

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

“Implementación de datos LiDar en el desarrollo de zonificación por inundación  
para el plan regulador del cantón de Aserrí”

Trabajo Final de Graduación  
para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola

Nancy Quesada Artavia.

San José, Costa Rica, 2015.

Esta tesis fue presentada el 2015 como requisito fundamental para optar por el Grado Licenciatura en Ingeniería Agrícola. Fue aprobada por el Tribunal Examinador constituido por las siguientes personas:

---

Ing. Georges Govaere, Ph.D.  
Lector-UCR

---

Geólogo. Lidier Esquivel Valverde  
Lector-CNE

---

Ing. Alejandra Rojas González, Ph.D.  
Directora-UCR

Ingeniería Agrícola

Ing. Kattia Solís, D.Sc.  
Lector-UCR

Ing. Matías Chaves  
Lector-UCR

---

Nancy Quesada Artavia  
Sustentante

## **Dedicatoria**

A mi familia: a mi mentora, amiga y madre, ella que me ha dado su apoyo incondicional, me ha dado esa palabra de aliento cuando más la necesite, la que me impulsa a seguir; a esa mujer que me ha dado su inmenso amor y es mi héroe, a Ruth Artavia Campos, quien me ha formado y me ha ayudado a ser quien soy; a mi segunda madre, primos y hermanos, que a la distancia o cerca llenan de fortalezas y alegrías mis días; a él (q.e.p.d).

## **Agradecimientos**

A Dios por acompañarme en cada momento, por darme salud y la capacidad para la realización de mis metas y la finalización del presente trabajo; a mis amigos, compañeros y aquellas personas que me brindaron su apoyo y mediante el cual he salido adelante.

A todas esas instituciones que facilitaron el suministro de información la cual fue fundamental para el desarrollo de la presente investigación, así como al segundo hogar y sus colaboradores que me han formado como profesional (Universidad de Costa Rica).



## RESUMEN

En el cantón de Aserrí, en la provincia de San José, se ubica un afluente del Río Cañas denominado Quebrada Suárez. En la micorcuena de la Quebrada Suárez se identifican las poblaciones de Lourdes y Suárez, las cuales en noviembre del 2010 se vieron afectadas por fuertes lluvias provocadas por el Huracán Tomas, esto aunado al uso de suelo así como al deslizamiento ubicado en la zona en estudio (El Burío) generó grandes pérdidas materiales. Por lo tanto y con el fin de realizar un análisis del riesgo por inundación es que se procede a realizar el presente estudio.

Mediante recopilación de información a instituciones gubernamentales, visitas de campo, la aplicación de tecnología LiDar y la implementación de programas como Hec-RAS 4.1.0, HEC-HMS 3.1, ArcMap 10, entre otros, se realizó un análisis hidrológico e hidráulico en la microcuena de la Quebrada Suárez. Una vez realizados estos análisis se generaron Mapas de Amenaza Potencial de Inundación para el evento ocurrido en noviembre del 2010 (Huracán Tomas) y diferentes caudales de diseño según periodos de retorno; así como una comparación entre Cartografía Nacional del cantón de Aserrí y tecnología LiDar levantada en la zona. Fue posible corroborar que el evento ocurrido en el 2010 no fue exclusivo del trasiego de agua por cuanto el caudal determinado ( $19,9 \text{ m}^3/\text{s}$ ) no provocó los efectos acontecidos; resultando necesario considerar arrastre de materiales y/o sedimentos provocados por el deslizamiento El Burío, lo cuales afectarían negativamente la sección transversal del cauce de la Quebrada Suárez.

Se concluyó que la tecnología LiDar es ideal para la generación de Mapas de Amenaza Potencial a Inundación por cuanto es posible obtener gran precisión de la zona en estudio, donde la Cartografía Nacional disponible no permite el análisis hidráulico a pequeña escala.

# Índice de contenidos

RESUMEN .....	iii
Índice de contenidos .....	iv
Índice de Tablas .....	vii
Índice de Figuras .....	ix
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Justificación .....	1
1.1.2 Especificaciones de la zona de proyecto .....	4
1.2 Objetivo General .....	9
1.2.1 Objetivos específicos .....	9
II. MARCO TEÓRICO .....	10
2.1 Estado actual de zona en estudio .....	10
2.2 Estudio hidrológico .....	11
2.3 Sistemas de Información Geográfico (SIG).....	11
2.4 Light Detection and Ranging (LiDar) .....	12
2.5 Sistema de modelación de ríos .....	13
2.6 Mapas de Amenazas. ....	14
III. METODOLOGÍA.....	16
3.1 Recopilación de información .....	16

3.2. Estudio físico de la cuenca .....	17
3.2.1 Delimitación del área en estudio.....	17
3.2.2 Manipulación de Tecnología LiDar.....	17
3.2.3 Pendiente del cauce .....	18
3.2.4 Aspecto Físico del suelo (Textura).....	18
3.3 Estudio de la Pluviometría. ....	19
3.3.1 Numero de curva (N) .....	20
3.3.2 Abstracciones Iniciales (Ia).....	21
3.3.3 Tiempo de concentración (Tc) .....	21
3.3.4 Tiempo de retardo (Lag Time) .....	23
3.4 Modelación Hidrológica e Hidráulica .....	23
3.4.1 Implementación de modelo Hec-Hms .....	23
3.4.2 Implementación de modelo Hec-Ras .....	24
3.5 Verificación del Modelo. ....	25
3.6 Estudio de Zonas Vulnerables a Inundación.....	25
3.7 Generación de Mapas de Amenaza Potencial de Inundación en la comunidad. ....	25
3.8 Comparación de datos LiDar y Cartografía Nacional en la generación de Mapas de Amenaza Potencial a Inundación. ....	26
IV. RESULTADOS .....	27
4.2 Estudio de la Pluviometría .....	31
4.3 Número de Curva Ponderado .....	32

4.3.1 Clasificación Hidrológica de los suelos .....	32
4.3.2 Condición de humedad antecedente .....	36
4.3.3 Condición Hidrológica .....	36
4.4 Abstracción Inicial (Ia).....	37
4.5 Tiempo de concentración (Tc).....	37
4.5.1 Flujo superficial en lámina (hortoniano) .....	39
4.5.2 Flujo superficial concentrado poco profundo .....	42
4.5.3 Flujo superficial concentrado en canales abiertos .....	42
4.6 Tiempo de retardo (Lag Time).....	49
4.7 Modelación Hidrológica e Hidráulica .....	49
4.7.1 Implementación de modelo Hec-Hms .....	49
4.7.2 Implementación de modelo Hec-Ras .....	55
4.8 Comparación de resultados de datos LiDar y Cartografía Nacional.....	84
V.    CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	91
5.1 Conclusiones.....	91
5.2 Recomendaciones .....	92
VI.    BIBLIOGRAFIA.....	94
ANEXOS .....	100

