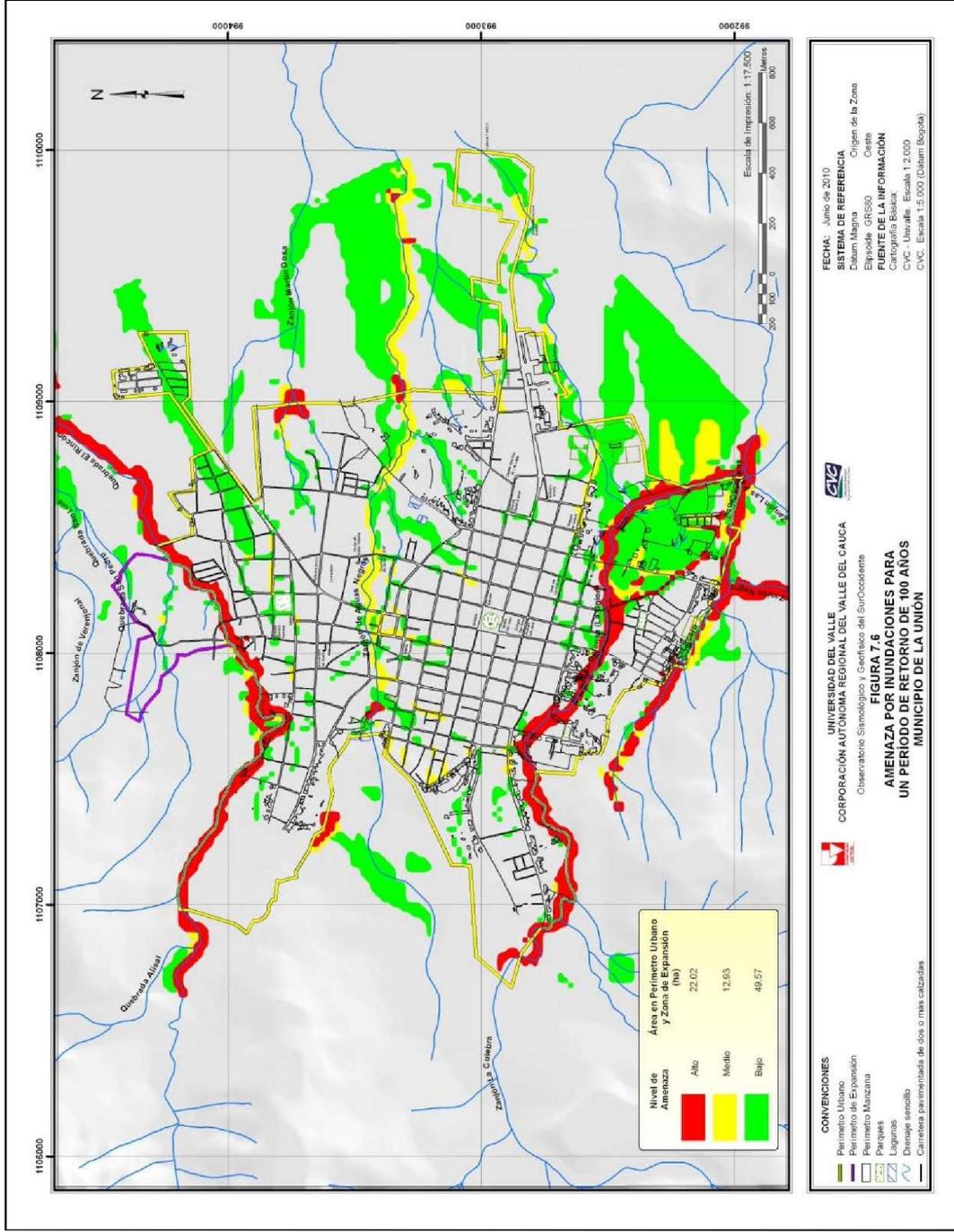


Figura 7.6 Amenaza por inundaciones para un periodo de retorno de 100 años.

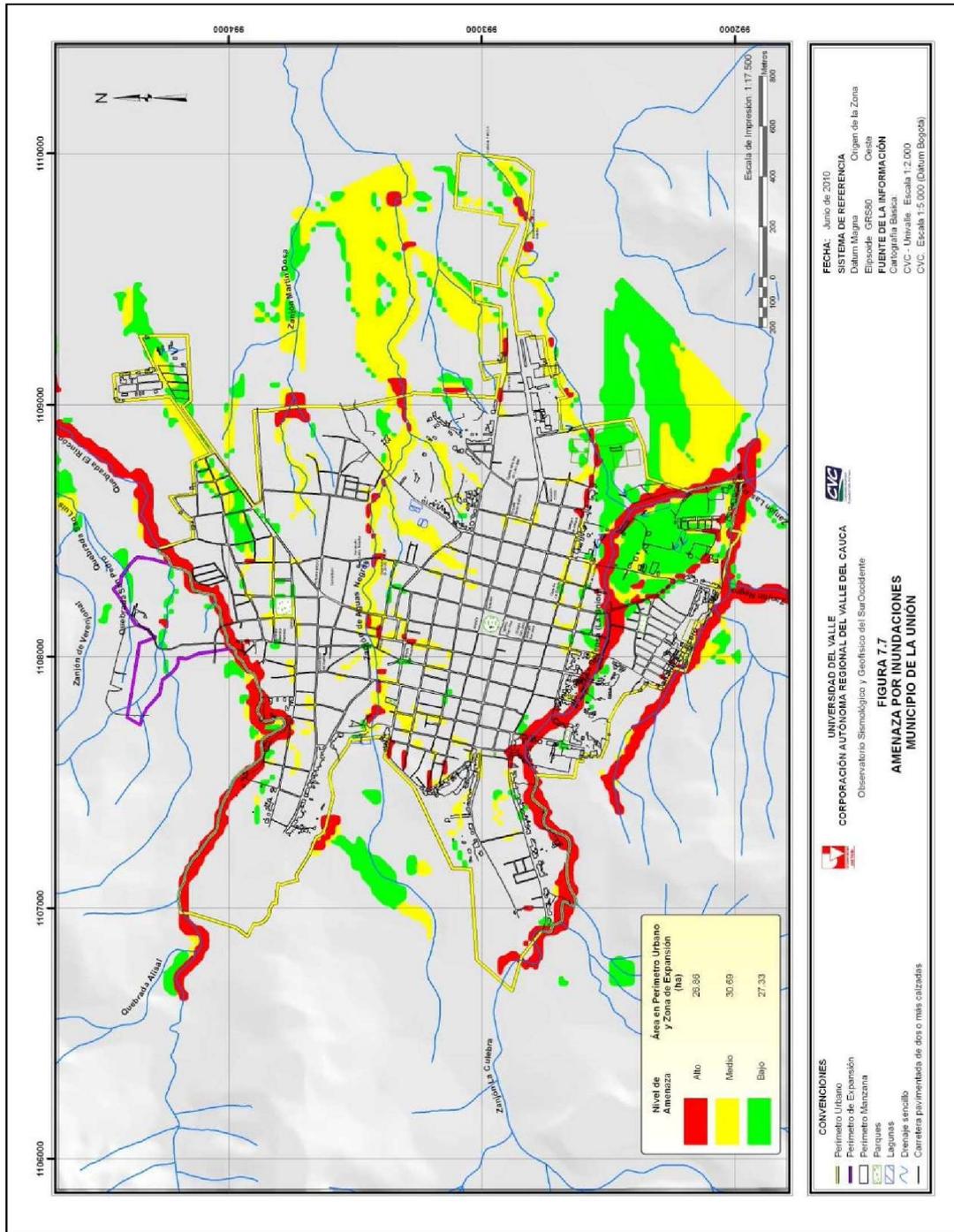


Figura 7.7. Amenaza por inundaciones.

7.4 GENERACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE AMENAZA GLOBAL POR INUNDACIONES

Para el fenómeno analizado (inundaciones) se determinó el mapa de amenaza global, considerando en cada espacio del territorio (o celda de la malla computacional) la situación o nivel de amenaza más crítico establecido para los tres periodos de retorno evaluados (10, 30 y 100 años).

El mapa de amenaza global por inundaciones finalmente obtenido para el municipio de La Unión se presenta en la Figura 120 (también Mapa 7.4). En este mapa se indica la zonificación de los diferentes niveles de amenaza por inundaciones.

En la Tabla 7.2 se presentan las áreas de la zona urbana y de expansión urbana que se encuentran expuestas a niveles de amenaza alto, medio y bajo por el fenómeno de inundaciones; los porcentajes de las áreas afectadas se calcularon teniendo en cuenta la extensión del área urbana actual del municipio de La Unión (331.16 ha) y el área de expansión urbana (14.658 ha).

Tabla 7.2. Áreas de la zona urbana y de expansión urbana amenazadas por avenidas torrenciales.

Escenario (Tr, años)	Área expuesta a amenaza alta (ha)		Área expuesta a amenaza media (ha)		Área expuesta a amenaza baja (ha)		Área total amenazada (ha)	
	Urbana	Expansión	Urbana	Expansión	Urbana	Expansión	Urbana	Expansión
10	20.741	0.603	27.579	0.000	0.000	0.000	48.32	0.603
30	18.152	0.632	9.378	0.000	36.483	0.655	64.013	1.287
100	21.492	0.532	12.777	0.154	48.390	1.185	82.659	1.871
Global	26.117	0.746	30.692	0.000	26.206	1.125	83.015	1.871
Porcentaje del área (%)	7.89	5.09	9.27	0.00	7.91	7.67	25.07	12.76

De acuerdo con estos resultados se puede afirmar que en forma global el 25.07% del área urbana (es decir, 83.02 ha) se encuentra amenazada por el fenómeno de inundaciones originadas por el desbordamiento de los cauces que atraviesan el municipio de La Unión y las aguas de escorrentía provenientes de la zona montañosa cercana a la cabecera municipal. También se debe destacar que la mayor área de la zona urbana expuesta a un nivel de amenaza alto (21.49 ha) y a un nivel de amenaza medio (27.58 ha), corresponden a las crecientes en los cauces con periodos de retorno de 100 y 10 años, respectivamente. También se debe destacar que la mayor área urbana amenazada (48.39) se encuentra expuesta a un nivel de amenaza bajo y corresponde a las crecientes en los cauces con periodos de retorno de 100 años. Por otra parte, el 12.76% de la zona de expansión urbana del municipio de La Unión se encuentra expuesta a algún grado de amenaza por el fenómeno de inundaciones, es decir, 1.87 ha. Asimismo, la mayor área de la zona de

expansión urbana que se halla expuesta a un nivel de amenaza alto (0.632 ha) corresponde a las crecientes en los cauces con periodos de retorno de 30 años.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

En el presente estudio inicialmente se determinaron los mapas de inundaciones originadas por las crecientes de las quebradas La Unión y El Rincón, el zanjón Negro y la cañada El Lucero para periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, en los cuales se indican las profundidades de agua en las zonas afectadas. Posteriormente se generó la cartografía de amenaza por inundaciones en la zona urbana y de expansión urbana del municipio de La Unión.

Los caudales correspondientes a las crecientes analizadas se calcularon a través de la modelación hidrológica a partir del análisis de los registros de las precipitaciones en las estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca de las quebradas La Unión y El Rincón, considerando lluvias críticas de 12 horas de duración. Para la generación de los mapas de inundaciones se construyó e implementó un modelo matemático bidimensional (FLO-2D) mediante el cual se simuló diferentes crecientes correspondientes a periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.

La cartografía de amenaza por inundaciones fue determinada aplicando la metodología propuesta mediante la cual se realiza la zonificación de las áreas inundadas de acuerdo con los niveles de intensidad y frecuencia de cada uno de los fenómenos, con base en los resultados de la modelación hidrodinámica y generando los mapas con el software ArcGIS.

La metodología propuesta establece tres niveles de amenaza según los rangos de frecuencia del fenómeno (representada en el periodo de retorno de la creciente) y el rango de magnitud o intensidad (representada por la profundidad de agua en las áreas inundadas, la velocidad de la corriente y el valor del producto de la profundidad por la velocidad, es decir, el caudal unitario). Las áreas sometidas a un nivel de amenaza alto se consideran no urbanizables, en las zonas expuestas a una amenaza media se prohíbe toda construcción, excepto parques, instalaciones agropecuarias, líneas de transmisión y conductos hidráulicos y en las zonas de amenaza baja se permite la construcción de viviendas y edificaciones de dos o más pisos, parques, instalaciones agropecuarias, industriales y comerciales, estacionamientos, áreas de almacenamiento, servicios básicos, líneas de transmisión, calles y puentes, siempre y cuando estén correctamente proyectados.

La cartografía de amenaza por inundaciones generada se constituye en una importante herramienta de apoyo que puede ser utilizada para la optimización de los planes de ordenamiento territorial del municipio de La Unión, la optimización de los sistemas de alerta y emergencia, el diseño y construcción de obras de protección y, en general, la gestión del riesgo. La cartografía de amenaza generada representa una medida no estructural para el control de estos fenómenos naturales.

Mapas de amenaza por inundaciones

Con base en los mapas de amenazas por inundaciones generados para los diferentes escenarios considerados (es decir, para las crecientes de periodos de retorno de 10, 30 y 100 años) se determinó la extensión de las áreas expuestas a algún nivel de amenaza, tanto en la zona urbana como en la de expansión urbana. También se determinaron los porcentajes de las áreas afectadas por este fenómeno teniendo en cuenta la extensión total de las zonas urbana (331.16 ha) y de expansión urbana (14.67 ha). El mapa global elaborado que muestra el nivel de amenaza más crítico hallado para cada celda o subárea del área de estudio arrojó los siguientes resultados:

Escenario (Tr, años)	Área expuesta a amenaza alta (ha)		Área expuesta a amenaza media (ha)		Área expuesta a amenaza baja (ha)		Área total amenazada (ha)	
	Urbana	Expansión	Urbana	Expansión	Urbana	Expansión	Urbana	Expansión
10	20.741	0.603	27.579	0.000	0.000	0.000	48.32	0.603
30	18.152	0.632	9.378	0.000	36.483	0.655	64.013	1.287
100	21.492	0.532	12.777	0.154	48.390	1.185	82.659	1.871
Global	26.117	0.746	30.692	0.000	26.206	1.125	83.015	1.871
Porcentaje del área (%)	7.89	5.09	9.27	0.00	7.91	7.67	25.07	12.76

Estos resultados muestran que 83.02 ha (25.07%) y 1.87 ha (12.76%) de las zonas urbanas y de expansión urbana, respectivamente, del municipio de La Unión se encuentran amenazadas por el fenómeno de inundaciones originadas por el posible desbordamiento de los cauces naturales y artificiales que lo atraviesan. Igualmente se observa que el 7.89% y el 9.27% del área urbana actual se encuentran expuestos a niveles de amenaza alta y media, respectivamente.

Los mapas de amenaza por inundaciones constituyen una importante herramienta de apoyo que puede ser utilizada para diferentes propósitos, tales como:

- Optimización de los planes de ordenamiento territorial del municipio, de acuerdo con los niveles de amenaza. Los mapas permiten identificar las zonas que presentan un mayor grado de amenaza, en las cuales se deben establecer fuertes restricciones de uso del suelo.
- Implementación y optimización de los sistemas de alerta y emergencia ante la ocurrencia de inundaciones. La predicción de la profundidad que alcanzaría el agua en la planicie de inundación, así como la velocidad del flujo y el producto de la profundidad por la velocidad, permiten estimar el posible impacto generado por una creciente y, en consecuencia, establecer prioridades en las actividades a implementar (medidas no estructurales) antes, durante y después de los desbordamientos.
- Diseño de obras de protección, mitigación y/o control. Los mapas de amenaza indican las zonas potencialmente inundables, por lo cual permiten plantear y analizar diferentes alternativas de obras (medidas estructurales) que conduzcan a la prevención, mitigación y/o

control del fenómeno y definir finalmente la alternativa más apropiada considerando los diferentes aspectos sociales, ambientales, técnicos y económicos.

- La cartografía de inundaciones generada constituye una herramienta útil para el análisis de la amenaza asociada a inundaciones que resulta indispensable para la determinación de la vulnerabilidad y la cuantificación del riesgo (escenarios de afectación) por este fenómeno. Esta cuantificación representa el paso inicial para la evaluación del riesgo.

8.2. RECOMENDACIONES

Los mapas de amenaza generados debido a la posible ocurrencia de los fenómenos de inundaciones deben ser empleados para la determinación de la vulnerabilidad y la cuantificación y evaluación del riesgo, y finalmente para el reordenamiento del territorio del municipio de La Unión teniendo en cuenta los diferentes grados o niveles de amenaza establecidos, así:

- Nivel de amenaza alto: zona en la cual pueden ocurrir daños severos en núcleos urbanos poniendo en riesgo la estabilidad de las estructuras y la integridad de sus ocupantes. Esta zona no debe urbanizarse y debe contar con una protección especial. Se debe realizar el diseño y construcción de estructuras de protección para reducir este nivel de amenaza en las zonas ya construidas; de lo contrario, se requiere planear y ejecutar su reubicación.

- Nivel de amenaza medio: zona en la cual pueden ocurrir daños moderados en núcleos urbanos (eventualmente se podría llegar a poner en riesgo la estabilidad de las estructuras y la integridad de sus ocupantes). Se debe prohibir todo tipo de construcción, exceptuando parques, instalaciones agropecuarias, líneas de transmisión y conductos hidráulicos. Se debe realizar el diseño y construcción de estructuras de protección para reducir este nivel de amenaza en las zonas ya construidas; de lo contrario, se requiere planear y ejecutar la reubicación de las diferentes construcciones con excepción de parques, instalaciones agropecuarias, líneas de transmisión y conductos hidráulicos.

- Nivel de amenaza bajo: zona en la cual pueden presentarse daños leves en núcleos urbanos. Se permiten las siguientes construcciones: (a) viviendas y edificaciones de dos o más pisos, donde el segundo piso quedará por lo menos en el nivel del límite de la crecida, y protegidas estructuralmente contra crecidas; (b) parques, actividades de recreación y deportivas; (c) instalaciones agropecuarias; (d) instalaciones industriales, comerciales, estacionamientos y áreas de almacenamiento; (e) servicios básicos, líneas de transmisión, calles y puentes, siempre y cuando estén correctamente proyectados. Se recomienda realizar el diseño y construcción de estructuras de protección y mitigación (diques, muros, obras de desviación de caudales, drenajes, etc.) para minimizar este nivel de amenaza.

Medidas estructurales

Se recomienda plantear, dimensionar y evaluar, considerando los aspectos social, ambiental, técnico y económico, distintas medidas estructurales (obras) orientadas a la prevención, mitigación y/o control de los desbordamientos durante las crecientes de las quebradas La Unión y El Rincón, el zanjón Negro y la cañada El Lucero; esto con el fin de evitar o reducir magnitud e intensidad de la amenaza por inundaciones. Entre estas medidas se pueden considerar las siguientes: obras de protección de orillas, chequeos de la capacidad de las estructuras hidráulicas existentes (puentes y box culverts), mejoramiento de las condiciones hidráulicas mediante dragado de los cauces al paso por la ciudad de La Unión, construcción de diques y obras de protección.