# Índice de Tablas

<b>TABLA 1.</b> DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA UTILIZADA. ....	16
<b>TABLA 2.</b> CANAL TRAPEZOIDAL. ....	22
<b>TABLA 3.</b> CANAL PARABÓLICO. ....	22
<b>TABLA 4.</b> PARÁMETROS DE LA MICROCUENCA SUAREZ.....	29
<b>TABLA 5.</b> ÁREA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE COBERTURA EN LA CUENCA SUÁREZ. ....	31
<b>TABLA 6.</b> ORDEN DE SUELO EN ZONA INICIAL DE ESTUDIO .....	34
<b>TABLA 7.</b> DETERMINACIÓN DE TEXTURA DEL SUELO EN ZONA EN ESTUDIO .....	35
<b>TABLA 8.</b> CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE. ....	36
<b>TABLA 9.</b> VALORES DE N SEGÚN EL TIPO DE COBERTURA PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA SUAREZ. ....	37
<b>TABLA 10.</b> TIEMPO DE TRÁNSITO PARA FLUJO SUPERFICIAL EN LÁMINA. ....	42
<b>TABLA 11.</b> TIEMPO DE TRÁNSITO PARA FLUJO SUPERFICIAL POCO PROFUNDO. ....	42
<b>TABLA 12.</b> PARÁMETROS A IMPLEMENTAR PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DEL TRAMO. ....	43
<b>TABLA 13.</b> PARÁMETROS DE CADA PERFIL TOPOGRÁFICO.....	48
<b>TABLA 14.</b> TIEMPO DE TRÁNSITO PARA FLUJO SUPERFICIAL CONCENTRADO EN CANALES ABIERTOS.....	48
<b>TABLA 15.</b> TIEMPO DE TRÁNSITO PARA LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA SUAREZ. ....	48
<b>TABLA 16.</b> TIEMPO DE RETARDO PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA SUAREZ.....	49
<b>TABLA 17.</b> PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA PARA EL PERIODO DE RETORNO INDICADO. ....	53
<b>TABLA 18.</b> COCIENTE PARA CADA T INDICADO.....	54
<b>TABLA 19.</b> CAUDALES MÁXIMOS DE DISEÑO PARA T = 2, 10, 25 Y 50. ....	55
<b>TABLA 20.</b> COMPARACIÓN HIDRÁULICA MEDIANTE EL PROGRAMA HCANALES ESTACIÓN 1133,61. ....	58

<b>TABLA 21.</b> COMPARACIÓN HIDRÁULICA MEDIANTE EL PROGRAMA HCANALES ESTACIÓN 156,42. ....	59
<b>TABLA 22.</b> DISTANCIAS HASTA LA SECCIÓN DE AGUAS ABAJO PARA CADA ESTACIÓN DE LA QUEBRADA SUÁREZ. ....	60
<b>TABLA 23.</b> MODELACIÓN HIDRÁULICA DE CAUDALES DE DISEÑO PARA EL EVENTO EN ESTUDIO, DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO Y ALTURAS SEGÚN ENTREVISTAS. ....	64
<b>TABLA 24.</b> MODELACIÓN HIDRÁULICA DE PUENTES. QUEBRADA SUÁREZ. ....	67
<b>TABLA 25.</b> N DE MANNING UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO HIDRÁULICO RESPECTO A COEFICIENTE DE RUGOSIDAD. ....	75
<b>TABLA 26.</b> COMPARACIÓN DE PLANES ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD N DE MANNING. ....	76
<b>TABLA 27.</b> MODELACIÓN ALTURA DE SEDIMENTACIÓN EN SECCIONES. ....	79
<b>TABLA 28.</b> COMPARACIÓN DEL ANCHO DE SUPERFICIE ENTRE LAS SECCIONES LIDAR Y LAS SECCIONES LIDAR MAS TOPOGRAFÍA. ...	82
<b>TABLA 29.</b> CLAVE PARA LAS CLASES TEXTURALES DEL SUELO. ....	101
<b>TABLA 30.</b> PRECIPITACIÓN DE LA TORMENTA (HURACÁN TOMÁS) PARA EL EVENTO OCURRIDO EL DE 0:00 AM DEL 01/11/2010 A 00:00 AM DEL 05/11/2010 CADA 5 MINUTOS. ....	102
<b>TABLA 31.</b> PRECIPITACIÓN DE LA TORMENTA DE 24 HORAS PARA EL EVENTO OCURRIDO EL DE 3:10 AM DEL 03/11/2010 A 03:10 AM DEL 04/11/2010 (HURACÁN TOMAS) CADA 5 MINUTOS.....	102
<b>TABLA 32.</b> PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA ANUAL (PDMÁx) EN MM, OBTENIDA EN LA ESTACIÓN 84116-SALITRILLOS DE ASERRÍ EN EL PERIODO 1991 AL 2013. ....	103
<b>TABLA 33.</b> HIETOGRAMA PARA T= 2, 10, 20, 25, 50 Y 100 AÑOS.....	103
<b>TABLA 34.</b> CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS SUELOS. ....	104
<b>TABLA 35.</b> NUMERO DE CURVA PARA DIFERENTES TIPOS DE COBERTURA Y CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE II.....	105
<b>TABLA 36.</b> COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING PARA FLUJO LAMINAR.....	106
<b>TABLA 37.</b> VALORES DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD N. ....	107

# Índice de Figuras

<b>FIGURA 1.</b> UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PROYECTO. ....	6
<b>FIGURA 2.</b> REGIONES GEOGRÁFICO-CLIMÁTICAS. FUENTE: SOLANO Y VILLALOBOS (2000) .....	7
<b>FIGURA 3.</b> SUBREGIONES GEOGRÁFICO-CLIMÁTICAS. FUENTE: SOLANO Y VILLALOBOS (2000). ....	8
<b>FIGURA 4.</b> DELIMITACIÓN DE LA MICROCUENCA DEL RIO CAÑAS Y DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SUÁREZ.....	28
<b>FIGURA 5.</b> TIPOS DE COBERTURA EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA SUAREZ. ....	30
<b>FIGURA 6.</b> HIETOGRAMA HURACÁN TOMAS .....	31
<b>FIGURA 7.</b> UBICACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO EN ZONA EN ESTUDIO. ....	33
<b>FIGURA 8.</b> MUESTRAS Y PRUEBAS DE SUELO. ....	35
<b>FIGURA 9.</b> LÍNEA DE FLUJO EN CUENCA DE QUEBRADA SUÁREZ.....	38
<b>FIGURA 10.</b> ORTOFOTOGRAFÍA EN TRAMO DE 90 M.....	40
<b>FIGURA 11.</b> PROFUNDIDAD DE LLUVIA DE LA TORMENTA DE 24 H CON $T_r= 2$ AÑOS MEDIANTE UNA DISTRIBUCIÓN GAMMA DE 3 PARÁMETROS. HIDROESTA.....	41
<b>FIGURA 12.</b> PERFILES TOPOGRÁFICOS MEDIANTE LIDAR (ORTOFOTOS Y MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL). ....	44
<b>FIGURA 13.</b> PERFIL TOPOGRÁFICO 1. SECCIÓN PARABÓLICA. ....	45
<b>FIGURA 14.</b> PERFIL TOPOGRÁFICO 2. SECCIÓN TRAPEZOIDAL.....	45
<b>FIGURA 15.</b> PERFIL TOPOGRÁFICO 3. SECCIÓN TRAPEZOIDAL.....	46
<b>FIGURA 16.</b> PERFIL TOPOGRÁFICO 4. SECCIÓN PARABÓLICA. ....	46
<b>FIGURA 17.</b> PERFIL TOPOGRÁFICO 5. SECCIÓN PARABÓLICA. ....	47
<b>FIGURA 18.</b> PERFIL TOPOGRÁFICO 6. SECCIÓN PARABÓLICA. ....	47
<b>FIGURA 19.</b> HIETOGRAMA INGRESADO EN EL ESTUDIO DE LA TORMENTA (00:00 AM DEL 01/11/2010 A 00:00 AM DEL 05/11/2010).....	50

<b>FIGURA 20.</b> RESUMEN GLOBAL DE LOS RESULTADOS EVENTO 01-06 DE NOVIEMBRE DE 2010.....	50
<b>FIGURA 21.</b> HIDROGRAMA RESULTANTE PARA EL EVENTO 03-04 DE NOVIEMBRE DE 2010.....	52
<b>FIGURA 22.</b> RESUMEN DE RESULTADO PARA LA SIMULACIÓN DEL EVENTO 03-04 DE NOVIEMBRE DE 2010.....	52
<b>FIGURA 23.</b> SECCIONES TRANSVERSALES LiDAR, CAMPO Y ESTRUCTURAS EN LA QUEBRADA SUÁREZ.....	56
<b>FIGURA 24.</b> SECCIONES TRANSVERSALES OBTENIDAS MEDIANTE TIN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE HEC GEORAS.....	57
<b>FIGURA 25.</b> COMPARACIÓN DE SECCIONES OBTENIDAS MEDIANTE LiDAR Y MEDIANTE LEVANTAMIENTO EN CAMPO.....	58
<b>FIGURA 26.</b> COMPARACIÓN DE SECCIONES OBTENIDAS MEDIANTE LiDAR Y MEDIANTE LEVANTAMIENTO EN CAMPO.....	59
<b>FIGURA 27.</b> MODELACIÓN Q = 19,9 m <sup>3</sup> /s. ESTACIÓN 1131,405BR U. ALTURA DEL AGUA 1425,57M. QUEBRADA SUÁREZ..	63
<b>FIGURA 28.</b> MODELACIÓN Q = 19,9 m <sup>3</sup> /s. ESTACIÓN 1051,574BR U. ALTURA DEL AGUA 1417,25M. QUEBRADA SUÁREZ..	63
<b>FIGURA 29.</b> MODELACIÓN Q = 60 m <sup>3</sup> /s. ESTACIÓN 1131,405BR U. ALTURA DEL AGUA 1427,34M .QUEBRADA SUÁREZ. ....	66
<b>FIGURA 30.</b> MODELACIÓN Q = 60 m <sup>3</sup> /s. ESTACIÓN 1051,574BR U. ALTURA DEL AGUA 1416,90M. QUEBRADA SUÁREZ. ....	66
<b>FIGURA 31.</b> MAPA DE AMENAZA POTENCIAL A INUNDACIÓN PARA UN CAUDAL DE 19,9 m <sup>3</sup> /s EN LA QUEBRADA SUÁREZ.....	69
<b>FIGURA 32.</b> MAPA DE AMENAZA POTENCIAL A INUNDACIÓN PARA UN CAUDAL DE 24,2 m <sup>3</sup> /s EN LA QUEBRADA SUÁREZ.....	70
<b>FIGURA 33.</b> MAPA DE AMENAZA POTENCIAL A INUNDACIÓN PARA UN CAUDAL DE 41,8 m <sup>3</sup> /s EN LA QUEBRADA SUÁREZ.....	71
<b>FIGURA 34.</b> MAPA DE AMENAZA POTENCIAL A INUNDACIÓN PARA UN CAUDAL DE 52,6 m <sup>3</sup> /s EN LA QUEBRADA SUÁREZ.....	72
<b>FIGURA 35.</b> MAPA DE AMENAZA POTENCIAL A INUNDACIÓN PARA UN CAUDAL DE 60,6 m <sup>3</sup> /s EN LA QUEBRADA SUÁREZ.....	73
<b>FIGURA 36.</b> MAPA DE AMENAZA POTENCIAL A INUNDACIÓN PARA UN CAUDAL DE 60 m <sup>3</sup> /s EN LA QUEBRADA SUÁREZ.....	74
<b>FIGURA 37.</b> ALTURA DE AGUA 1427,23 M. ESTACIÓN 1131,405BR U. QUEBRADA SUAREZ. ....	78
<b>FIGURA 38.</b> ALTURA DE AGUA 1416,91 M. ESTACIÓN 1051,574 BR U. QUEBRADA SUAREZ. ....	78
<b>FIGURA 39.</b> MAPA DE AMENAZA POTENCIAL A INUNDACIÓN PARA UNA MODELACIÓN DE SEDIMENTACIÓN PARA CAUDAL DE 19,9 m <sup>3</sup> /s EN LA QUEBRADA SUÁREZ.....	81
<b>FIGURA 40.</b> SECCIONES TRANSVERSALES LiDAR SOBREPUESTAS SOBRE TIN CARTOGRAFÍA NACIONAL.....	85
<b>FIGURA 41.</b> FOTOGRAFÍA AÉREA Y SECCIONES TRANSVERSALES SOBRE TIN CARTOGRAFÍA NACIONAL.....	87



<b>FIGURA 42.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL ESTACIÓN 0 SEGÚN TIN CARTOGRAFÍA NACIONAL. QUEBRADA SUÁREZ.....	88
<b>FIGURA 43.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL ESTACIÓN 121,29 SEGÚN TIN CARTOGRAFÍA NACIONAL. QUEBRADA SUÁREZ.....	89
<b>FIGURA 44.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL ESTACIÓN 467,44 SEGÚN TIN CARTOGRAFÍA NACIONAL. QUEBRADA SUÁREZ.....	89
<b>FIGURA 45.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL ESTACIÓN 1106,02 SEGÚN TIN CARTOGRAFÍA NACIONAL. QUEBRADA SUÁREZ.....	90
<b>FIGURA 46.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA QUEBRADA SUAREZ OBTENIDA EN CAMPO. ....	108
<b>FIGURA 47.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA QUEBRADA SUAREZ OBTENIDA EN CAMPO. ....	108
<b>FIGURA 48.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA QUEBRADA SUAREZ OBTENIDA EN CAMPO. ....	109
<b>FIGURA 49.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA QUEBRADA SUAREZ OBTENIDA EN CAMPO. ....	109
<b>FIGURA 50.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA QUEBRADA SUAREZ OBTENIDA EN CAMPO. ....	110
<b>FIGURA 51.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA QUEBRADA SUAREZ OBTENIDA EN CAMPO. ....	110
<b>FIGURA 52.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA QUEBRADA SUAREZ OBTENIDA EN CAMPO. ....	111
<b>FIGURA 53.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA QUEBRADA SUAREZ OBTENIDA EN CAMPO. FUENTE: ESTUDIANTES HIDROLOGÍA UCR 2014. ....	111
<b>FIGURA 54.</b> DISTRIBUCIÓN NORMAL DE PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA ANUAL (PDMÁx) 1991 AL 2013.....	112
<b>FIGURA 55.</b> DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL DE 2 PARÁMETROS DE PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA ANUAL (PDMÁx) 1991 AL 2013. ....	113
<b>FIGURA 56.</b> DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL DE 3 PARÁMETROS DE PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA ANUAL (PDMÁx) 1991 AL 2013. ....	114
<b>FIGURA 57.</b> DISTRIBUCIÓN GAMMA DE 2 PARÁMETROS DE PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA ANUAL (PDMÁx) 1991 AL 2013. ....	115
<b>FIGURA 58.</b> DISTRIBUCIÓN GAMMA DE 3 PARÁMETROS DE PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA ANUAL (PDMÁx) 1991 AL 2013. ....	116
<b>FIGURA 59.</b> DISTRIBUCIÓN LOG-PEARSON TIPO III DE PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA ANUAL (PDMÁx) 1991 AL 2013. ....	117
<b>FIGURA 60.</b> DISTRIBUCIÓN GUMBEL DE PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA ANUAL (PDMÁx) 1991 AL 2013. ....	118
<b>FIGURA 61.</b> CAUCE DE LA QUEBRADA SUÁREZ ESTACIÓN 1042,59 .....	119
<b>FIGURA 62.</b> PUENTE SOBRE LA QUEBRADA SUÁREZ ESTACIÓN 1133,61.....	120