En todos los cauces se recomienda realizar un trabajo educativo y de vigilancia para que estos cauces no sigan cumpliendo la función de alcantarilla y depósito de basuras y escombros al paso por la ciudad.

Medidas no estructurales

Las medidas no estructurales, solas o en conjunto con las estructurales, pueden minimizar significativamente las afectaciones de los elementos expuestos en las áreas amenazadas y, por ende, disminuir los costos de los posibles daños. Entre las principales medidas estructurales recomendadas se tienen las siguientes:

- Se debe tener en cuenta que las corrientes naturales de agua deben contar, por ley, con una franja forestal protectora que actúa como zona de carga y descarga, además de ofrecer una vegetación específica (vegetación riparia) de especial importancia para las corrientes de agua naturales. En el perímetro urbano del municipio de La Unión se encuentran muchas viviendas ocupando esta franja o ronda de los cauces que recorren la ciudad. Se recomienda entonces la reubicación de las viviendas que estén ubicadas sobre estas zonas.

- El zanjón Moral, por ser un cauce intermitente, es utilizado como vía; se recomienda el trazado y construcción de vías de acceso con el fin de corregir esta situación.

- Realizar un inventario de las viviendas construidas sobre las franjas protectoras y sobre el lecho de los cauces de las quebradas La Unión, El Rincón y el zanjón Moral con el fin de evitar la proliferación de estos asentamientos subnormales.

- Sistemas de pronóstico y alerta temprana: tienen la finalidad de anticiparse a la ocurrencia de la inundación, avisando a la población para la oportuna evacuación de las áreas potencialmente afectadas por el fenómeno y tomando las medidas necesarias para reducir los perjuicios resultantes de la inundación. Para el sistema de pronóstico se requiere de un sistema de monitoreo (registro continuo y permanente de precipitaciones y niveles de agua en la parte alta de la cuenca de las quebradas El Rincón y la Unión) y transmisión telemétrica a un centro de pronósticos.

- Elaboración y desarrollo de programas de prevención, educación y alerta, dirigidos a toda la población, incluyendo hospitales, escuelas, instituciones públicas y privadas, industrias, infraestructura.

- Se recomienda diseñar e implementar un programa de mediciones de campo orientado a la recolección de información durante la ocurrencia de los fenómenos de inundaciones en el municipio de La Unión: el programa debe permitir la toma de datos e información sobre las características más importantes de los eventos catastróficos, tales como, registro de niveles de agua, duración de las crecientes, límites de áreas inundadas o afectadas, profundidades de agua en las diferentes zonas afectadas. El análisis de la información recolectada permitirá la optimización y actualización del modelo hidrodinámico en el presente estudio.

9. BIBLIOGRAFÍA

9. BIBLIOGRAFÍA

- Plan Básico de Ordenamiento Territorial del municipio de La Unión. (2001-2009).
- CVC (2008). S.O.S. por el Valle del Cauca – Municipio de La Unión. Publicación No. 24.
- GARCÍA, D. F. (2003). Hidráulica y transporte de sedimentos en ríos de montaña. Universidad de los Andes. Santafé de Bogotá, Colombia.
- LÓPEZ, R. (2005). Resistencia al flujo de ríos de montaña: desarrollo de ecuaciones de predicción. España.
- PARKER, G., KLINGEMAN, P.; McLean, D. (1982). Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams. *Journal of Hydraulic Div., ASCE*, Vol. 108 No. HY4, 1982, pp. 544 – 571.
- PARKER, G. (1990). Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. En: *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 28, 1990, No. 4. Pags. 417 – 436.
- PARKER, G. (1990). The “Acronym” series of Pascal programs for computing bedload transport in gravel rivers. External Memorandum No. M-220. University of Minnesota, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory.
- BUNTE, K. y R. ABT, S. (2001). Sampling surface and subsurface particle – size distribution in wadable Gravel –and cobble– bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring.
- Metodología establecida por la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones de España, (1995).
- PATRICOVA, (2002). Metodología planteada por el Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana.
- Gobierno de Aragón – Iberinsa, (2005). Metodología propuesta en el Plan Medioambiental del río Ebro y tramo bajo del río Cinca.
- CVC-Universidad del Valle, (2007). Metodología implementada para la generación de mapas de inundación en la llanura aluvial del río Cauca. Proyecto de modelación río Cauca – Proyecto PMC.
- Convenio 168 de 2003 – CVC/Universidad del Valle (2005). Formulación de Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas en el Valle del Cauca.

- RODRÍGUEZ, J.J. y O'BRIEN, J.S. (2001). Metodología para delimitación de mapas de amenaza propuesta por R. García.
- Estados Unidos, (2004). Metodología aplicada en el cono aluvial del cauce Jones Creek y propuesta por Kerr Word Leital Associates Limited para el Departamento de Obras Públicas del Condado de Whatcom.
- O'BRIEN, J.S. (2009). Manuales del modelo matemático bidimensional FLO-2D.
- Agencia Catalana del Agua. (2003). Recomendaciones técnicas para los estudios de inundabilidad locales. Guía técnica. Cataluña.
- ALCANTARA-AYALA, I., (2002). Geomorphology, natural hazard, vulnerability and prevention of disasters in developing countries. *Geomorphology* 47, 107 – 124.
- AYALA, F.J., 1993. Estrategias para la reducción de desastres naturales. *Investigación y Ciencia* 200, 6 -13.
- CHARDON, A., 1999. A geographic approach of the global vulnerability in urban area: case of Manizales, Colombian Andes. *GeoJournal* 49, 197-212.
- CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, CVC. (1985). Salvajina “El Parto de una Quimera”. Cali.
- CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, CVC – INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN GEOCIENCIAS MINERAS Y QUIMICA, INGEOMINAS. Zonificación de Amenazas y Riesgo por Avenidas Torrenciales en la Cabecera Municipal de Florida-Valle del Cauca. Santa Fe de Bogotá, Marzo de 1998.
- CUNGE, J.A, Holly, F.M., Verwey A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*, Pitman Publishing Limited. Londres.
- ETXEBERRIA Ramírez P, Brazaola Rojo A, Edeso Fito J. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Grafica, Cartografía de Peligro de Inundaciones Mediante Sistemas de Información Geográfica y Modelos Hidrológicos e Hidráulicos. Santander, España – 5-7 junio de 2002.
- INSTITUTO NICARAGUENSE DE ESTUDIOS TERRITORIALES. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. Proyecto MET-ALARN INETER/COSUDE “INUNDACIONES FLUVIALES MAPAS DE AMENAZA”. Recomendaciones técnicas para su elaboración. Managua, Nicaragua, agosto 2005.

- JIMÉNEZ, F.; Faustino, G.; Velásquez, S. 2004. Análisis integral de la vulnerabilidad de amenazas naturales en cuencas hidrográficas de América Latina. CATIE.
- KLAUS, J., Pflugner, W., Schmidtke, R., Wind, H., Green, C., 1995. Models for flood hazard assessment and management. En: Penning-Rowell, E.C., Fordham, M. (Eds.), *Floods Across Europe. Hazard Assessment, Modeling and Management*. Middlesex University Press, Londres. Pp. 69-106.
- LAVELL, A. 1996. Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. *In Ciudades en Riesgo*. Comp.MA, Fernández. Peru, La Red. ,p. 21-59.
- LEONELLI, M. 2000. Prevención, atención y mitigación de desastre: un enfoque global. Taller de mitigación de desastres naturales. San Pedro Sula Honduras del 7-9 diciembre 2000. 85p.
- MARTIN VIDE, J. P. (1997). *Ingeniería Fluvial*. Escuela Colombiana de Ingeniería, Santa Fe de Bogotá.
- MAZA ÁLVAREZ, J. A. (1987). *Introducción a la Ingeniería de Ríos*. Universidad Italiana per Stranieri, Perugia.
- Metodología Establecida por la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones en España. España en 1995.
- MONSALVE SÁENZ, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Escuela Colombiana de Ingeniería, Santa Fe de Bogotá.
- SETH E. STUDLEY. *Estimated Flood-Inundation Maps for Cowskin Creek in Western Wichita, Kansas*. Water-Resources Investigations Report 03-4074. Lawrence, Kansas 2003.
- RIVERA Torres Lisandro, Solís Hernán, Jiménez Francisco, Faustino Jorge. Evaluación de la amenaza y vulnerabilidad a inundaciones en la microcuenca La Soledad, Valle de Ángeles, Honduras. *Recursos Naturales y Ambiente/n° 43*.
- SECRETARIA DE ESTADO DE INTERIOR DE ESPAÑA. (1995). *Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones*. España.
- UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, CVC. (2005). *Optimización y aplicaciones de los modelos hidrodinámico, sedimentológico y morfológico del río Cauca. Tramo La Balsa – La Virginia*. Cali.

- UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, CVC. (2001). Modelación matemática del río Cauca. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.
- VAN RIJN, L. C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, New Netherlands.

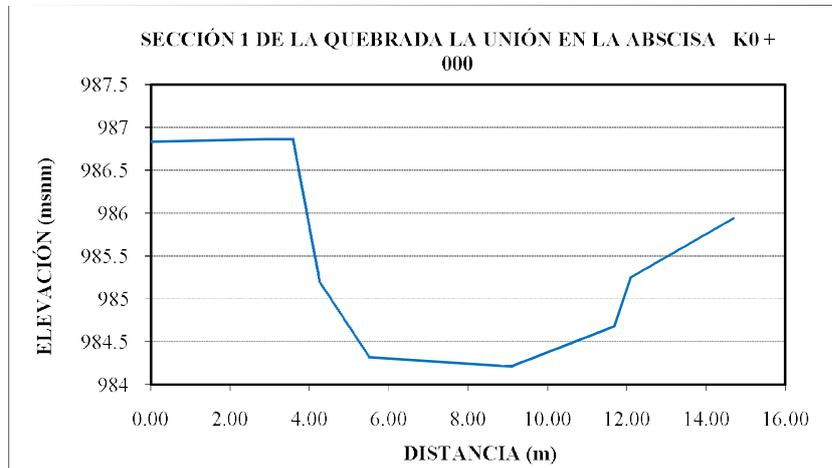
10. ANEXOS

Anexo 2.1 Secciones transversales de los cauces de estudio en el municipio de La Unión

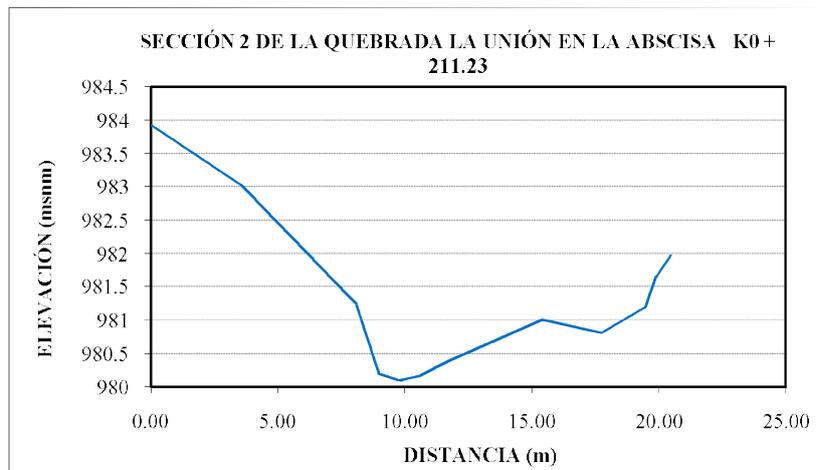
ANEXO 2.1. SECCIONES TRASVERSALES DE LOS CAUCES DE LA ZONA DE ESTUDIO DEL MUNICIPIO DE LA UNIÓN

SECCIONES TRASVERSALES DE LA QUEBRADA LA UNIÓN

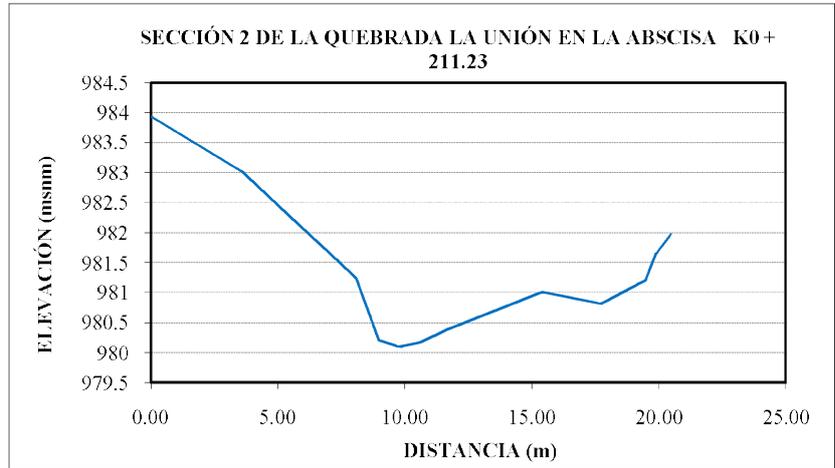
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	986.83
3.57	986.87
4.25	985.20
5.50	984.32
9.07	984.21
11.69	984.68
12.09	985.25
14.69	985.94



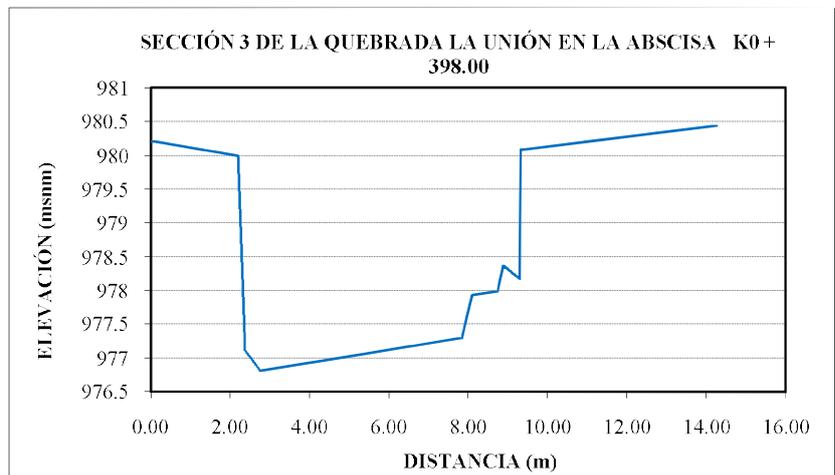
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	983.93
3.56	983.02
8.09	981.23
8.98	980.20
9.78	980.09
10.61	980.17
11.70	980.38
15.42	981.01
17.72	980.81
19.49	981.20
19.90	981.65
20.49	981.97



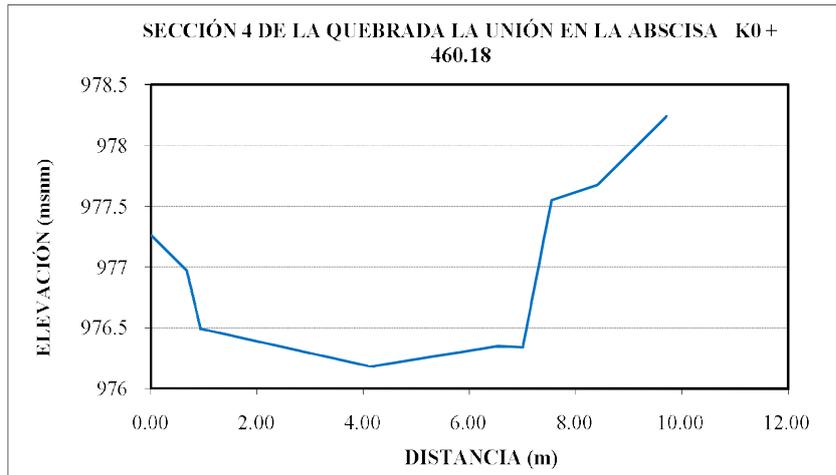
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	983.93
3.56	983.02
8.09	981.23
8.98	980.20
9.78	980.09
10.61	980.17
11.70	980.38
15.42	981.01
17.72	980.81
19.49	981.20
19.90	981.65
20.49	981.97



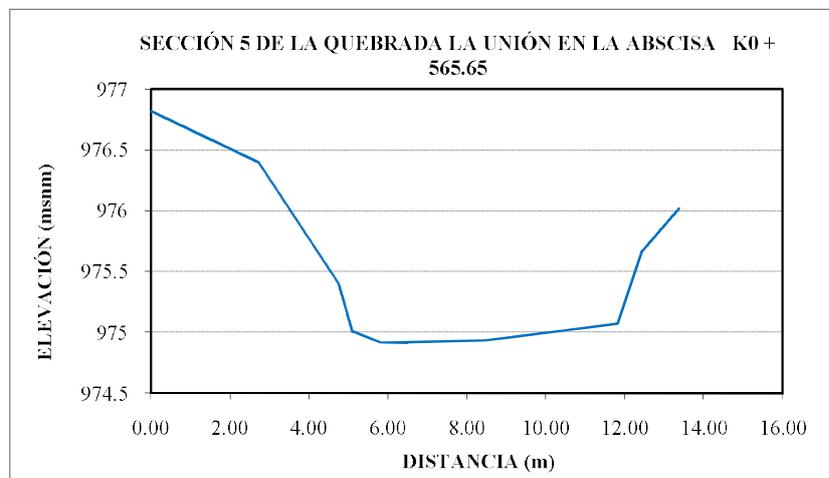
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	980.21
2.20	979.99
2.36	977.12
2.76	976.81
7.84	977.30
8.10	977.93
8.74	977.99
8.88	978.37
9.30	978.17
9.33	980.09
9.38	980.08
14.26	980.44



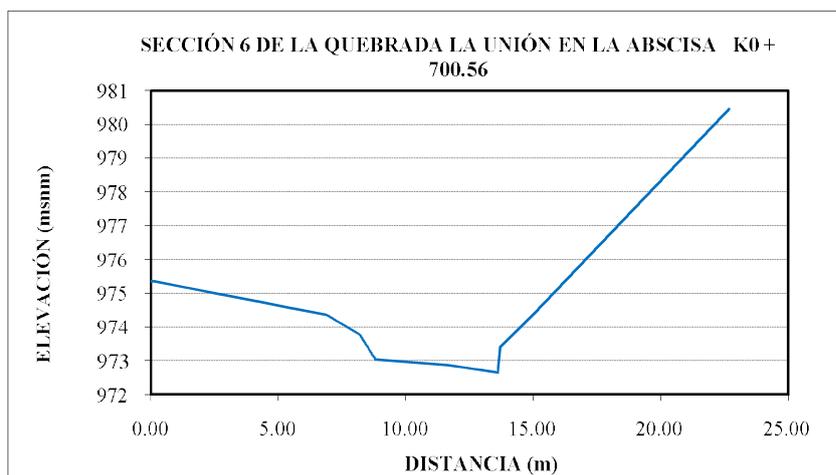
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	977.26
0.68	976.97
0.93	976.49
4.13	976.18
6.54	976.35
7.00	976.34
7.55	977.55
8.40	977.67
9.71	978.24