<b>FIGURA 63.</b> CAUCE DE LA QUEBRADA SUÁREZ ESTACIÓN 406,74. ....	120
<b>FIGURA 64.</b> PUENTE SOBRE LA QUEBRADA SUÁREZ ESTACIÓN 406,74.....	121
<b>FIGURA 65.</b> CAUCE DE LA QUEBRADA SUÁREZ ESTACIÓN 156,42. ....	121
<b>FIGURA 66.</b> PUENTE SOBRE LA QUEBRADA SUÁREZ ESTACIÓN 141,35.....	122
<b>FIGURA 67.</b> CAUCE DE LA QUEBRADA SUÁREZ. ESTACIÓN 1561,29. FUENTE: ESTUDIANTES HIDROLOGÍA UCR 2014. ....	122

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Justificación

En Costa Rica según lo que muestra la historia, se podría identificar las inundaciones, los sismos, los deslizamientos, las erupciones volcánicas y el desarrollo acelerado de la urbanización como insumos para el aumento en la frecuencia de los desastres; provocando así una afectación directa en el bienestar de la población.

Durante el Siglo XX Costa Rica fue afectado por 22 sismos y 11 eventos volcánicos con algún grado de afectación, siendo las más importantes en la historia reciente la erupción del Volcán Irazú entre 1963 y 1965 y la erupción del Volcán Arenal en 1968 (CNE, 2010).

Entre el año 1980 y el 2010 las inundaciones en Costa Rica abarcan el mayor número de Desastres ocurridos por año, con un promedio de 0,71 inundaciones por año; seguido por los terremotos con un promedio de 0,35 por año, superando así desastres como: sequias, epidemias, temperaturas extremas, plagas, deslizamientos, avalanchas, erupciones volcánicas, tormentas e incendios (PreventionWeb, 2014).

En el año 1996 se vieron afectadas 500,000 personas por eventos de tormenta en el país, decreciendo en el número de personas afectadas, se encuentra el año 1991 donde las inundaciones afectaron a 185,021 personas (PreventionWeb, 2014), por lo tanto se torna preocupante el gran número de personas en Costa Rica afectadas por la influencia de eventos Hidrometeorológicos por año.

Se define como Eventos Hidrometeorológicos: las inundaciones, cabezas de agua, avalanchas, huracanes, tormenta tropical, fenómeno del niño y fenómeno de la niña (CNE, 2012). La mayoría de eventos hidrometeorológicos en Costa Rica se generan paralelamente con la inundación. Desde el año 1861 al año 2012, se

registraron 115 eventos hidrometeorológicos, en los cuales las inundaciones figuraron como actores principales (CNE, 2012).

Es posible identificar las comunidades más afectadas por inundaciones donde se evidencia que en las siete provincias de Costa Rica existen cuerpos de agua que han provocado trastornos como: daños a la agricultura, vivienda, comercio y líneas vitales, en un período de recurrencia de un año, extendiéndose el mismo hasta cinco años (CNE, 2012).

Los desastres naturales tales como las inundaciones en el territorio nacional; las cuales se definen como la ubicación del agua en lugares donde normalmente se encuentran sin la presencia de la misma; han mostrado la disminución de periodos en la recurrencia de las mismas lo cual puede atribuirse al desarrollo urbano en forma desordenada y sin planificación, ubicándose grupos familiares y estructuras en las planicies de inundación así como en las zonas de protección de los cauces del lugar.

Por lo tanto y con el fin de identificar zonas vulnerables a inundación es que se procede a utilizar datos LiDar para realizar modelaciones mediante Sistemas de Información Geográfico en la zona de Aserrí. Donde se determinará el comportamiento de los cauces en puntos de interés en que se intensifique la problemática de inundación. Obteniendo como resultado la generación de Mapas de Amenaza Potencial de Inundación donde se recopilan y presentan datos sobre el riesgo de inundaciones para cuerpos de agua específicos en la comunidad.

Los datos LiDar (Light Detection and Ranging, según sus siglas en inglés) corresponde a una tecnología especializada en levantamientos topográficos donde se determina la distancia desde un láser hasta una superficie.

Según menciona el M.Sc. Eddison Araya Morales funcionario del Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica de la Universidad Nacional,

Heredía en curso denominado APLICACIÓN DE MODELADO 3D Y ANALISIS ESPACIAL EN RECURSOS NATURALES CON ARCGIS VERSION 10.2; la tecnología LiDar en Costa Rica desde el punto de vista de capacitación es incipiente. Igualmente el Geólogo Lidier Esquivel Valverde Jefe del Dpto. de Prevención y Mitigación de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias indica que son pocas las instituciones que trabajan con la tecnología LiDar, esto por su elevado costo de adquisición; instituciones como su representada poseen este tipo de tecnología en específicas zonas del país por cuanto es necesario un análisis preciso de la topografía del lugar con el fin de generar Mapas de Amenazas. Lo anteriormente corroborado, previa consulta de las bibliotecas y la base de datos de la Unidad Académica Ciudad Universitaria Rodrigo Facio así como consulta de sitios web.

Como menciona Fernández, 2010, en Europa el procesamiento masivo de información obtenida a través de sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) excede fácilmente las posibilidades de procesamiento de los ordenadores convencionales. Actualmente, organizaciones públicas y privadas acumulan grandes colecciones de datos derivados de este tipo de sensor sin que los usuarios puedan tener acceso a ellos de manera ágil y eficiente. El elevado coste de las licencias y la complejidad del software necesario para procesar un conjunto de datos derivados de sensores LiDAR, reduce significativamente el número de usuarios con herramientas para su explotación a un número limitado de proveedores. Por lo que se generan nuevos esfuerzos que se concentran en hacer que esta información sea accesible para cualquier usuario.

En comparación a los Mapas de Amenaza Potencial de Inundación que serán generados mediante tecnología LiDar; la cual permite una precisión de superficie entre 10 a 15 centímetros; los elementos de amenaza indicados en los Mapas de Amenaza elaborados por la CNE pueden requerir ajustes respecto a su ubicación cuando se analicen a escalas menores.

Por lo anteriormente citado la CNE recomienda utilizar los Mapas de Amenazas como una orientación general respecto al tema y en ningún caso implementarse como sustituto de mapas técnicos especializados a menor escala; como si corresponderían los Mapas de Amenaza Potencial de Inundación que serán generados en el presente estudio para ser aplicados en el Plan Regulador de la zona en análisis.

### **1.1.2 Especificaciones de la zona de proyecto**

Mediante ley No. 3 del 27 de noviembre de 1882, se creó Aserrí como cantón de la provincia de San José, designándose como cabecera al pueblo del mismo nombre. Aserrí procede del cantón de Desamparados, este último establecido en ley No. 22 del 4 de noviembre de 1862.

Aserrí se ubica al sur de la ciudad de San José, en la zona limítrofe con la Provincia de Cartago. Limita con Desamparados, Acosta, Alajuelita, Parrita, León Cortes y Tarrazú.

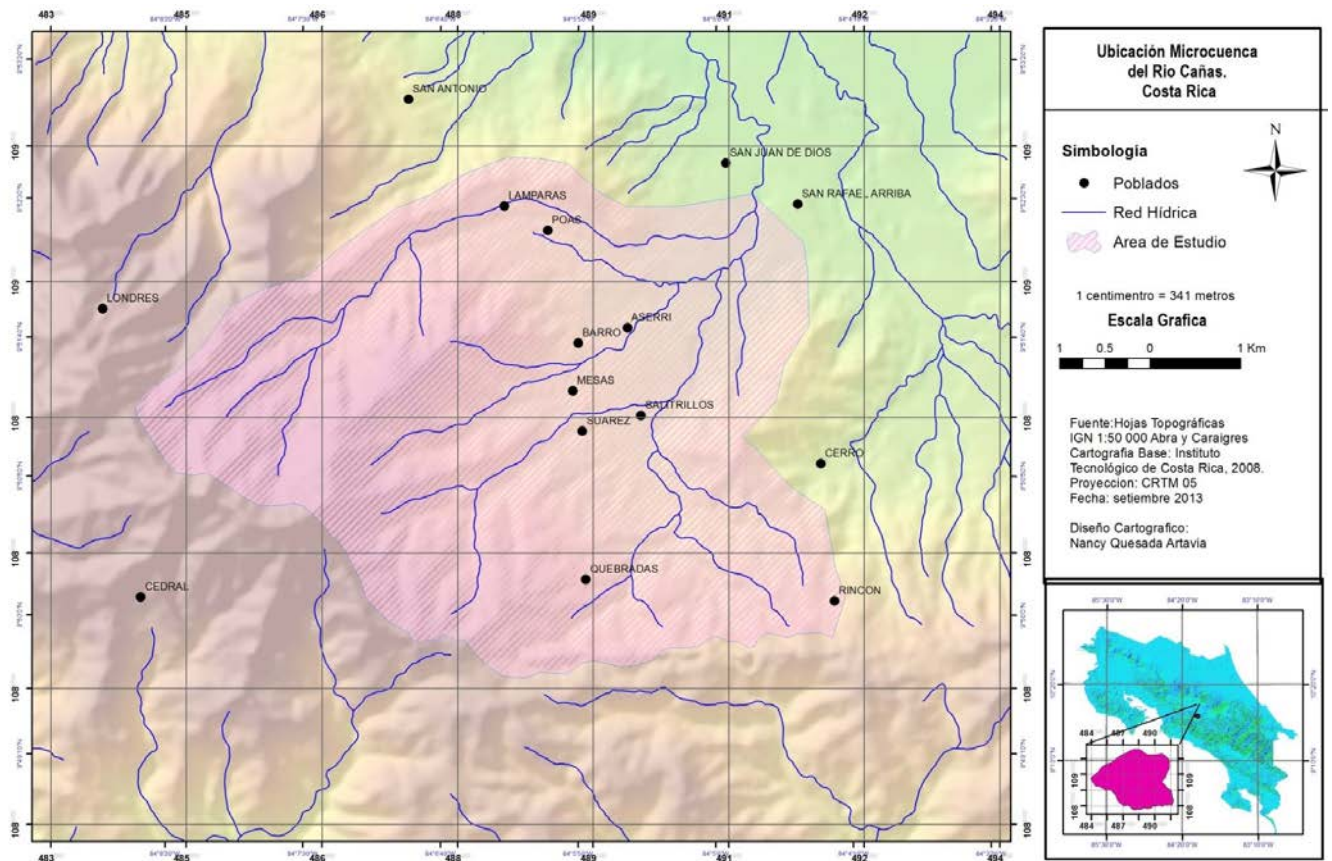
Aserrí es un cantón montañoso donde su punto más bajo ronda los 1 100 msnm y sus montañas superan los 2 000 msnm en algunos puntos. Para los centros urbanos de los distritos del cantón correspondería una mayor altura de 1 796 msnm en Tarbaca y menor altura de 1 100 msnm en Monterrey.

La anchura máxima es de veintinueve kilómetros, en dirección noreste a suroeste, desde la confluencia de los ríos Poás y Cañas hasta la naciente de la quebrada Florida, en las laderas del cerro Cabeza de Chanco.

El cantón de Aserrí presenta cuatro unidades geomorfológicas, denominadas forma de origen tectónico y erosivo, originada por acción intrusiva, de origen volcánico y de origen estructural donde todas las unidades se caracterizan por presentar laderas de fuerte pendiente.

Específicamente el cantón número 6 de la Provincia de San José, Costa Rica: Aserrí, está localizado al pie de las colinas de la Cordillera de Talamanca, posee una red fluvial bien definida compuesta principalmente por los Ríos Cañas, Grande de Candelaria y Rio Suerre los cuales se pueden considerar constituyen la principal amenaza hidrometeorológica del cantón.

La zona en estudio corresponde a la micro cuenca del Rio Cañas, se ubica entre los distritos de Salitrillos y Aserrí del cantón de Aserrí de la Provincia de San José, la cual tiene como afluentes los Ríos Poas y Suerre. El área de la microcuenca del Rio Cañas es de 17,90 km<sup>2</sup> y su perímetro es de 23,35 km. Se encuentra en las hojas topográficas Abra 3345 I y Carraigres 3345 II escala 1:50 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Mediante la Figura 1, se detalla la red hídrica, poblados y área de estudio en el cantón de Aserrí.



**Figura 1.** Ubicación Geográfica del proyecto.

Según las Regiones y Subregiones Climáticas de Costa Rica definidas por Solano y Villalobos, 2000, se establecen siete regiones básicas, cada una con sus respectivas subregiones, lo cual se muestra en la Figura 2.