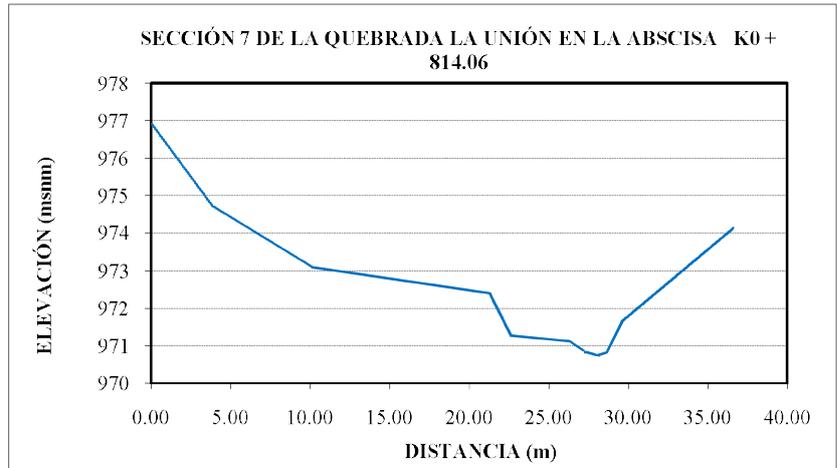
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	976.82
2.72	976.40
4.76	975.39
5.09	975.01
5.85	974.91
8.47	974.93
11.82	975.07
12.43	975.66
13.38	976.02



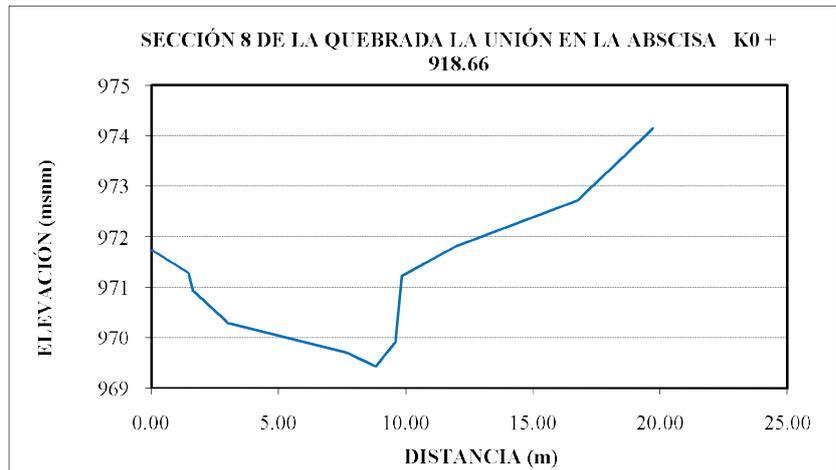
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	975.36
6.86	974.36
8.19	973.77
8.82	973.03
11.68	972.86
13.62	972.64
13.70	973.40
14.78	974.20
22.69	980.45



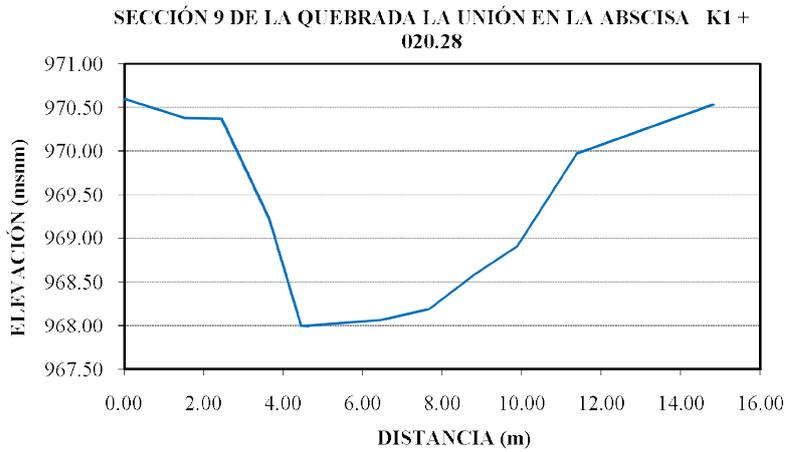
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	976.92
3.84	974.72
10.12	973.09
21.30	972.39
22.64	971.26
26.24	971.12
27.26	970.84
28.07	970.74
28.67	970.82
29.63	971.65
36.62	974.14



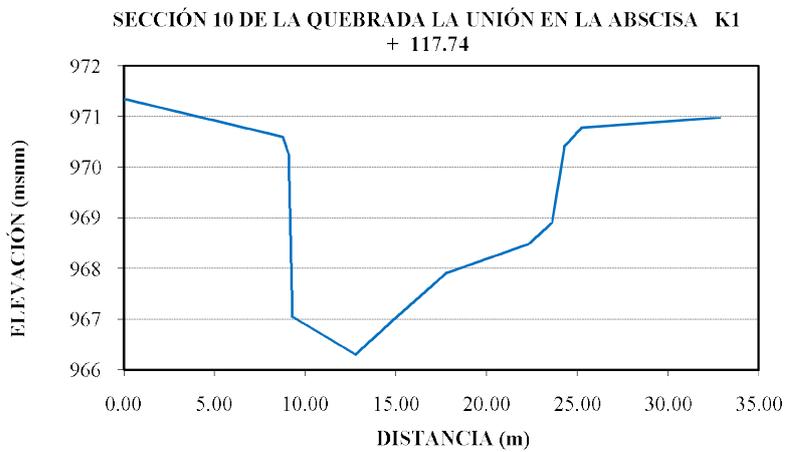
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	971.73
1.47	971.28
1.64	970.92
2.99	970.29
7.69	969.70
8.82	969.43
9.61	969.92
9.86	971.22
12.01	971.82
16.74	972.71
19.72	974.15



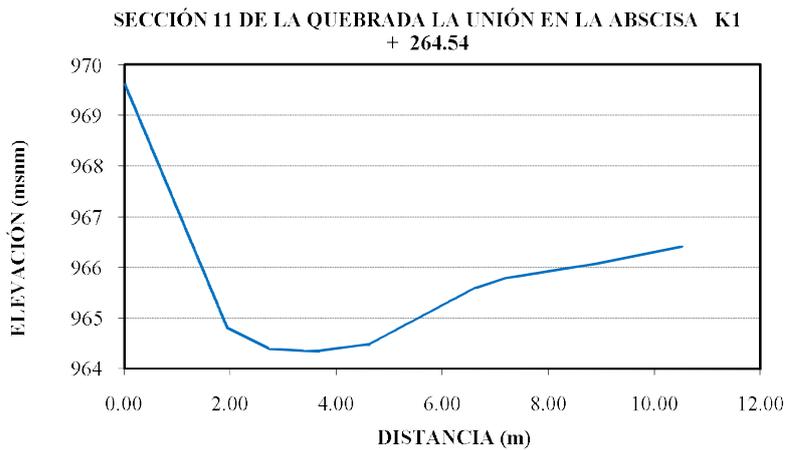
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	970.60
1.57	970.37
2.45	970.37
3.65	969.22
4.45	967.99
6.46	968.06
7.64	968.18
8.79	968.58
9.89	968.91
11.39	969.97



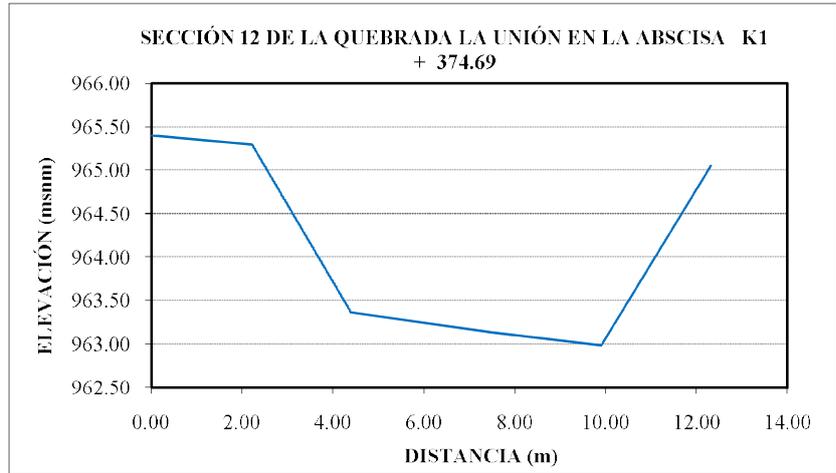
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	971.34
8.76	970.59
9.09	970.26
9.28	967.04
12.76	966.29
14.88	967.00
17.79	967.91
22.36	968.49
23.61	968.89
24.30	970.41
25.27	970.78



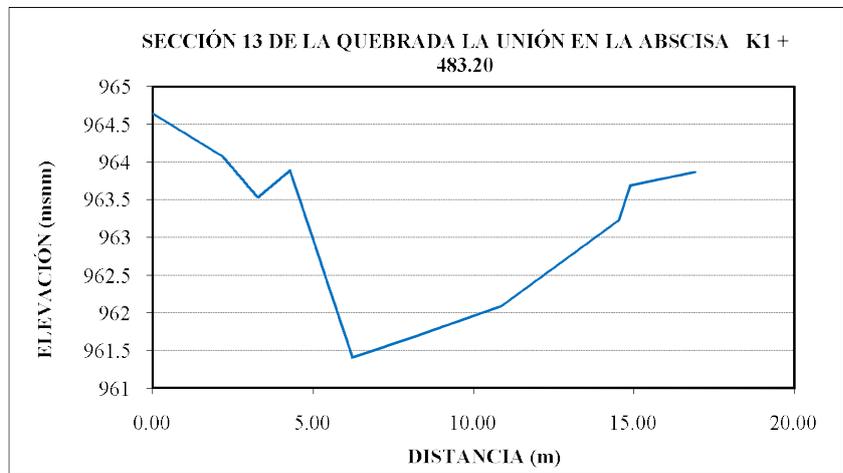
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	969.62
1.94	964.80
2.73	964.39
3.59	964.34
4.64	964.49
6.62	965.59
7.19	965.78
8.89	966.07
10.53	966.41



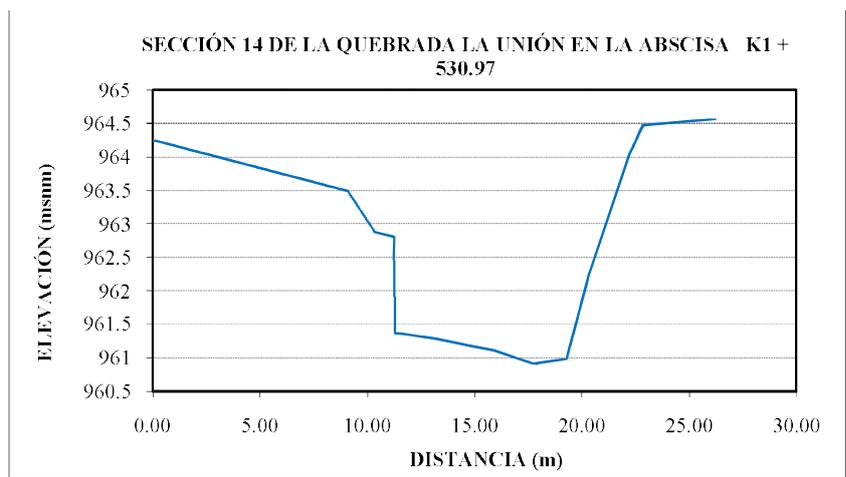
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	965.40
2.22	965.29
4.39	963.36
7.47	963.13
9.90	962.98
12.31	965.05



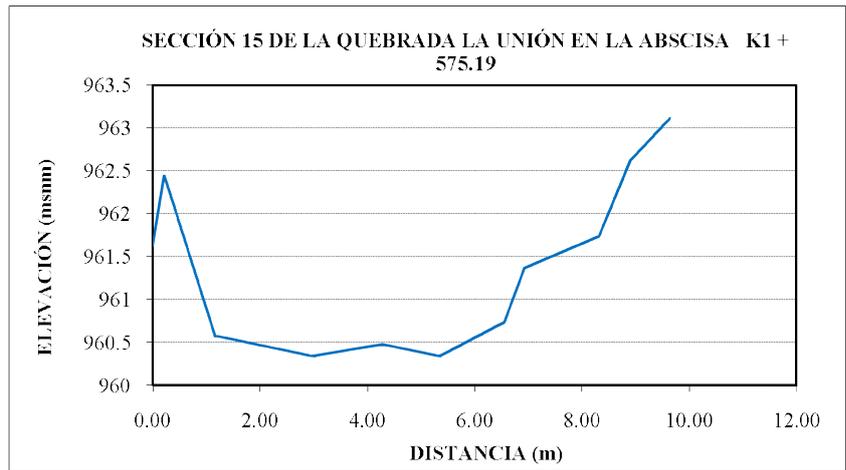
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	964.64
2.20	964.06
3.27	963.53
4.28	963.89
6.22	961.40
8.35	961.71
10.82	962.08
14.53	963.23
14.88	963.69
16.92	963.87



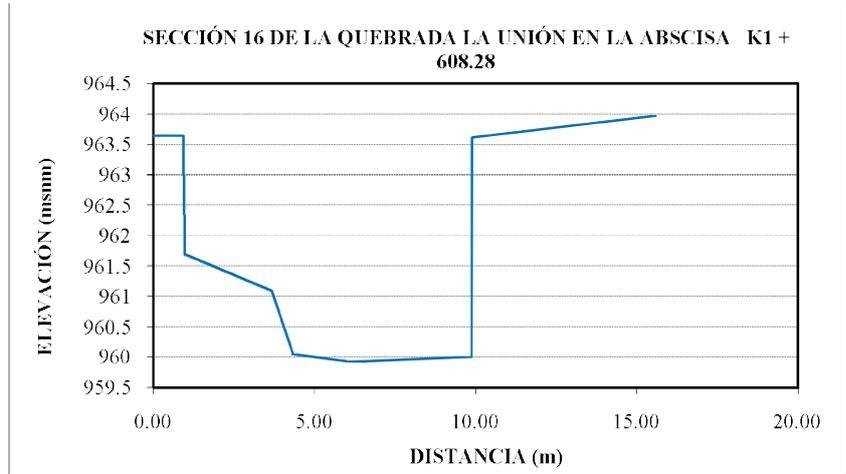
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	964.25
9.08	963.49
10.33	962.87
11.24	962.80
11.22	962.46
11.28	961.37
13.21	961.28
15.94	961.10
17.72	960.91
19.29	960.98
20.33	962.25
22.23	964.05
22.85	964.47
26.18	964.56



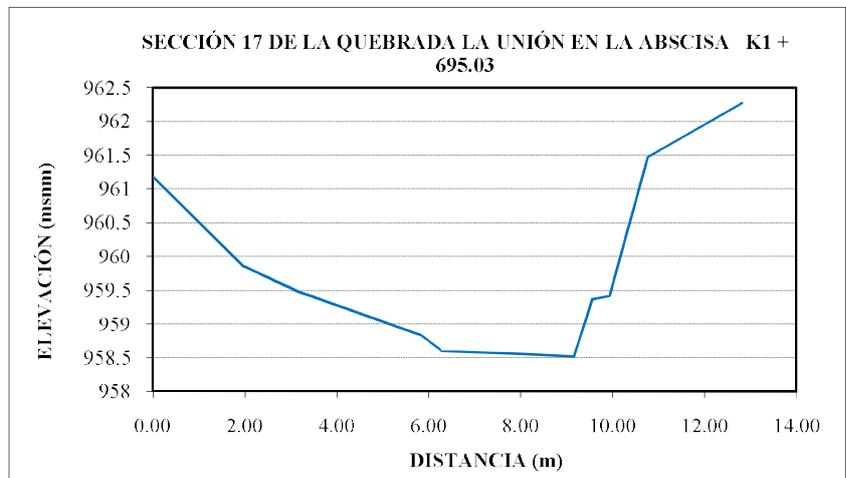
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	961.63
0.21	962.45
1.15	960.58
2.97	960.34
4.28	960.48
5.34	960.34
6.56	960.74
6.93	961.37
8.32	961.74
8.90	962.62



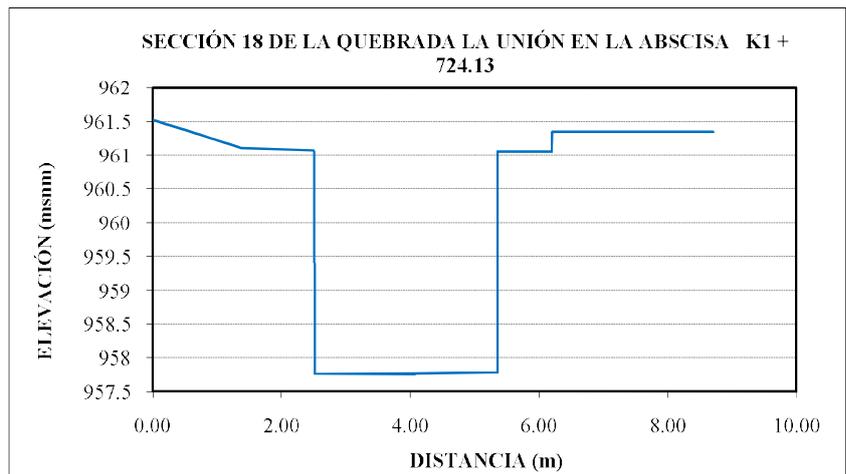
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	963.64
0.91	963.65
0.97	961.69
3.68	961.09
4.34	960.04
6.14	959.92
9.86	960.00
9.89	963.61
15.57	963.97



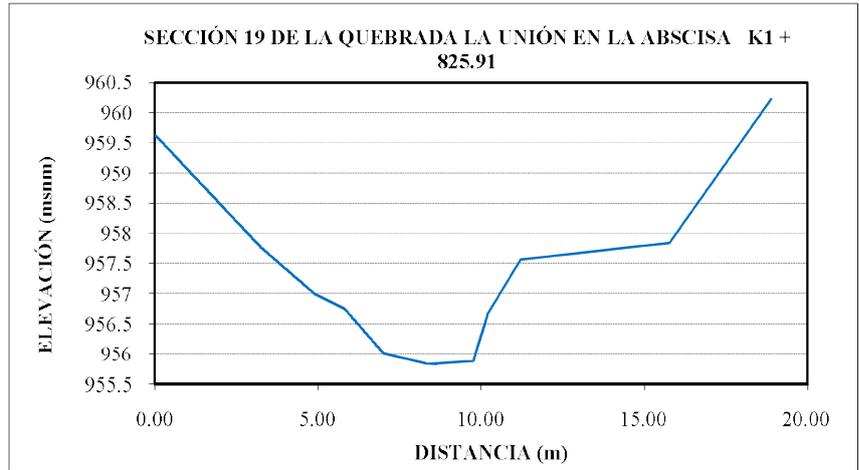
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	961.18
1.98	959.85
3.14	959.48
5.81	958.84
6.27	958.60
8.08	958.55
9.16	958.52
9.55	959.36
9.94	959.42
10.76	961.47
12.82	962.27



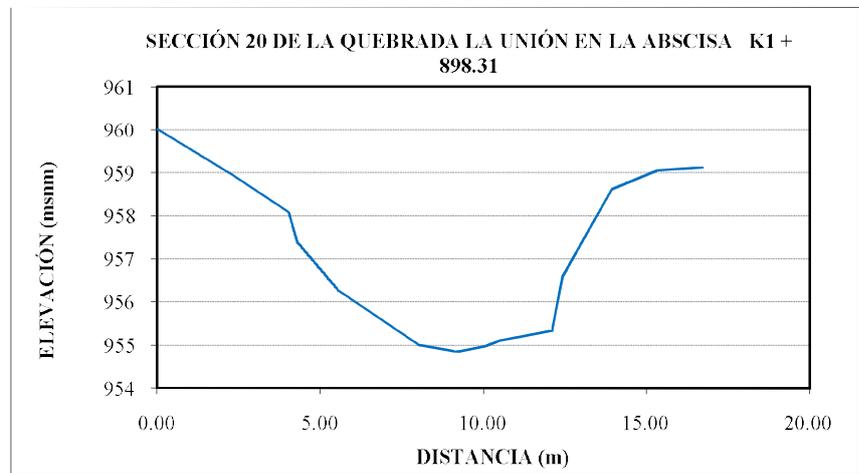
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	961.52
1.37	961.11
2.50	961.07
2.52	957.76
4.08	957.77
5.36	957.79
5.36	961.06
6.19	961.05
6.20	961.35
8.70	961.35



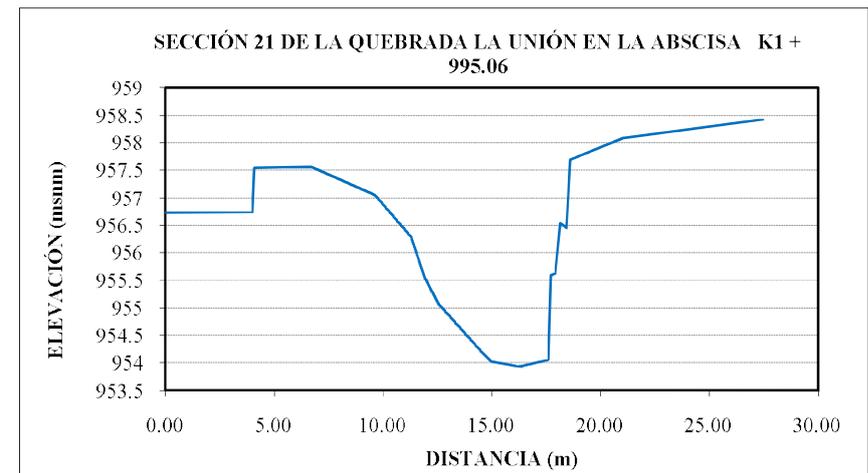
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	959.63
3.25	957.76
4.89	956.99
5.80	956.75
7.00	956.00
8.38	955.83
9.76	955.88
10.19	956.65
11.21	957.56
15.77	957.84



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	960.01
2.34	958.94
4.02	958.09
4.30	957.37
5.53	956.28
8.00	955.01
9.19	954.85
10.06	954.97
10.51	955.11
12.10	955.34
12.44	956.61
13.94	958.62

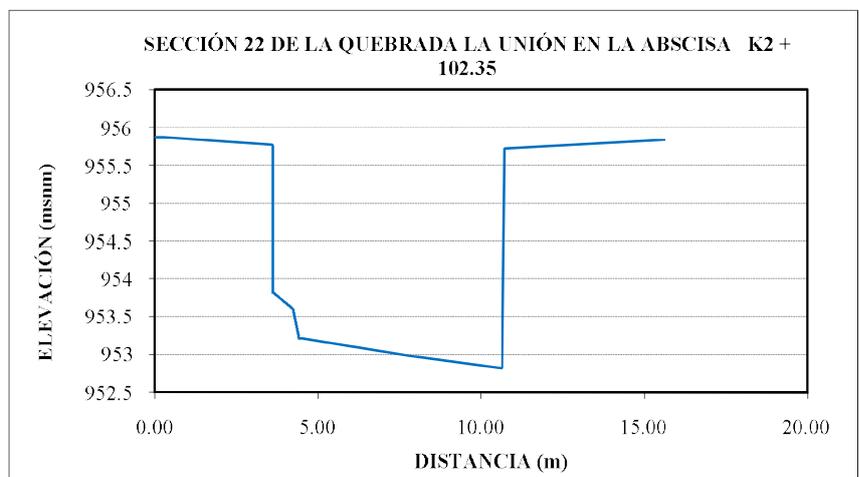


DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	956.73
3.98	956.74
4.07	957.54
6.67	957.57
9.62	957.05
11.30	956.27
11.93	955.53
12.59	955.04
14.47	954.22
14.99	954.02

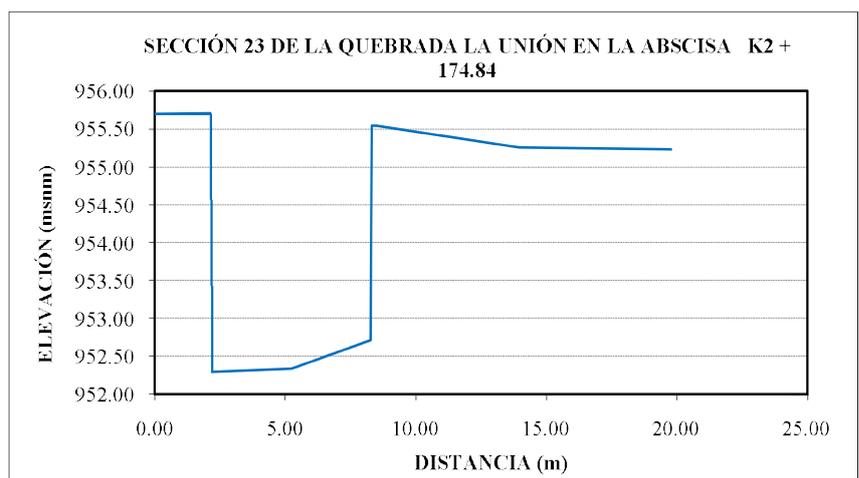


16.27	953.93
17.60	954.05
17.71	955.59
17.91	955.62
18.14	956.54
18.43	956.45
18.59	957.69
21.03	958.08
27.46	958.42

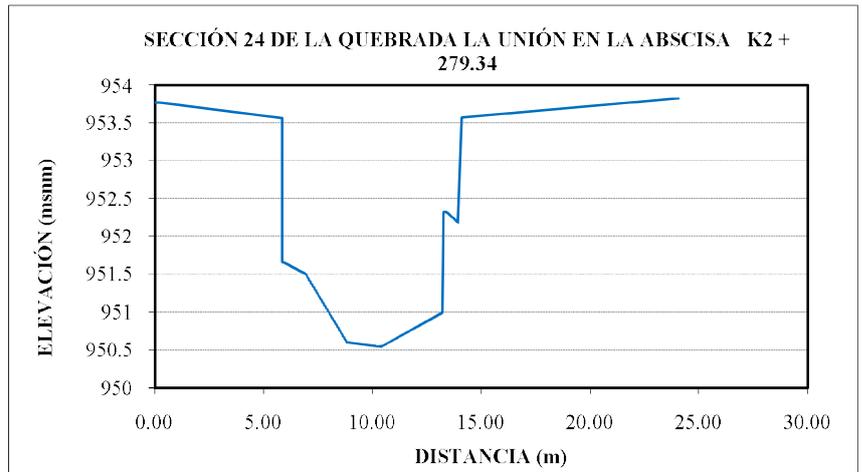
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	955.88
3.59	955.77
3.61	953.82
4.23	953.60
4.40	953.22
7.81	952.98
10.63	952.82
10.72	955.72
15.60	955.84



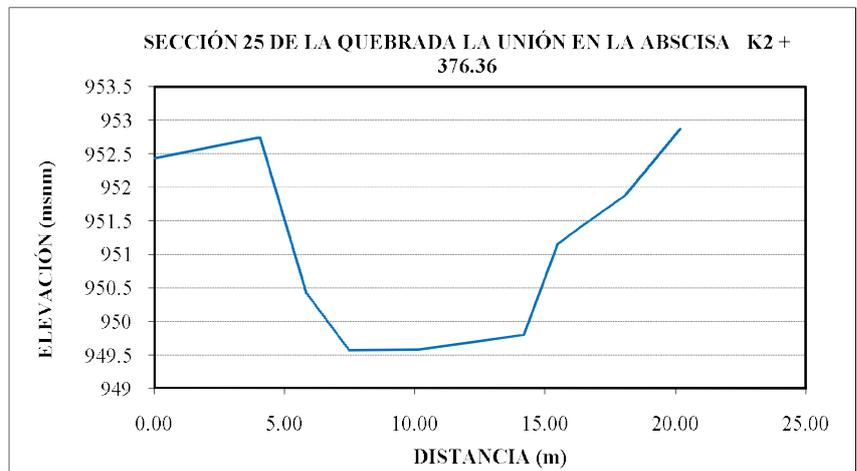
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	955.70
2.12	955.71
2.19	952.29
5.22	952.33
8.27	952.71
8.32	955.55
13.95	955.26
19.78	955.23



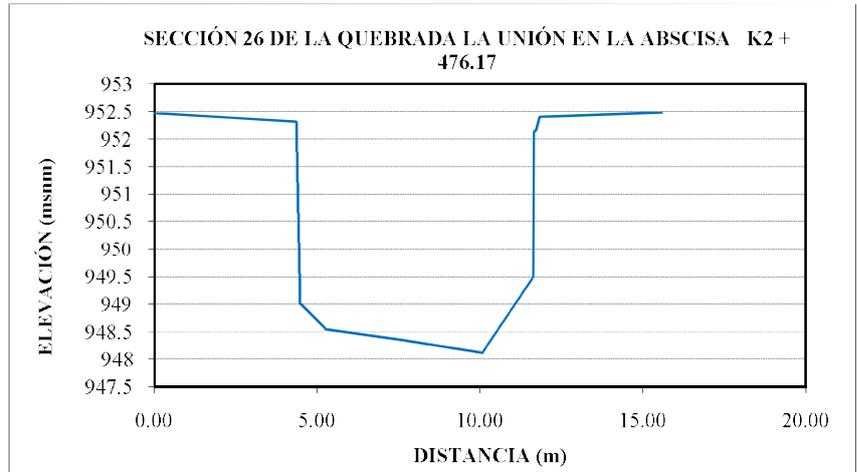
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	953.77
5.83	953.56
5.83	951.66
6.92	951.50
8.82	950.60
10.41	950.54
13.21	950.99
13.27	952.32
13.40	952.32
13.94	952.18
14.11	953.57



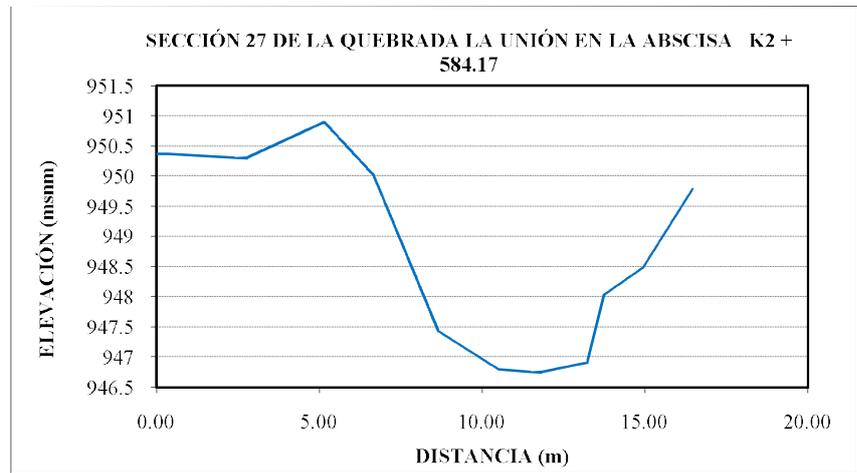
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	952.43
4.03	952.75
5.83	950.42
7.46	949.57
9.96	949.57
14.19	949.80
15.49	951.16
16.33	951.40
18.09	951.89
20.19	952.87



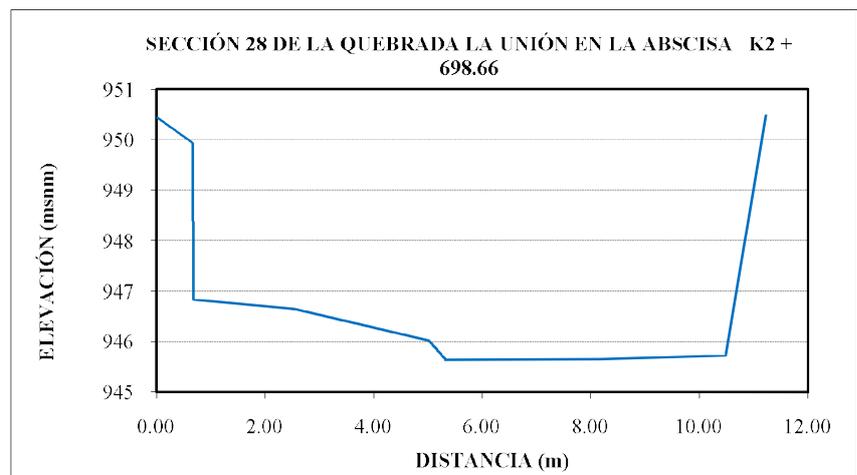
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	952.47
4.35	952.31
4.47	949.01
5.25	948.54
7.53	948.35
10.07	948.11
11.64	949.50
11.66	952.12
11.74	952.17
11.83	952.40
15.57	952.48



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	950.38
2.72	950.30
5.13	950.90
6.67	950.00
8.64	947.43
10.51	946.79
11.73	946.74
13.22	946.91
13.75	948.04
14.97	948.50

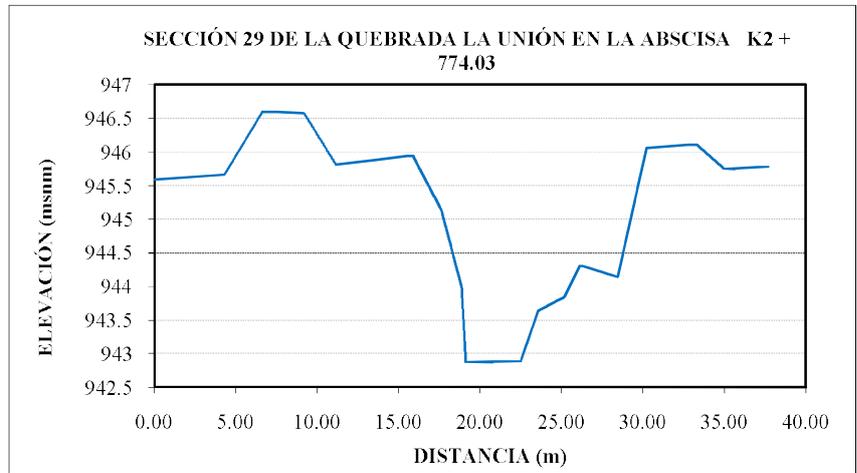


DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	950.45
0.65	949.94
0.68	946.83
2.53	946.65
5.01	946.02
5.32	945.64
7.78	945.64
10.48	945.72

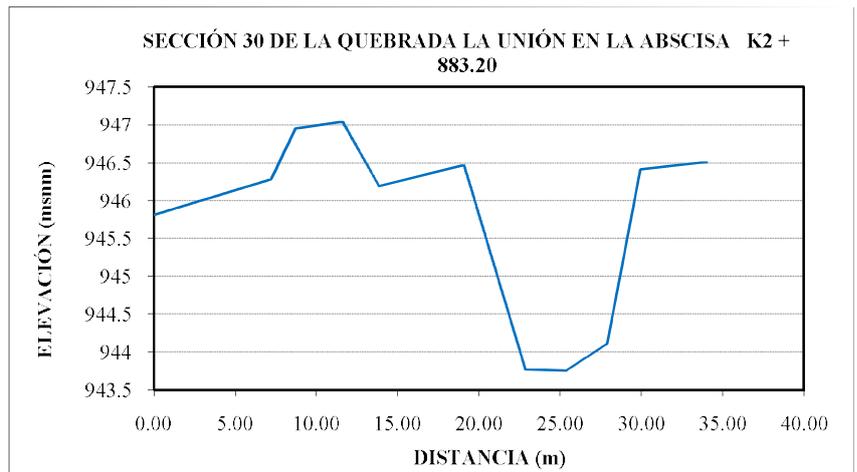


11.23	950.49
-------	--------

DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	945.59
4.30	945.66
6.64	946.60
9.17	946.57
11.14	945.81
15.84	945.95
17.63	945.13
18.83	943.99
19.13	942.87
22.49	942.89
23.57	943.64
25.17	943.84
26.14	944.31
28.47	944.14
30.24	946.06
33.27	946.11
35.01	945.74
37.68	945.78

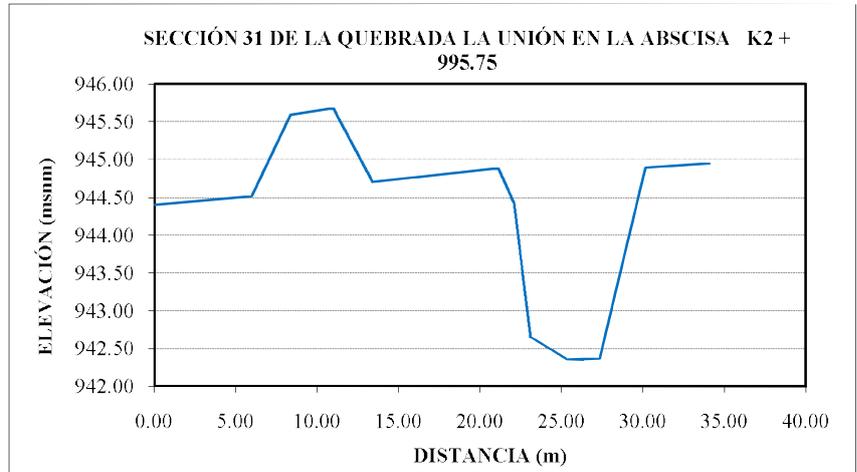


DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	945.81
7.18	946.28
8.71	946.95
11.60	947.04
13.86	946.19
19.05	946.47
22.85	943.77
25.31	943.75
27.89	944.11
29.94	946.41