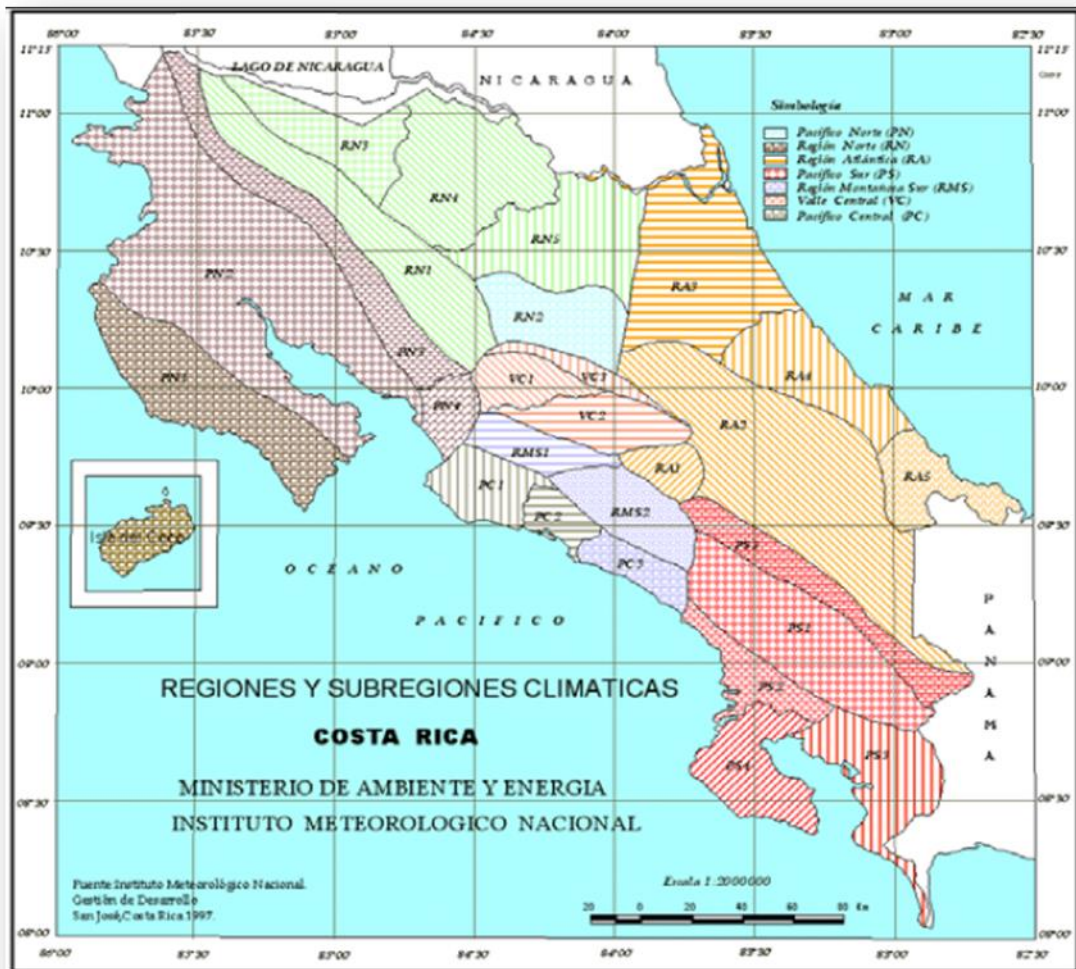




**Figura 2.** Regiones geográfico-climáticas. Fuente: Solano y Villalobos (2000)

El cantón de Aserrí se ubica en la región climática denominada como Valle Central Oriental (VC2) (Figura 3.), con una lluvia media de 2016 mm, temperatura máxima media anual de 26°C, temperatura mínima media anual de 15°C, temperatura media anual de 20°C, con un promedio de días con lluvia de 128 y una duración de 1 meses para el período seco, con una formación forestal de Bosque Muy

Húmedo Subtropical: bosque de media altura, siempre verde de dos o tres estratos (Solano y Villalobos, 2000).



**Figura 3.** Subregiones geográfico-climáticas. Fuente: Solano y Villalobos (2000).

## **1.2 Objetivo General**

Desarrollar un análisis del riesgo por inundación implementado modelos hidrológicos e hidráulicos para el desarrollo de zonificación en el plan regulador del cantón de Aserrí, San José, en la subcuenta del Rio Cañas específicamente en la microcuenca de la Quebrada Suárez mediante la aplicación de la tecnología LiDar.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- ❖ Identificar zonas vulnerables a inundación en el cantón de Aserrí, en la subcuenca del Rio Cañas específicamente en la microcuenca de la Quebrada Suárez, mediante la implementación de la tecnología LiDar.
- ❖ Generar Mapas de Amenaza Potencial de Inundación en el cantón de Aserrí, en la subcuenca del Rio Cañas en la microcuenca de la Quebrada Suárez, para el desarrollo de zonificación en la comunidad de Aserrí.
- ❖ Realizar comparación de resultados obtenidos mediante la implementación de tecnología LiDar y mapas de cartografía existente en el cantón de Aserrí.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Estado actual de zona en estudio

El cantón de Aserrí presenta hacia la parte sur denominada como los cerros de Escazú, un deslizamiento de magnitud significativa, mismo deslizamiento que es conocido como deslizamiento de Burío. Se determina según Hernández (1994) que el área del mismo es de alrededor de 25,8 ha y un volumen de alrededor de 2,6 millones de metros cúbicos.

Del deslizamiento de Burío se tiene conocimiento, de que el inicio del mismo se pudo presentar desde el año de 1955, a partir de dicha fecha se han venido presentando movimientos cada año los cuales han variado de acuerdo a las condiciones hidrometeorológicas.

Hernández (1994) realiza un informe de avance respecto al área afectada por el deslizamiento y aquella que podría verse afectada por una eventual avalancha de lodo de diferentes magnitudes para la generación de un plan de alerta para las poblaciones afectadas, interviniendo en el proceso La Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. Sin embargo a la fecha el cantón de Aserrí no cuenta con un plan regulador.

No fue posible la ubicación de investigaciones realizadas en la zona en las cuales se implemente tecnología LiDar por cuanto la misma tienen un costo elevado de adquisición y son pocas las instituciones en Costa Rica que pueden disponer de la misma.

Igualmente en la zona no se determinó la existencia de estudios en lo que se generen mapas de amenaza potenciales de inundación mediante modelaciones hidrológicas e hidráulicas. Por lo tanto se procede a investigar estudios realizados fuera del país que se hayan desarrollado mediante una metodología similar a la planteada mediante el presente estudio donde se podrá observar la utilidad del conocimiento adquirido.

## **2.2 Estudio hidrológico**

Así como menciona Martínez (2009) la utilización de sensores laser desde plataformas aéreas (LiDar) ofrece nuevas posibilidades en el cartografiado de sistemas fluviales, tanto en áreas densamente cubiertas por vegetación, como en aquellas que presentan una escasa cubierta. La información topográfica de alta resolución que se obtiene a partir de las medidas laser puede ser utilizada en el análisis y estimación de diversas variables hidrológicas, y en el estudio de diferentes componentes del medio fluvial.