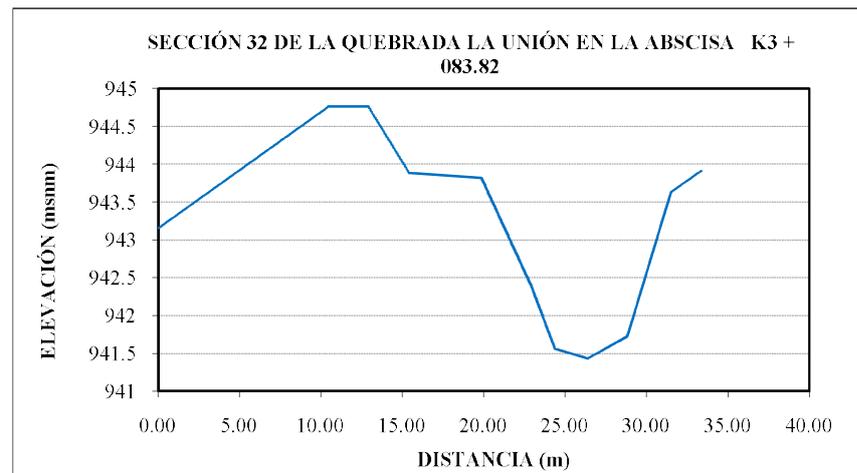


34.02	946.51
-------	--------

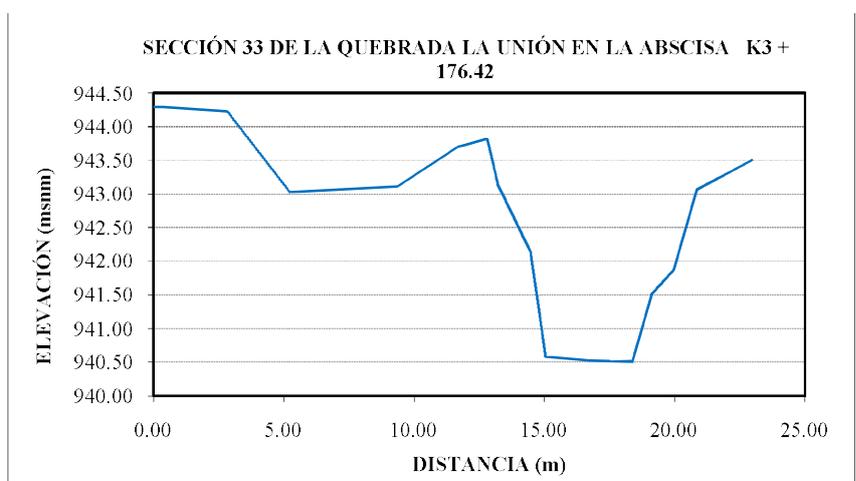
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	944.40
5.97	944.51
8.35	945.59
10.96	945.68
13.40	944.70
21.11	944.88
22.06	944.42
23.06	942.65
25.37	942.35
27.33	942.37
30.17	944.89
34.08	944.95



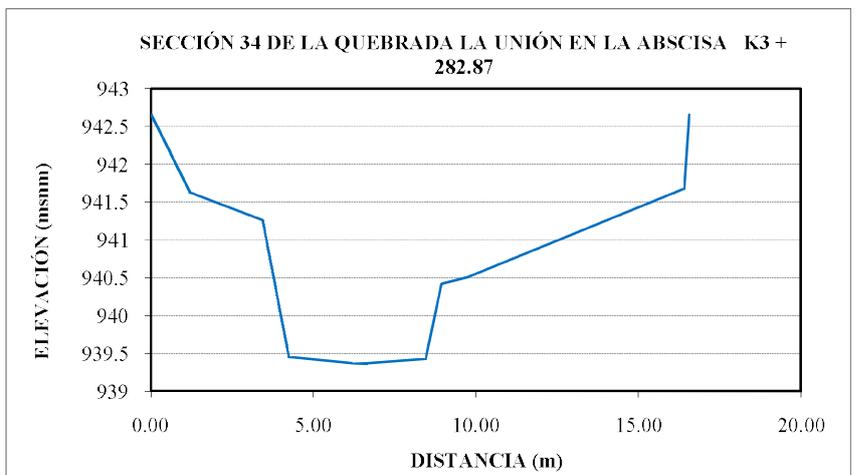
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	943.16
10.41	944.76
12.86	944.77
15.39	943.88
19.83	943.82
22.94	942.38
24.35	941.56
26.39	941.43
28.82	941.72
31.49	943.63
33.36	943.91



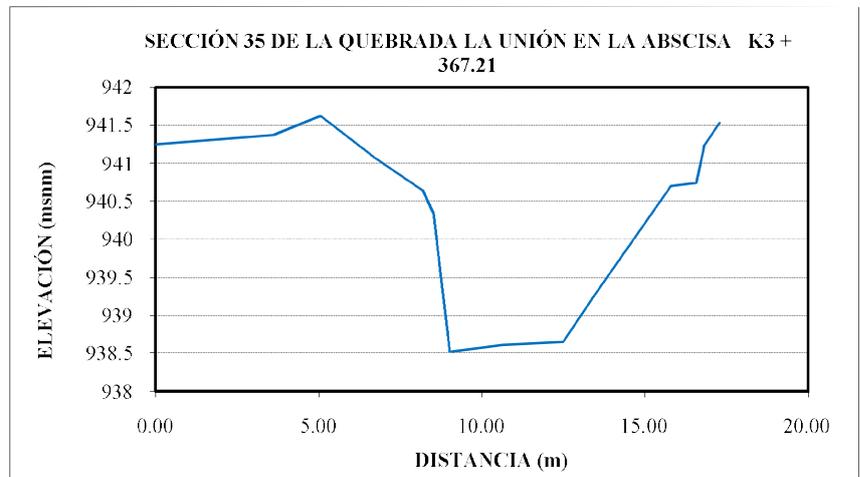
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	944.30
2.82	944.23
5.22	943.03
9.37	943.11
11.70	943.70
12.80	943.82
13.21	943.14
14.45	942.14
15.03	940.58
16.70	940.52
18.37	940.50
19.12	941.51
19.96	941.87
20.86	943.06
22.98	943.50



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	942.66
1.18	941.63
3.43	941.26
4.24	939.45
6.39	939.36
8.46	939.43
8.94	940.42
9.72	940.50
16.41	941.68
16.57	942.66

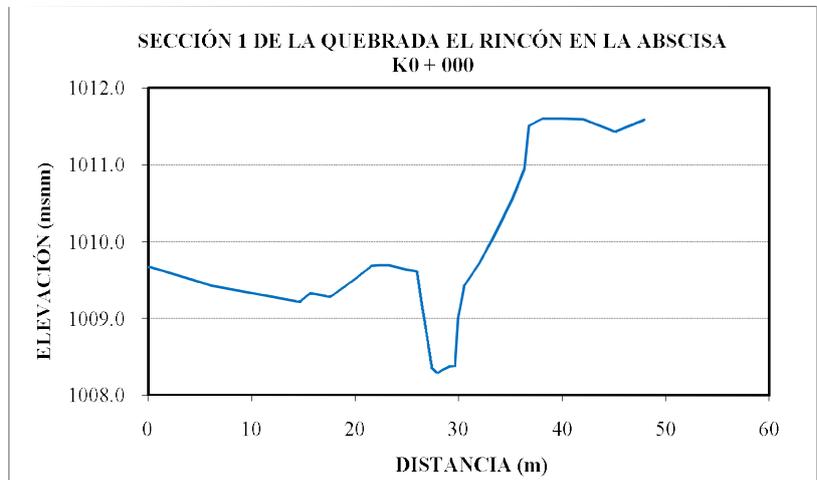


DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	941.25
3.60	941.37
5.05	941.62
6.71	941.07
8.18	940.64
8.50	940.34
9.00	938.52
10.62	938.61
12.49	938.65
13.40	939.23
15.79	940.70
16.56	940.74
16.81	941.23
17.29	941.53

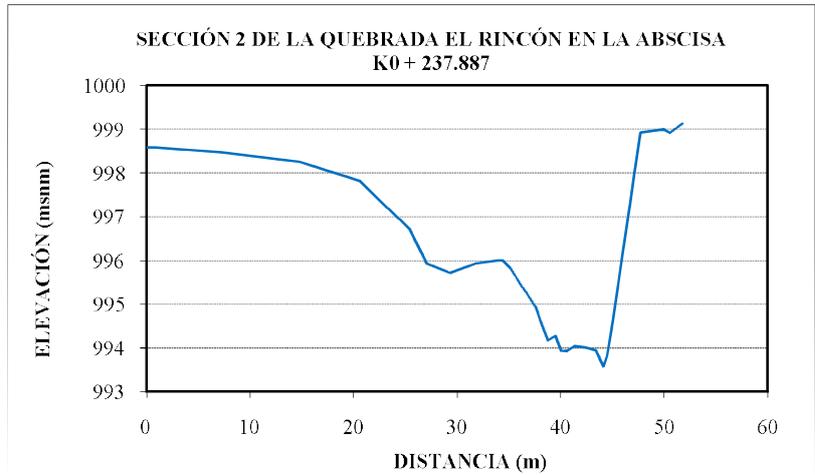


SECCIONES TRANSVERSALES DE LA QUEBRADA LA EL RINCÓN

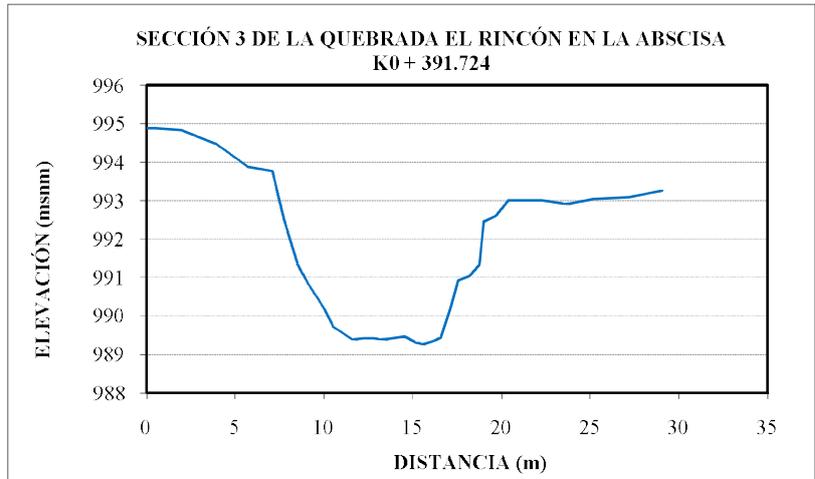
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	1009.67
6.18	1009.42
11.05	1009.30
14.60	1009.21
15.71	1009.33
17.60	1009.28
20.01	1009.52
21.57	1009.68
22.99	1009.70
24.95	1009.63
25.97	1009.61
26.47	1009.17
26.99	1008.72
27.44	1008.35
27.96	1008.29
28.46	1008.33
29.12	1008.37
29.67	1008.38
29.97	1009.00
30.56	1009.42
31.90	1009.70
33.55	1010.09
35.27	1010.58
36.39	1010.94
36.81	1011.50
38.12	1011.60
42.02	1011.59
45.12	1011.43
47.93	1011.58



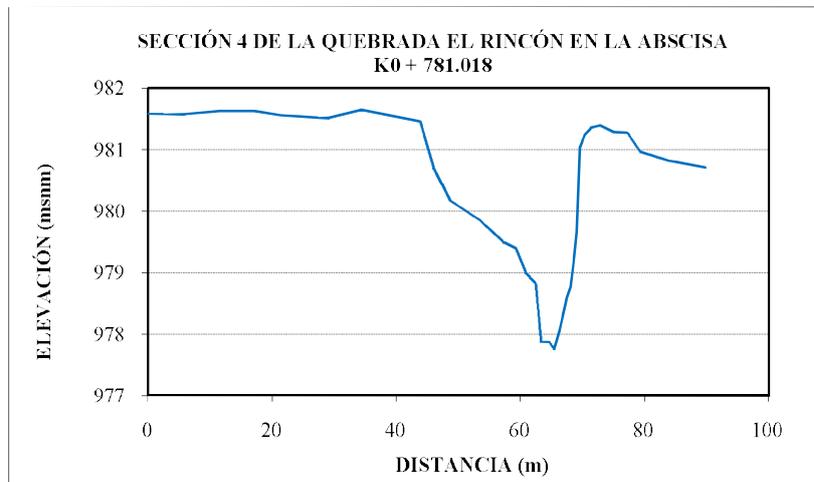
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	998.60
7.21	998.46
14.71	998.25
20.61	997.82
23.23	997.20
25.48	996.70
27.08	995.92
29.30	995.71
31.79	995.93
34.35	996.01
35.14	995.82
36.22	995.40
36.88	995.20
37.54	994.95
38.03	994.63
38.78	994.17
39.48	994.28
40.04	993.94
40.64	993.93
41.38	994.04
42.36	994.01
43.43	993.94
44.13	993.57
44.52	993.82
44.99	994.51
47.71	998.92
49.97	998.99
50.56	998.91
51.04	999.00
51.77	999.12



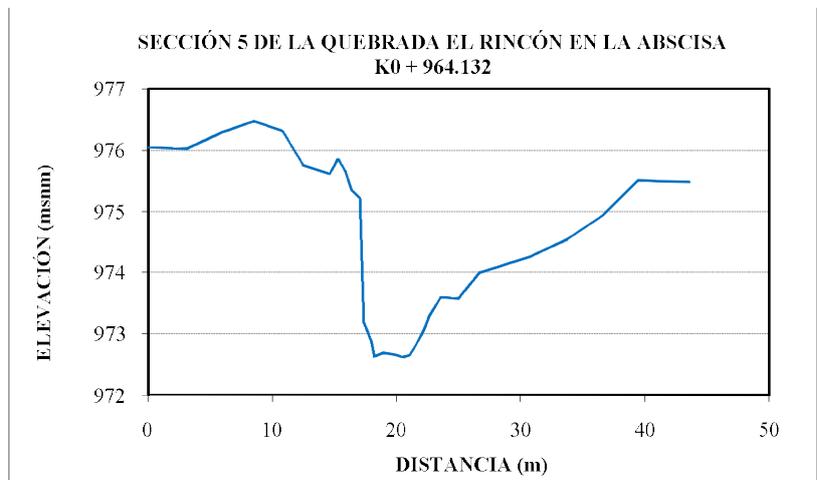
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	994.89
1.96	994.83
3.87	994.48
5.68	993.88
7.07	993.76
7.73	992.52
8.50	991.34
9.13	990.82
9.99	990.19
10.51	989.72
11.59	989.38
12.51	989.43
13.34	989.38
14.54	989.46
15.16	989.30
15.60	989.26
16.21	989.35
16.57	989.43
17.13	990.21
17.55	990.92
18.17	991.03
18.78	991.35
19.02	992.46
19.61	992.58
20.41	993.01
22.03	993.02
23.67	992.90
25.16	993.04
27.22	993.08
29.08	993.26



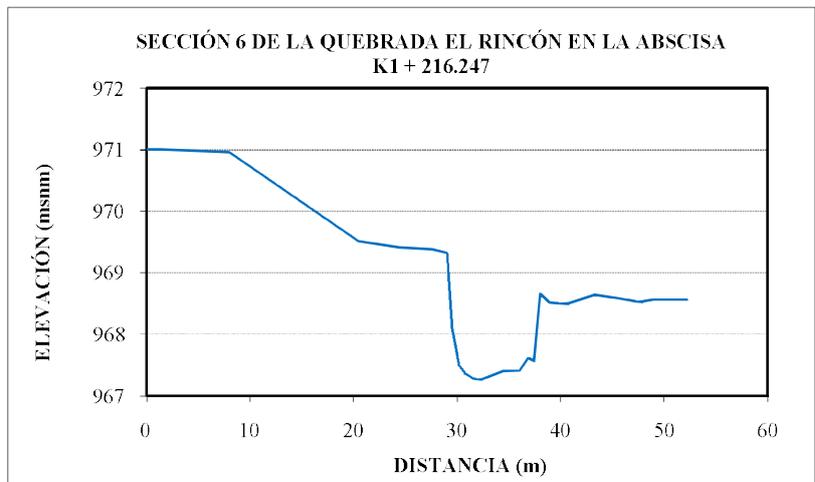
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	981.59
5.02	981.57
11.54	981.63
17.13	981.63
21.48	981.56
28.86	981.51
34.36	981.65
43.85	981.45
46.02	980.70
48.73	980.17
53.22	979.86
57.19	979.50
59.33	979.39
60.79	979.01
62.38	978.82
63.34	977.87
64.59	977.88
65.43	977.76
66.37	978.08
67.46	978.58
68.08	978.76
68.53	979.16
69.09	979.66
69.61	981.04
70.40	981.25
71.39	981.35
72.85	981.39
75.27	981.27
77.16	981.27
79.28	980.96
83.82	980.82
89.79	980.71



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	976.05
3.06	976.02
5.96	976.29
8.52	976.47
10.81	976.31
12.50	975.75
14.61	975.61
15.29	975.85
15.84	975.67
16.41	975.34
17.04	975.22
17.35	973.19
18.02	972.85
18.23	972.63
18.96	972.69
19.84	972.66
20.49	972.62
21.04	972.65
21.49	972.80
22.19	973.06
22.70	973.31
23.57	973.60
24.92	973.57
26.68	974.00
30.65	974.25
33.79	974.55
36.69	974.95
39.50	975.51
41.79	975.48
43.55	975.48

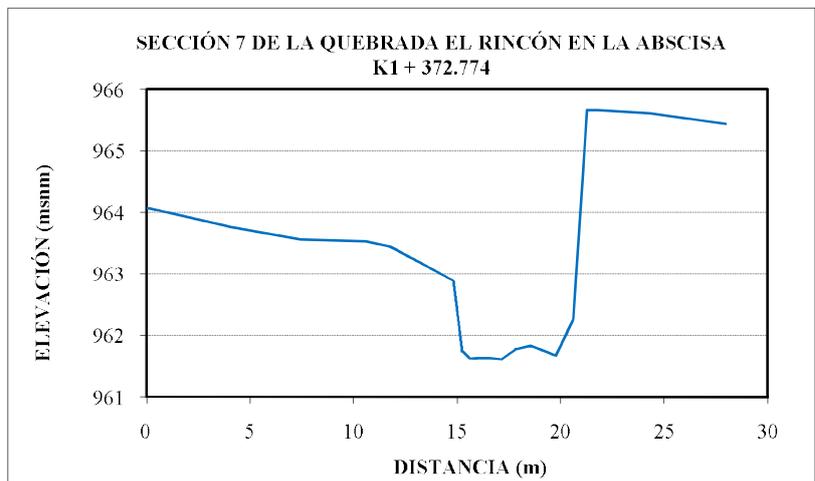


DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	971.02
8.05	970.95
20.49	969.51
24.41	969.41
27.57	969.38
28.99	969.32
29.53	968.10
30.14	967.50
30.72	967.37
31.50	967.28
32.26	967.26
35.31	967.41
36.00	967.40
36.86	967.61
37.45	967.56
38.03	968.66
38.99	968.51
40.62	968.49
43.29	968.64



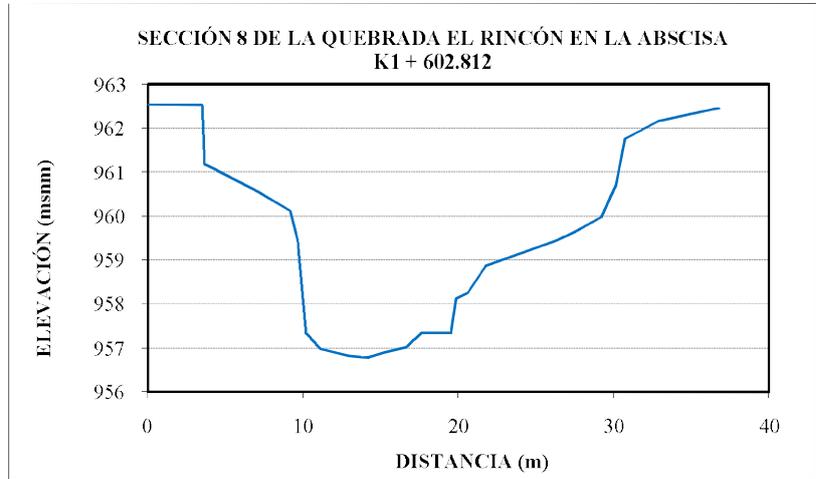
45.65	968.58
47.6	968.52
49.25	968.57
50.64	968.56
52.21	968.56

DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	964.08
4.05	963.76
7.43	963.56
10.58	963.53
11.80	963.44
14.81	962.89
15.23	961.75
15.63	961.62
16.29	961.64
17.10	961.61
17.80	961.77
18.54	961.83
21.27	965.67

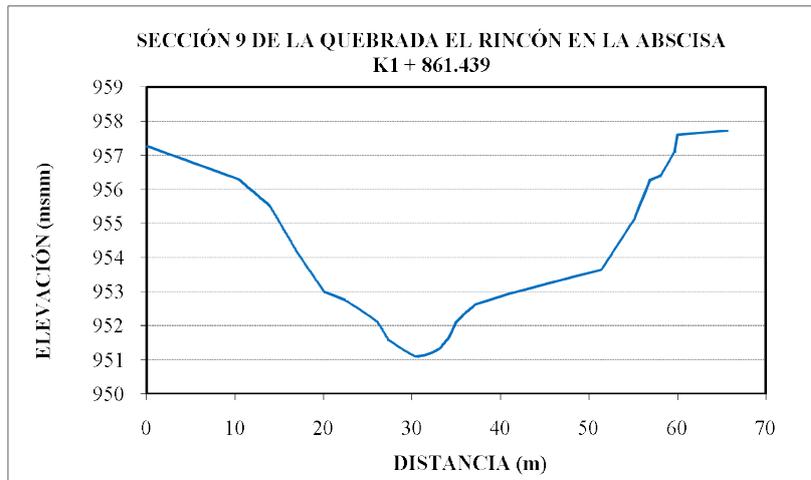


24.31	965.61
27.98	965.44

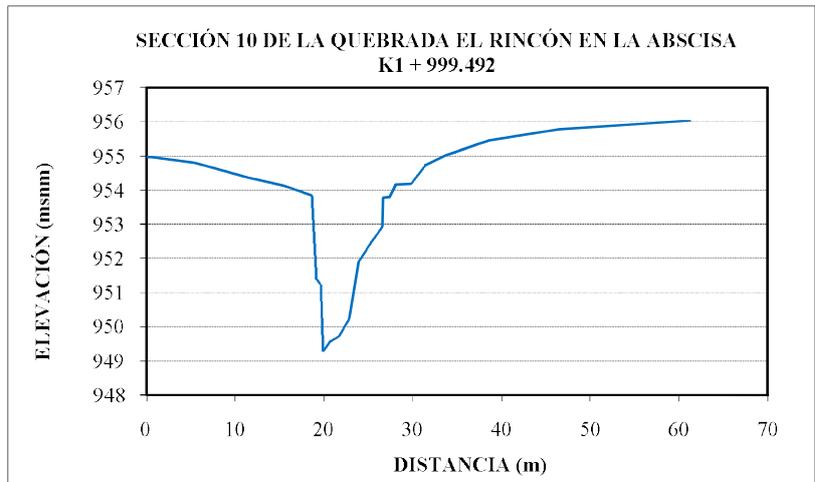
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	962.54
3.49	962.53
3.64	961.18
6.96	960.57
9.15	960.11
9.66	959.42
10.19	957.33
11.14	956.97
12.95	956.81
14.12	956.77
15.20	956.88
16.63	957.02
17.64	957.34
19.54	957.34
19.84	958.11
20.58	958.25
21.77	958.87
26.24	959.43
27.31	959.60
29.22	959.97
30.19	960.72
30.74	961.75
32.90	962.16
34.92	962.32
36.78	962.45



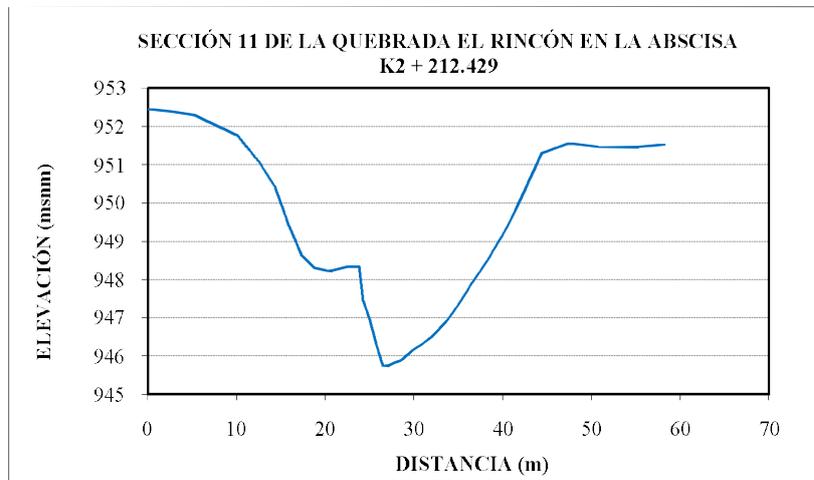
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	957.26
10.48	956.28
13.99	955.48
16.97	954.17
18.36	953.62
20.08	952.98
22.46	952.74
24.43	952.41
26.16	952.07
27.27	951.59
29.03	951.28
30.32	951.09
31.40	951.12
32.36	951.21
32.99	951.30
34.17	951.64
34.93	952.08
35.81	952.32
37.11	952.61
40.95	952.92
48.08	953.41
51.37	953.64
55.22	955.17
56.92	956.26
58.13	956.40
59.64	957.08
59.99	957.60
65.58	957.73



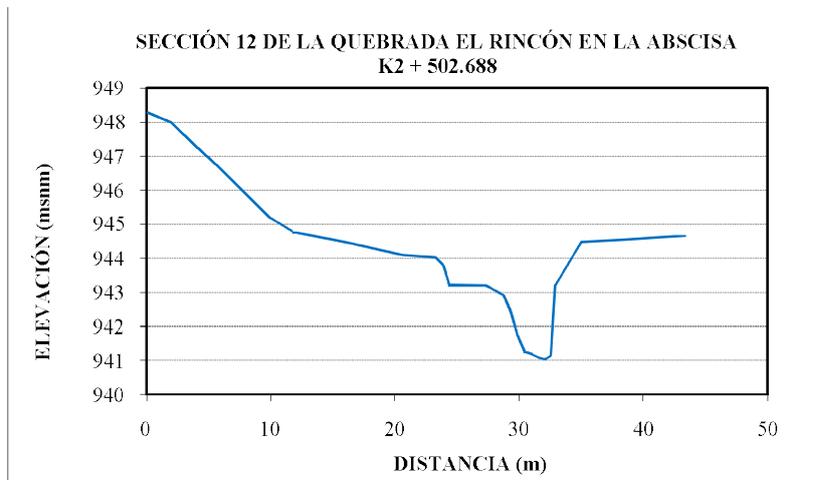
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	954.97
5.39	954.79
11.44	954.35
15.46	954.11
18.62	953.82
19.14	951.39
19.59	951.23
19.90	949.29
20.72	949.57
21.68	949.72
22.87	950.25
23.89	951.88
25.35	952.48
26.61	952.93
26.66	953.78
27.37	953.78
28.08	954.15
29.78	954.18
31.41	954.71
33.70	955.01
38.57	955.44
46.53	955.78
61.20	956.02



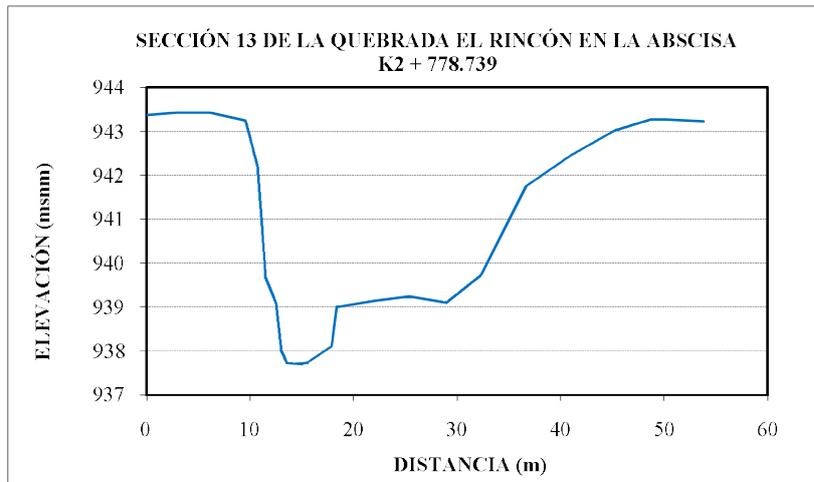
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	952.44
2.73	952.39
5.28	952.28
9.98	951.77
12.60	951.03
14.27	950.44
15.83	949.44
17.32	948.63
18.85	948.29
20.47	948.21
22.50	948.33
23.77	948.35
24.20	947.46
24.95	947.00
25.71	946.33
26.50	945.75
27.05	945.74
27.87	945.83
28.67	945.90
29.82	946.14
30.94	946.31
32.14	946.54
33.75	946.92
35.18	947.40
36.53	947.90
38.23	948.48
40.64	949.41
41.82	949.98
44.42	951.30
47.46	951.55
50.86	951.46
54.59	951.44
58.25	951.52



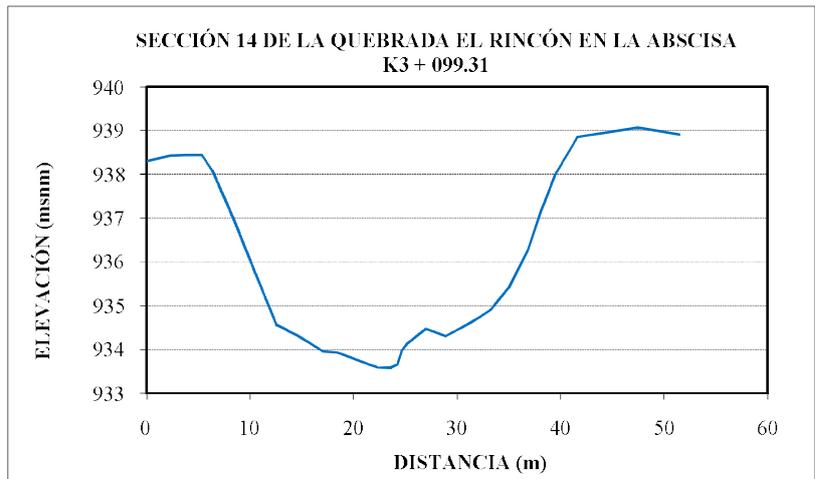
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	948.28
1.90	948.00
4.12	947.24
6.27	946.51
9.97	945.18
11.78	944.77
15.96	944.47
20.60	944.09
23.31	944.01
23.88	943.79
24.37	943.19
27.33	943.19
28.77	942.89
29.28	942.47
29.85	941.76
30.45	941.24
31.10	941.17
31.54	941.08
32.05	941.02
32.54	941.14
32.92	943.22
34.99	944.48
38.68	944.54
40.90	944.60
43.36	944.65



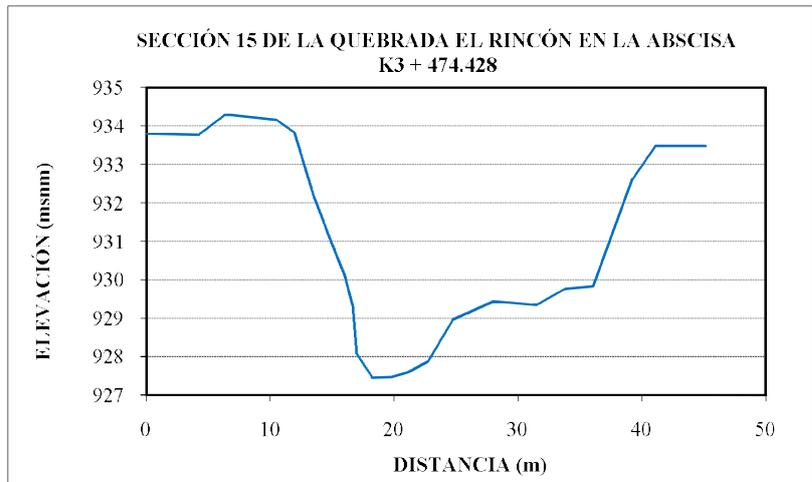
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	943.37
2.96	943.42
6.05	943.42
9.56	943.23
10.72	942.21
11.47	939.67
12.51	939.06
13.01	938.01
13.51	937.73
14.77	937.69
15.60	937.74
16.87	937.94
17.88	938.11
18.37	938.99
22.02	939.14
25.36	939.24
29.01	939.10
32.37	939.74
36.65	941.74
40.99	942.45
45.35	943.03
48.86	943.28
53.82	943.22



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	938.29
2.26	938.43
5.31	938.45
6.34	938.08
8.38	936.98
10.43	935.76
12.48	934.57
14.66	934.30
17.07	933.95
18.38	933.92
21.44	933.65
22.33	933.59
23.44	933.57
24.22	933.66
24.68	933.98
25.18	934.13
27.00	934.47
28.90	934.30
31.52	934.63
33.16	934.88
34.93	935.39
36.82	936.26
38.18	937.18
39.47	937.99
41.61	938.85
47.46	939.06
51.48	938.91

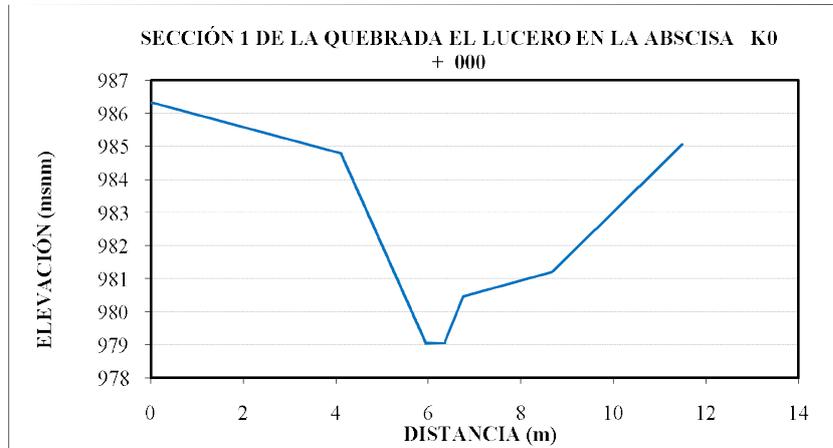


DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	933.79
4.18	933.76
6.33	934.29
10.53	934.15
11.96	933.82
13.47	932.20
14.90	930.96
15.99	930.11
16.63	929.32
16.93	928.10
18.24	927.44
19.60	927.45
21.02	927.57
22.72	927.86
24.75	928.96
28.00	929.44
31.47	929.34
33.83	929.76
36.04	929.82
39.22	932.62
41.12	933.49
45.15	933.48

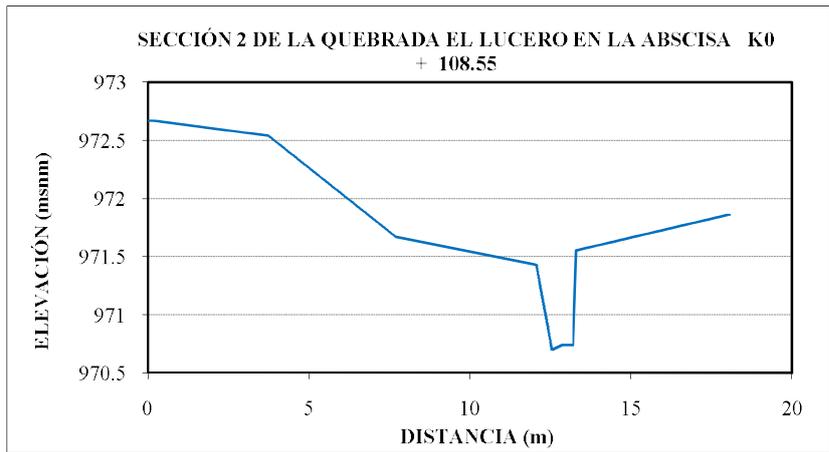


SECCIONES TRANSVERSALES DE LA QUEBRADA EL LUCERO

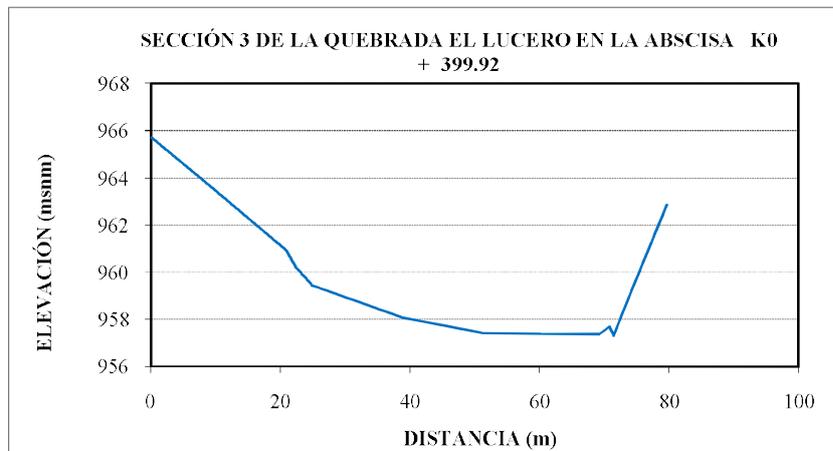
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	986.33
4.1	984.79
5.95	979.04
6.35	979.06
6.76	980.47
8.67	981.20
11.49	985.06



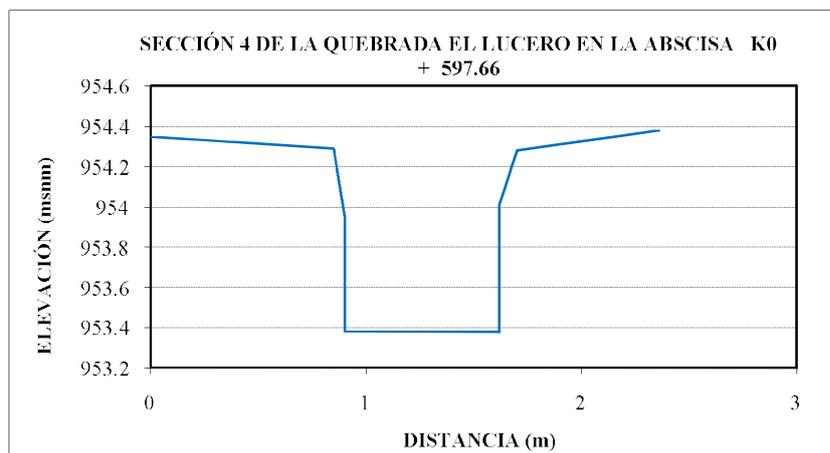
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0	972.67
3.71	972.54
7.68	971.67
12.05	971.43
12.53	970.70
12.87	970.74
13.21	970.74
13.29	971.55
18.06	971.86