El estudio hidrológico cede al analista los métodos para resolver problemas en el diseño y operación de estructuras hidráulicas así como la regulación de los cursos de agua y control de inundación, entre otros. Es posible la generación de una modelación y caracterización de una cuenca hidrográfica mediante instrumentos computacionales iniciando con un estudio topográfico y delimitación de la misma. Sin embargo y como según concluye Martínez (2009) los datos de elevaciones obtenidos no son perfectos; LiDar no puede delinear con precisión los límites de cursos de agua, líneas de costa o aristas naturales visibles en imágenes fotográficas; donde la precisión está limitada por los errores inherentes al GPS.

## **2.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Los Sistemas de Información Geográfica, según menciona Wallace (2010) es una tecnología que recientemente tuvo una transformación de pasar de un nicho de tecnología de soporte a una línea de herramientas que deben ser usadas en gran variedad de industrias, incrementando el impacto de SIG en la administración del recurso hídrico.

Los Sistemas de Información Geográficos (SIG) constituyen el conjunto de procedimientos diseñados para procesar la captura, recolección, administración, manipulación, transformación, análisis, modelaje y graficación de información que tiene referencia en el espacio. Los SIG permiten representar y localizar

especialmente estadísticas e indicadores, estudiar su evolución, así como localizar zonas vulnerables o sujetas a riesgos dados por fenómenos naturales o de carácter antrópico, realizar evaluaciones de los sistemas ambientales (suelos, agua, biodiversidad), analizar la distribución de la pobreza, infraestructura y, por la capacidad sintetizadora de la información, contribuir a generar una visión integrada que permita comprender y estudiar la sostenibilidad del desarrollo en los países de la región (CEPAL, 2013).

Como bien lo indica Brotóns, (2010), la modelización del terreno mediante Sistemas de Información Geográficos resulta de vital importancia en áreas como la hidrología, siendo un factor determinante de la calidad de los estudios; mediante su trabajo realiza un análisis comparativo entre modelos digitales de elevaciones (MDE) generados mediante diferentes métodos de interpolación y uno obtenido mediante tecnología LiDar asumiendo este como verdad-terreno se establece cuál de los modelos interpolados representa con mayor fidelidad la superficie terrestre. Las técnicas de interpolación utilizadas han sido la lineal, splines, red irregular de triángulos (TIN por sus siglas en inglés) y ANUDEM (la cual utiliza una interpolación iterativa en diferencias finitas) obteniendo un total de 4 MDEs interpolados; concluyendo así que los mejores resultados parecen obtenerse con los algoritmos TIN y ANUDEM y el número de valores anómalos resulta especialmente alto con el algoritmo splines.

## **2.4 Light Detection and Ranging (LiDar)**

*“El LIDAR (de light detection and ranging) es una técnica de teledetección óptica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de x, y y z” (Esri, 2014).*

Mediante la implementación de la tecnología LiDar es posible generar: fotografías ortorectificadas, modelos digitales del terreno, contorno de los modelos, cartografía topográfica, la altura, diámetro de la copa, estimación de la biomasa, etc. Análisis de drenaje y la erosión del suelo (Castro, 2011).

Ya que en el presente estudio es necesario la determinación de la zona boscosa según Gil-Yepes (2011) la tecnología LiDar se ha utilizado durante los últimos años para la caracterización de zonas forestales mediante el procesado de datos LiDar, pre-procesado y filtrado de imágenes y clasificaciones donde los resultados de los datos obtenidos combinando estos tipos de datos y aplicando varios algoritmos superan el 81% de aciertos en tareas de detección y delimitación de árboles.

Igualmente y por tratarse la zona de estudio de una zona montañosa deberá considerarse lo determinado por Colby (2010) donde realiza un estudio de inundación utilizando información hidrológica obtenida de los Huracanes Floyd e Ivan en la zona del Río Tar en planicies costeras y del Río Watauga en las montañas de Carolina del Norte. Los modelos de inundación en las planicies costeras con poca diferencia del relieve se encontró especialmente sensible a la representación del terreno donde una resolución de 6,1x6,1m LiDar es donde se generan mejores resultados; los datos LiDar 30x30m generan resultados similares a los datos LiDar 15,2x15,2m, sin embargo en las zonas montañosas los datos LiDar con resolución de 15,2x15,2m pueden ser útiles mas no así con modelos de precisión de 30x30m los cuales son dramáticamente inadecuados para la modelación de inundación.

## **2.5 Sistema de modelación de ríos**

El HEC-Ras es una herramienta computacional unidimensional para la modelación hidráulica, con ella el usuario puede realizar cálculos numéricos, de una manera simple e intuitiva de ejes hidráulicos en cursos naturales de ríos, a los cuales se les puede agregar singularidades producidas por la intervención del ser humano, como puentes, alcantarillas, vertederos laterales, etc, (Villón, 2011).

FLO-2D es una herramienta de predicción y evaluación hidráulica bidimensional, aprobado por la Agencia Federal de Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA, por sus siglas en inglés). Es un modelo que permite la simulación

de inundaciones en topografías complejas, combina el análisis hidrológico e hidráulico por lo que no hay necesidad de separar la precipitación y el tránsito de avenidas (FLO-2D, 2014).

Según menciona Shatnawi (2010) en su estudio de comparación de la predicción de la anchura superior de inundación usando secciones geométricas del canal derivadas de levantamientos topográficos y LiDar; donde se utilizan tres geometrías del canal: (1) basado solamente en datos de levantamientos, (2) basado en datos LiDar y (3) basado en un híbrido entre los dos anteriores y realizando la modelación mediante Hec-Ras; para el área de estudio que comprende una sección de 6,6 km del río localizado en Piedmont de Carolina del Norte; para periodos de retorno de 10, 50, 100 y 500 años se determina que la geometría derivada de LiDar generalmente realiza predicciones de anchuras superiores comparada con la geometría de los levantamientos, y la magnitud de las diferencias es inversamente proporcional al periodo de retorno de la tormenta (12% de diferencia para un evento con periodo de retorno de 10 años y un 4% para un evento de 500 años de periodo de retorno).

Para la modelación de la zona en estudio es necesario conocer un caudal de diseño para un periodo de retorno definido, las secciones transversales del cauce y pendiente, etc; con lo que se realizará un diseño gráfico del evento a evaluar identificando condiciones críticas para el flujo del agua mediante la implementación de un modelo unidimensional o para topografías más complejas con flujos secundarios o zonas inundables con forma de abanicos aluviales una modelación bidimensional es preferible.

## **2.6 Mapas de Amenazas.**

El riesgo es la probabilidad de que se presenten pérdidas, daños o consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio particular y durante un periodo definido. Se obtiene al relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Ley 8488, 2014).



Usualmente la información de las áreas inundadas y de los niveles de amenaza se representa en forma de mapas (Ineter, 2005). *Los “Mapas de Amenaza son un producto preliminar, elaborado por la CNE en su mayoría con fuentes a escala 1:50.000 o mayores para todo el país. Como tal, representa una aproximación al inventario de fuentes de amenazas del territorio, según la información disponible y a la que se ha tenido acceso. Debido a la escala y a la ausencia de información base, el mapa tiene limitaciones implícitas...”*, (CNE, 2012).