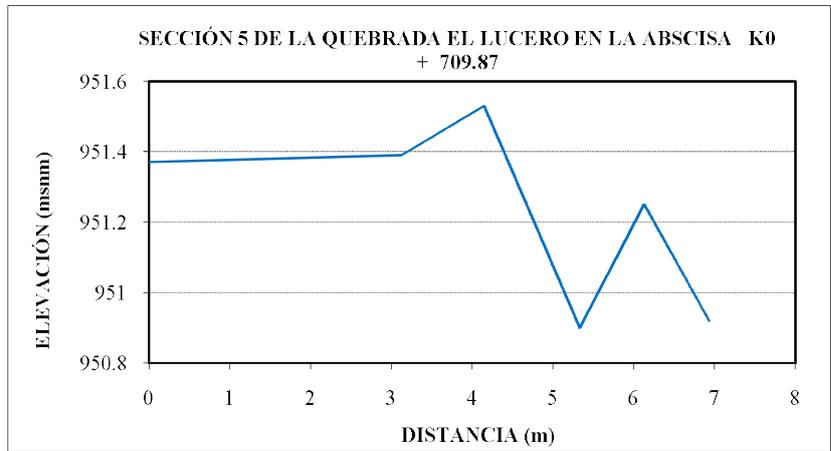
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	965.71
9.34	963.58
20.96	960.91
22.48	960.16
24.84	959.44
38.85	958.07
51.30	957.41
69.23	957.36
70.75	957.69
71.44	957.31
73.77	958.93
79.70	962.85



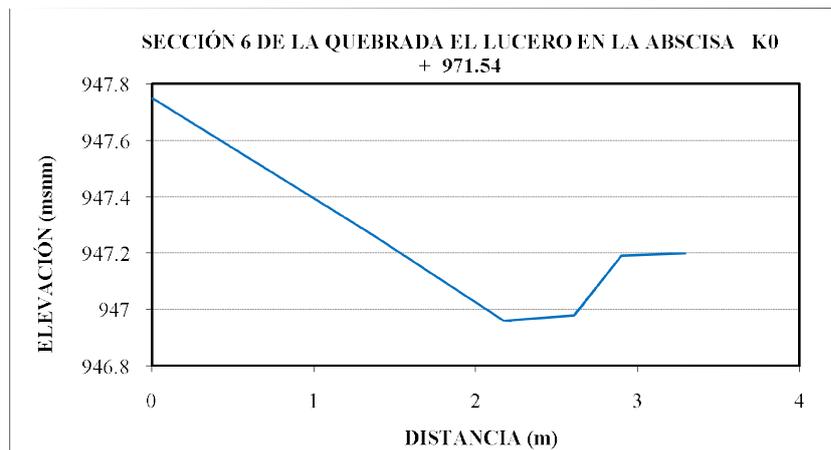
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	954.35
0.85	954.29
0.90	953.94
0.90	953.38
1.27	953.38
1.62	953.38
1.62	954.01
1.70	954.28
2.36	954.38



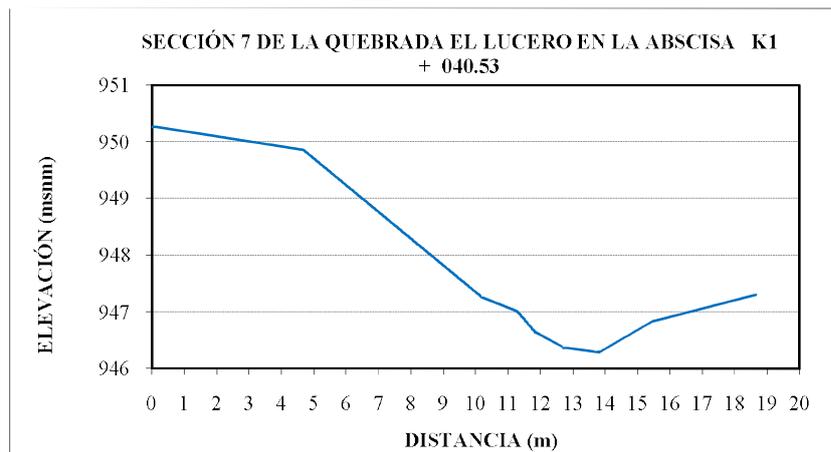
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	951.37
3.13	951.39
4.14	951.53
5.33	950.90
6.13	951.25
6.93	950.92



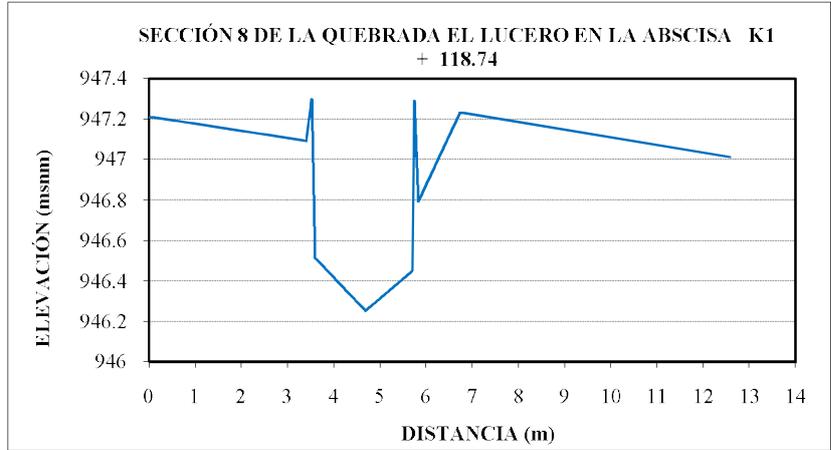
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	947.75
1.35	947.27
2.17	946.96
2.61	946.98
2.90	947.19
3.29	947.20



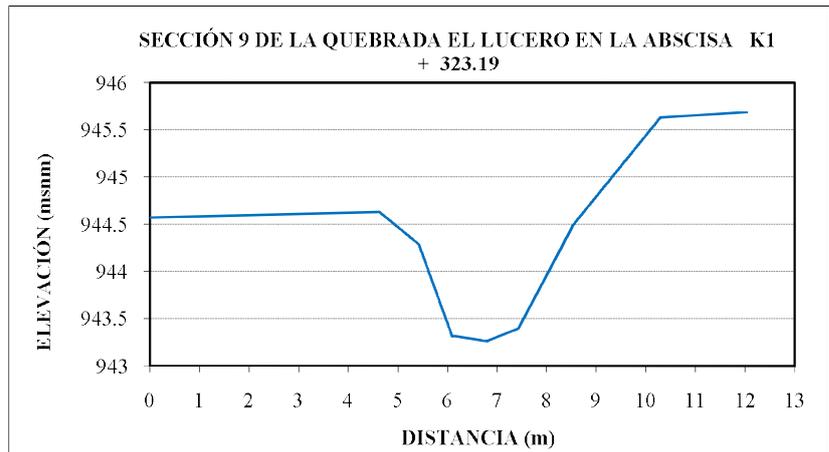
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	950.27
4.65	949.86
10.17	947.26
11.28	947.00
11.82	946.64
12.68	946.37
13.80	946.28
15.48	946.83
18.67	947.30



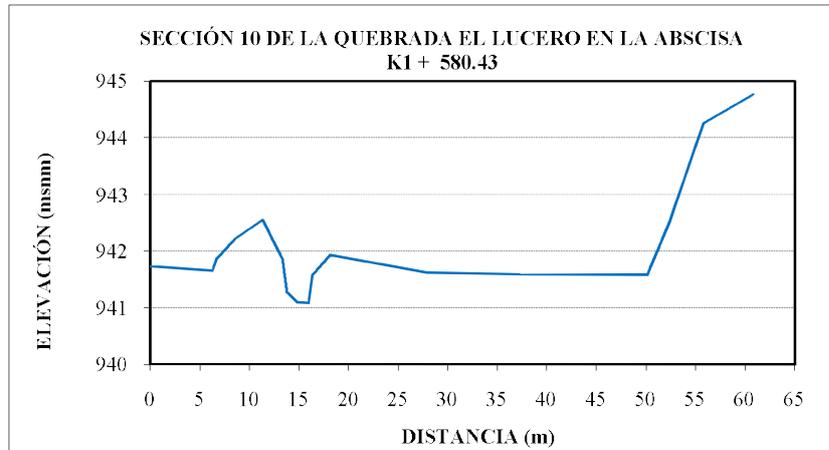
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	947.21
3.40	947.09
3.52	947.30
3.59	946.51
4.68	946.25
5.71	946.45
5.75	947.29
5.82	946.79
6.73	947.23
12.58	947.01



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	944.57
4.61	944.63
5.41	944.29
6.08	943.32
6.79	943.26
7.42	943.39
8.52	944.48
10.29	945.63
12.03	945.69



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	941.73
6.27	941.65
6.67	941.85
8.47	942.21
11.32	942.55
13.33	941.86
13.79	941.27
14.92	941.08
15.95	941.08
16.34	941.57
18.16	941.93
27.89	941.62
37.32	941.58
50.10	941.57
52.33	942.49
55.78	944.25
60.80	944.76

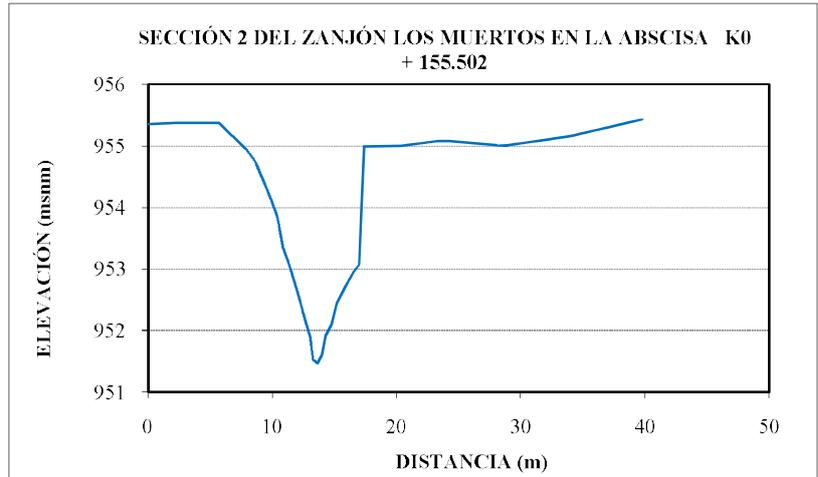


SECCIONES TRANSVERSALES DEL ZANJÓN LOS MUERTOS

DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	955.67
3.01	955.62
6.63	955.54
8.38	954.98
9.66	954.44
10.63	954.10
11.06	953.98
11.46	953.95
11.95	954.00
12.37	954.14
13.14	954.22
14.55	954.36
16.50	954.68
18.39	955.33
20.39	955.95
23.24	956.31
25.91	956.62
28.76	956.76
32.18	957.13
35.86	957.53
39.56	957.82
43.80	958.22



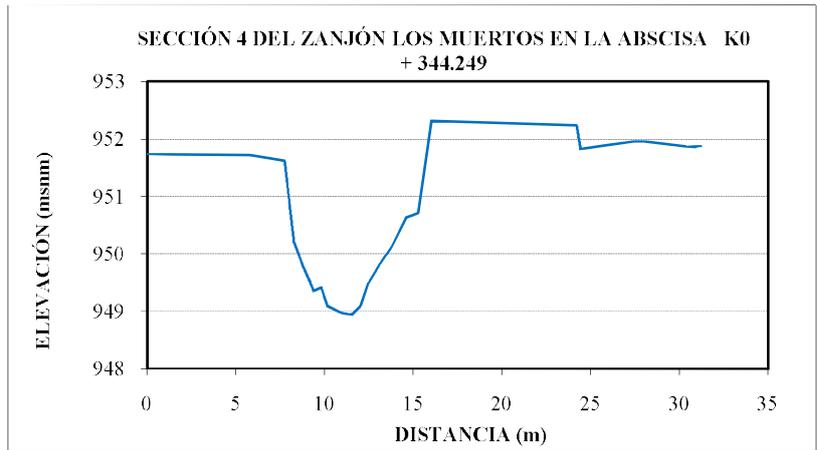
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	955.35
3.35	955.38
5.62	955.37
7.84	954.95
8.69	954.71
9.82	954.15
10.40	953.84
10.84	953.34
11.45	953.00
12.05	952.59
12.64	952.18
13.04	951.90
13.29	951.52
13.63	951.46
13.98	951.59
14.35	951.93
14.77	952.10
15.19	952.43
15.89	952.71
16.59	952.96
17.01	953.08
17.38	955.00
19.98	954.99
23.72	955.09
28.63	955.00
34.07	955.16
39.83	955.43



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	951.11
4.49	951.21
7.90	951.00
10.26	951.01
13.15	950.88
14.51	950.83
14.80	951.00
15.04	950.30
15.55	950.19
16.06	949.80
16.44	949.71
16.85	949.76
17.17	949.74
17.54	949.75
17.98	949.81
18.36	950.01
18.85	950.24
19.51	950.35
21.59	950.41
22.10	950.46
23.02	950.50
23.79	950.85
24.85	951.32
25.92	951.43
27.93	951.38
30.85	951.40
32.98	951.54

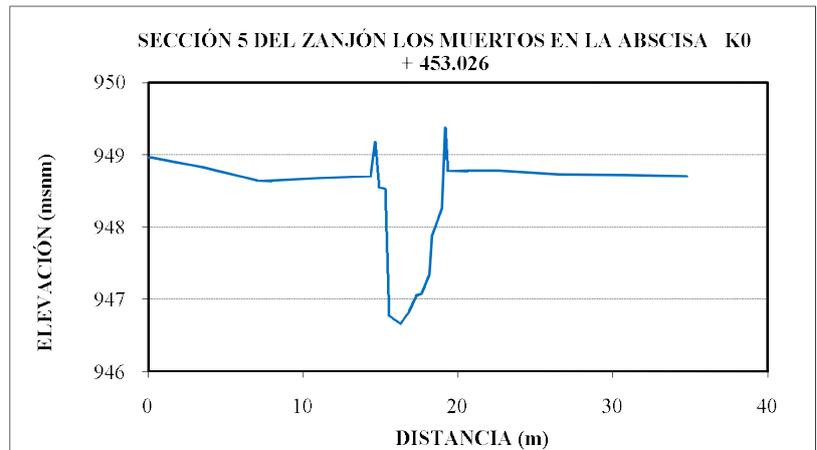


DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	951.74
2.70	951.72
5.78	951.71
7.74	951.62
8.28	950.21
8.80	949.78
9.39	949.35
9.83	949.41
10.17	949.09
10.86	948.98
11.58	948.94
12.03	949.10
12.48	949.49
13.11	949.82
13.82	950.14
14.63	950.63
15.30	950.71



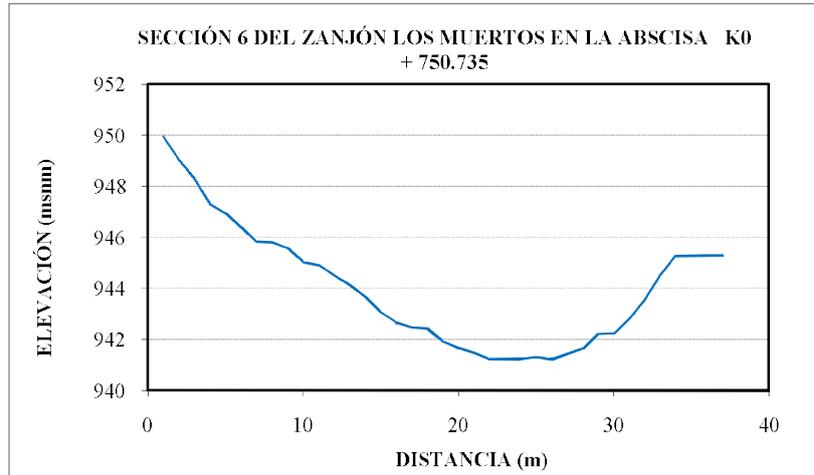
16.02	952.30
16.06	952.31
24.20	952.23
24.42	951.82
27.68	951.96
30.67	951.86
31.21	951.88

DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	948.97
3.37	948.83
7.24	948.63
10.94	948.68
14.35	948.70
14.64	949.18
14.89	948.55
15.28	948.53
15.52	946.77
15.81	946.73
16.30	946.66
16.84	946.83
17.30	947.05
17.63	947.08
18.15	947.34
18.34	947.88
18.98	948.26

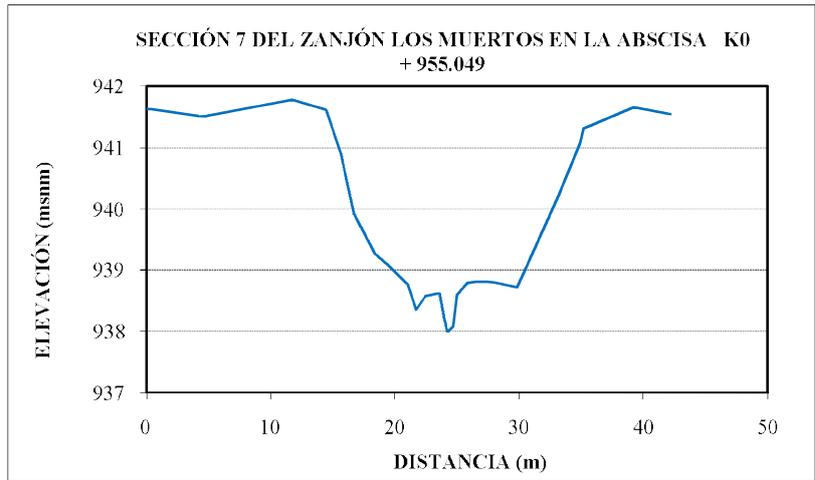


19.18	949.38
19.34	948.77
21.96	948.79
26.53	948.73
30.90	948.72
34.75	948.70

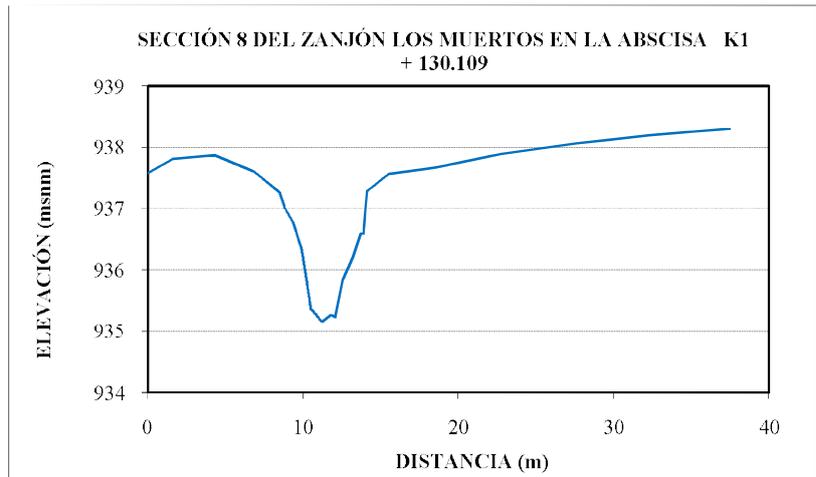
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	949.95
9.37	949.04
12.38	948.30
13.67	947.30
16.26	946.94
18.53	946.40
21.70	945.83
24.57	945.80
26.26	945.57
27.35	945.03
28.02	944.92
28.27	944.51
28.77	944.12
29.26	943.68
30.46	943.08
32.38	942.66
34.02	942.48
35.86	942.42
36.20	941.92
36.68	941.67
37.33	941.47
37.60	941.24
37.93	941.22
38.27	941.23
38.51	941.31
38.96	941.22
39.61	941.42
40.37	941.63
42.24	942.21
44.14	942.21
45.29	942.81
46.78	943.54
48.23	944.53
50.86	945.29
53.62	945.27
57.34	945.28
60.43	945.30



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	941.63
4.48	941.50
11.69	941.78
14.45	941.61
15.63	940.91
16.67	939.92
18.40	939.26
19.67	939.03
20.99	938.77
21.71	938.35
22.45	938.57
23.58	938.62
23.94	938.22
24.17	938.00
24.38	938.02
24.71	938.08
25.01	938.60
25.80	938.79
26.81	938.82
27.98	938.80
29.85	938.72
33.08	940.19
34.92	941.08
35.18	941.31
36.04	941.38
39.21	941.66
42.16	941.54



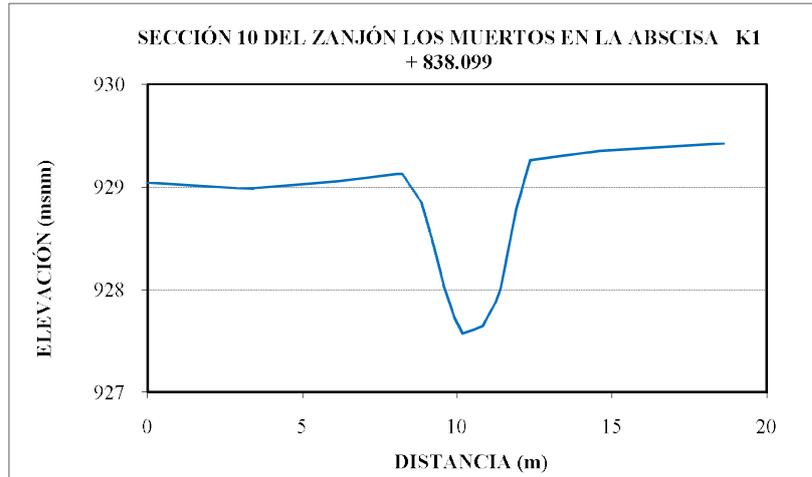
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	937.58
1.64	937.81
4.30	937.87
6.79	937.61
8.47	937.27
8.82	937.01
9.32	936.79
9.90	936.34
10.51	935.36
11.22	935.15
11.77	935.26
12.06	935.22
12.55	935.83
13.22	936.23
13.74	936.60
13.87	936.59
14.12	937.29
15.54	937.57
18.52	937.67
22.75	937.89
27.57	938.06
32.24	938.19
37.48	938.31



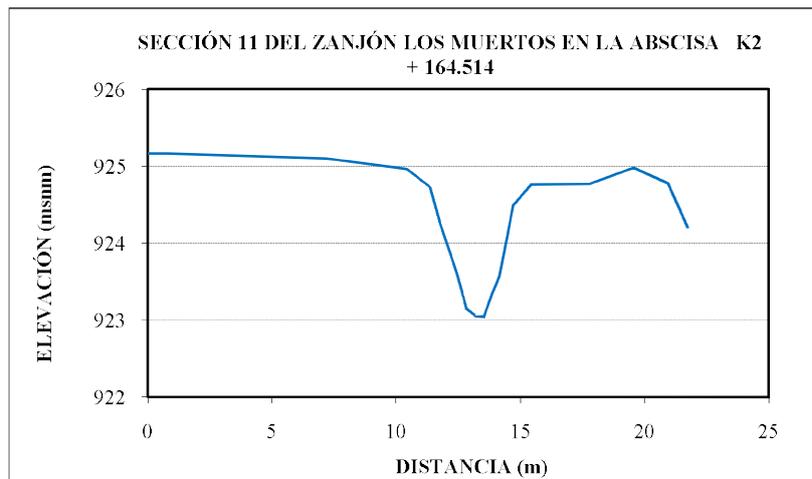
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	934.69
1.62	934.62
2.63	933.44
3.39	932.74
4.34	932.14
6.09	932.10
7.56	932.48
9.31	932.41
10.98	932.51
12.10	932.39
12.95	932.17
13.47	931.01
14.19	930.75
14.51	930.65
15.12	930.83
15.28	932.42
16.34	932.77
17.87	933.18
19.35	933.71
21.19	934.12
23.31	934.09
25.25	934.15
27.24	934.44
30.12	934.63
36.84	934.90
40.70	935.12
44.99	935.47
49.64	935.91
53.98	936.68



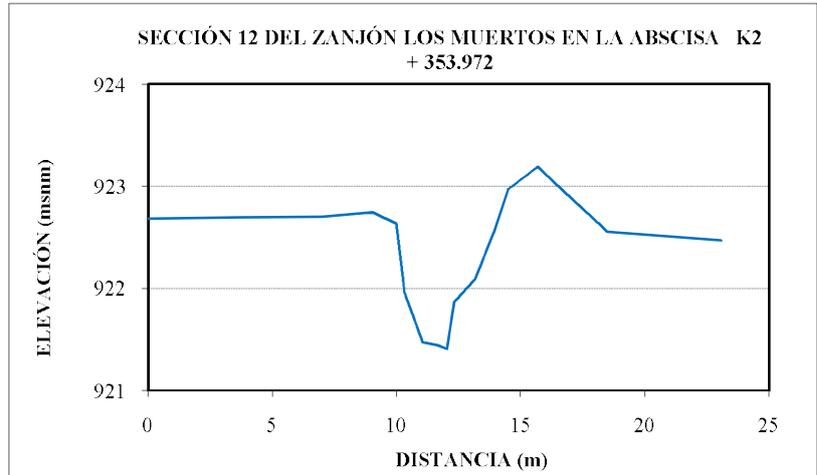
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	929.04
3.17	928.98
6.13	929.05
8.21	929.13
8.83	928.85
9.21	928.46
9.57	928.03
9.88	927.74
10.17	927.57
10.47	927.60
10.82	927.64
11.22	927.86
11.90	928.79
12.35	929.26
14.59	929.35
18.59	929.42



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	925.17
7.17	925.10
10.45	924.96
11.37	924.72
11.74	924.28
12.44	923.59
12.82	923.15
13.19	923.05
13.53	923.04
13.87	923.36
14.17	923.57
14.72	924.50
15.42	924.76
17.71	924.76
19.55	924.98
20.93	924.78
21.73	924.21



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	922.68
3.66	922.69
7.02	922.70
9.02	922.74
9.99	922.63
10.31	921.96
11.05	921.47
11.68	921.44
12.04	921.40
12.33	921.86
13.20	922.10
13.98	922.58
14.50	922.97
15.68	923.19
18.49	922.55
23.06	922.47

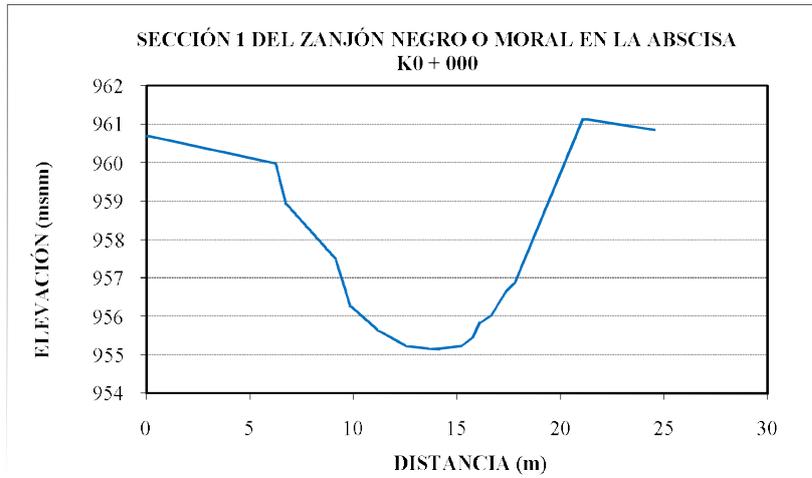


DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	920.85
3.27	920.95
14.37	920.95
20.43	921.13
20.85	921.04
21.91	920.02
22.44	920.02
23.38	920.53
23.76	921.03
24.66	921.48
26.97	920.97
29.76	920.88
37.16	920.91
46.96	920.91

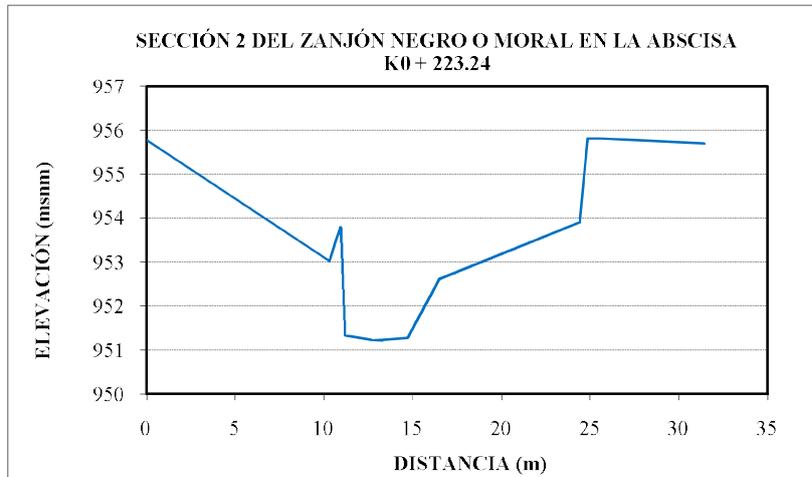


SECCIONES TRANSVERSALES DEL ZANJÓN NEGRO O MORAL

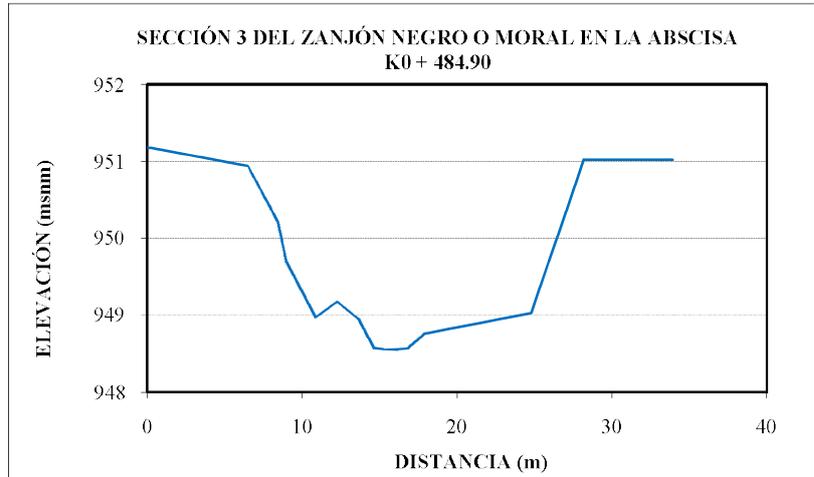
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	960.70
6.24	959.97
6.71	958.94
9.15	957.48
9.85	956.26
11.17	955.63
12.56	955.22
13.91	955.14
15.19	955.22
15.76	955.45
16.09	955.83
16.62	956.00
17.38	956.66
17.79	956.86
21.10	961.13
24.54	960.85



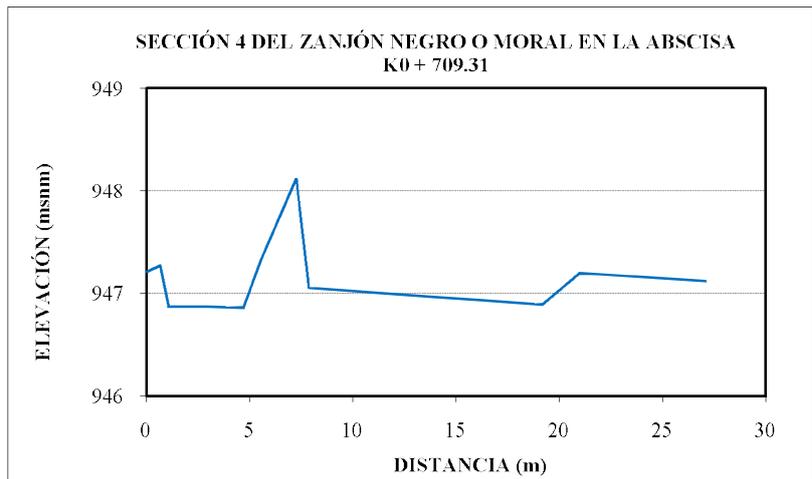
DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	955.78
10.28	953.02
10.94	953.81
11.19	951.33
12.84	951.22
14.71	951.28
16.51	952.62
24.39	953.91
24.87	955.83
31.44	955.70



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	951.18
6.50	950.94
8.42	950.22
8.96	949.69
10.86	948.97
12.25	949.17
13.63	948.95
14.62	948.57
15.61	948.55
16.76	948.56
17.91	948.76
24.75	949.02
28.22	951.03
33.89	951.02



DISTANCIA (m)	ELEVACIÓN (msnm)
0.00	947.21
0.69	947.27
1.06	946.87
3.00	946.87
4.70	946.86
5.55	947.33
7.26	948.12
7.86	947.05
19.19	946.89
20.99	947.20
27.07	947.12



Anexo 6.1 Curvas de calibración

ANEXO 6.1. CURVAS DE CALIBRACIÓN DE PUENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO DEL MUNICIPIO DE LA UNIÓN

Tabla A1. Puente Calle 12 en la sección 3 de la quebrada La Unión

N (m)	Q (m³/s)
0.00	0
1.60	10
2.03	20
2.47	30
3.23	50
4.26	70
5.17	100
6.91	150
9.38	200

Tabla A2. Puente Carrera 21 en la sección 10 de la quebrada La Unión

N (m)	Q (m³/s)
0.00	0
1.64	10
2.25	20
2.58	30
3.19	50
3.71	70
4.40	100
5.82	150
6.97	200

Tabla A3. Puente Carrera 19 en la sección 16 de la quebrada La Unión

N (m)	Q (m³/s)
0.00	0
1.14	10
1.78	20
2.45	30
3.47	50
4.29	70
4.75	100
7.17	150
6.90	200

Tabla A4. Puente Calle 8 en la sección 18 de la quebrada La Unión

N (m)	Q (m³/s)
0.00	0
1.85	10
2.72	20
3.26	30
4.80	50
5.18	70
5.80	100
9.32	150
7.56	200

Tabla A5. Puente peatonal en la sección 21 de la quebrada La Unión

N (m)	Q (m³/s)
0.00	0
1.76	10
2.44	20
2.97	30
3.73	50
4.15	70
6.97	100
13.14	150
6.12	200

Tabla A6. Puente Carrera 15 en la sección 22 de la quebrada La Unión

N (m)	Q (m³/s)
0.00	0
1.48	10
2.19	20
2.81	30
3.82	50
4.36	70
7.97	100
14.21	150
6.20	200

Tabla A7. Puente Carrera 14 en la sección 23 de la quebrada La Unión

N (m)	Q (m³/s)
0.00	0
1.20	10
1.87	20
2.38	30
3.61	50
4.33	70
5.89	100
8.89	150
5.72	200

Tabla A8. Puente Carrera 13 en la sección 24 de la quebrada La Unión

N (m)	Q (m³/s)
0.00	0
1.81	10
1.92	20
2.29	30
3.21	50
3.99	70
4.33	100
5.12	150
5.81	200

Tabla A9. Puente Carrera 11 en la sección 26 de la quebrada La Unión

N (m)	Q (m³/s)
0.00	0
1.45	10
2.07	20
2.57	30
3.37	50
4.11	70
5.31	100
6.17	150
6.70	200

Tabla A10. Puente Carrera 9 en la sección 28 de la quebrada La Unión

N (m)	Q (m³/s)
0.00	0
1.45	10
2.07	20
2.57	30
3.37	50
4.11	70
5.31	100
6.17	150
6.70	200

Tabla A11. Puente en la sección 10 de la quebrada El Rincón

N (m)	Q (m³/s)
0	0
1.06	2.00
1.50	5.00
2.03	10.00
2.43	15.00
2.74	20.00
3.29	30.00
3.70	40.00
4.33	60.00
5.60	66.00

Tabla A12. Puente en la sección 12 de la quebrada El Rincón

N (m)	Q (m³/s)
0	0
1.06	2.00
1.50	5.00
2.03	10.00
2.43	15.00
2.74	20.00
3.29	30.00
3.70	40.00
4.06	50.00
4.33	60.00
5.60	66.00

Tabla A13. Puente en la sección 2 del zanjón Los Muertos

N (m)	Q (m³/s)
0	0
0.76	1.00
0.99	2.00
1.15	3.00
1.28	4.00
1.48	6.00
1.57	7.00
1.65	8.00
1.72	9.00
1.80	10.00

Tabla A14. Puente en la sección 3 del zanjón Los Muertos

N (m)	Q (m³/s)
0	0
0.47	1.00
0.67	2.00
1.12	4.00
1.50	5.00
2.28	6.00
2.32	7.00
2.36	8.00
2.39	9.00
2.43	10.00

Tabla A15. Puente en la sección 4 del zanjón Los Muertos

N (m)	Q (m³/s)
0	0
0.69	1.00
0.97	2.00
1.20	3.00
1.39	4.00
1.61	5.00
2.96	6.00
2.99	7.00
3.02	8.00
3.05	9.00
3.08	10.00

Tabla A16. Puente en la sección 5 del zanjón Los Muertos

N (m)	Q (m³/s)
0	0
1.03	1.00
1.36	2.00
1.64	3.00
1.87	4.00
2.08	5.00
2.28	6.00
2.43	7.00
2.53	8.00
2.62	9.00
2.55	10.00

Tabla A17. Puente en la sección 5A del zanjón Los Muertos

N (m)	Q (m³/s)
0	0
0.49	1.00
0.73	2.00
1.08	4.00
1.24	5.00
1.38	6.00
1.51	7.00
1.60	8.00
1.71	9.00
1.83	10.00

Tabla A18. Puente en la sección 7 del zanjón Los Muertos

N (m)	Q (m³/s)
0	0
0.80	1.00
1.06	2.00
1.27	3.00
1.63	5.00
1.78	6.00
1.93	7.00
2.06	8.00
2.22	9.00
2.27	10.00

Tabla A19. Puente en la sección 8 del zanjón Los Muertos

N (m)	Q (m³/s)
0	0
0.58	1.00
0.81	2.00
0.98	3.00
1.12	4.00
1.33	6.00
1.41	7.00
1.50	8.00
1.57	9.00
1.65	10.00

Tabla A20. Puente en la sección 9A del zanjón Los Muertos

N (m)	Q (m³/s)
0	0
0.45	1.00
0.70	2.00
0.89	3.00
1.05	4.00
1.26	6.00
1.31	7.00
1.35	8.00
1.41	9.00
2.42	10.00

Tabla A21. Puente en la sección 10 del zanjón Los Muertos

N (m)	Q (m³/s)
0	0
0.58	1.00
0.81	2.00
0.98	3.00
1.12	4.00
1.23	5.00
1.41	7.00
1.50	8.00
1.57	9.00
1.65	10.00

12. MAPAS

- Mapa 7.1 Amenaza por inundaciones – Periodo de retorno 10 años**
- Mapa 7.2 Amenaza por inundaciones – Periodo de retorno 30 años**
- Mapa 7.3 Amenaza por inundaciones – Periodo de retorno 100 años**
- Mapa 7.4 Amenaza por inundaciones global**