Wang (2005) mediante una comparación entre Modelos de Elevación Digital (MED) LiDar con resoluciones de 6,1x6,1m y 15,2x15,2m y un modelo de elevación digital de la base de datos de elevaciones Nacional con una resolución espacial de 30x30 m (NED) en llanuras de inundación en Carolina del Norte determina que existe cierta diferencia entre MED LiDar versus MED NED; los patrones espaciales de las categorías individuales de los mapas coincidieron en 87,4-95,0%. Para la modelación de inundación fueron comparados con el evento de inundación del año 1999 donde la precisión de los sitios inundados y no inundados se ubica en un ámbito de 92,5-96,1%.

Existen diversas metodologías para la elaboración de mapas de amenazas por inundación, la implementación de cada una depende del objetivo del mapa y de la disponibilidad a información.

Con la generación del presente estudio mediante el cual se obtendrá Mapas de Amenaza Potencial de Inundación similares a los generado por la CNE en menor escala, ampliando los mismos el grado de detalle de los Mapas de Amenazas será posible la toma de decisiones con fundamento en riesgos por inundación para instituciones como las municipalidades para el desarrollo del Plan Regulador respectivo de la zona, permite identificar medidas con el fin de asegurar el bienestar de los habitantes.

### III. METODOLOGÍA

El presente proyecto de tesis se desarrollan las siguientes fases para alcanzar los objetivos planteados.

#### 3.1 Recopilación de información

Acudir a instituciones gubernamentales con el fin de obtener información real e histórica de la zona en estudio como el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). Igualmente con la realización de visitas de campo.

Mediante la colaboración el ICE se recopiló la información meteorológica de la estación más cercana a la zona en estudio, observándose las características de la misma mediante la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Descripción de la estación meteorológica utilizada.

Estación	Sistema de Coordenadas CRTM-05		Elevación (m.s.n.m)
	Latitud	Longitud	
84116-Salitrillos de Aserrí	1090648	491505	1 381

Por parte de la CNE se obtuvo la tecnología LiDar 2012, donde se aportaron el Modelo de Elevación Digital y Ortofotografías de la zona en análisis.

Con la ayuda del ATLAS 2014 elaborado por el Instituto Tecnológico de Costa Rica fue posible la adquisición de la cartografía existente en la zona para los datos de elevación sobre el terreno, con una resolución de 10 x 10 metros, generada a partir de datos de elevación de cartografía de Costa Rica, incluyendo Google Earth y

cartografía 1:5000. Fuente identificada mediante la consulta a los metadatos según norma ISO 19139.

Mediante visitas de campo se determinó algunas secciones transversales del cauce de la Quebrada Suarez y muestras de suelo de la zona de estudio.

## **3.2. Estudio físico de la cuenca**

### **3.2.1 Delimitación del área en estudio.**

Mediante Sistemas de Información Geográfico ArcMap 10 aplicando la herramienta Arc Hydro Tools, la manipulación del Modelo de Elevación Digital del Terreno, ortofotografías, capacidad del equipo procesador de información y según afectación provocada por el Huracán Tomas en noviembre del año 2010, se determinó las aéreas necesarias para el análisis de las zonas vulnerables por inundación.

Se delimitó la cuenca de la Quebrada Suárez siguiendo las líneas del “divortium acquarum” (parteaguas), la cual es una línea imaginaria que divide las cuencas adyacentes; finalizando la delimitación en los puntos de interés tomando como parámetro zonas con histórico de problemas por inundación, ubicación de los grupos familiares y las intersecciones de los cauces con carreteras nacionales (Ilustración 4).

Para la determinación de las diferentes coberturas presentes en la zona en estudio se utilizan las Ortofotos 2012, facilitadas por la CNE, y mediante la realización de una calificación no supervisada con el programa Arc Map 10 se obtuvo el área correspondiente para cada tipo de cobertura donde se consideraron tres tipos de cobertura según las imágenes disponibles y la zona en estudio: bosques, pastos y caminos, suelos y edificios (Figura 5.).

### **3.2.2 Manipulación de Tecnología LiDar.**

Procesar los datos LiDar con el fin de obtener información necesaria para su aplicación en estudios Hidráulicos e hidrológicos.

### 3.2.3 Pendiente del cauce

Para la determinación de la pendiente del cauce se aplicó el método de la pendiente uniforme aplicado mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{H}{L} \dots(1)$$

Donde:

S=pendiente en m/m

H=diferencia de cota entre el cauce

L=longitud horizontal del cauce

### 3.2.4 Aspecto Físico del suelo (Textura).

Se cuenta con información de los tipos de suelos mediante los archivos del Instituto Tecnológico de Costa Rica, ATLAS 2014 generados por el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Facultad de Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Costa Rica según Sistema de clasificación: Soil Taxonomy USDA. 2010; sin embargo esta información corresponde al orden de cada tipo de suelo y no a la textura del suelo; que para el presente análisis es necesario determinar la textura del mismo, por lo tanto se procedió a realizar muestras de suelo en la zona en estudio (Figura 7).

La metodología implementada corresponde a la “Determinación al tacto” que según menciona Henríquez es una metodología ampliamente utilizada para trabajos de mapeo de suelos a nivel de campo, en estudios de conservación de suelos y en planificación de fincas, cuando se desea identificar las propiedades individuales de los suelos en el campo.

El procedimiento consistió en el expuesto mediante la “Guía para la descripción de suelos” de la FAO, 2009 así como la “Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola” de Henríquez de la Escuela de Fitotecnia de la UCR. La cual muestra:

La clase textural puede ser estimada en campo a través de pruebas simples y sintiendo los constituyentes del suelo (mediante la aplicación de la Tabla 29. Adjunta en Anexos). Para esto, la muestra de suelo debe estar en un estado húmedo a débilmente mojado. Se deben remover las gravas u otros constituyentes > 2mm.

Los constituyentes tienen la siguiente sensación:

Arcilla: se adhiere a los dedos, es cohesivo (pegajoso), es moldeable, tiene una alta plasticidad y tiene una superficie brillante luego de apretar entre los dedos.

Limo: se adhiere a los dedos, no es pegajoso, es débilmente moldeable, tiene una superficie áspera y rasposa luego de apretarlo entre los dedos y una sensación harinosa (como el polvo del talco).

Arena: no se puede moldear, no se adhiere a los dedos y se siente muy granuloso.

Mediante el procedimiento descrito anteriormente y la aplicación de la Tabla 29. Se define la clasificación hidrológica del suelo en la cuenca de la Quebrada Suárez.

### **3.3 Estudio de la Pluviometría.**

A partir de datos de registros históricos de precipitación de la estación meteorológica ubicada en el lugar de estudio se utilizan métodos estadísticos para generar caudales de diseño del evento en estudio así como caudales para diferentes periodos de retorno.

Mediante el procesamiento de los datos aportados por el ICE de la estación 84116 Salitrillos-Aserrí para el evento Huracán Tomás ocurrido del 1 al 5 de noviembre del año 2010 se genera el hietograma del evento.

Con las lluvias de diseño calculadas para la zona se realiza una modelación hidrológica con el modelo HEC-HMS, obteniendo el caudal de diseño para diferentes periodos de retorno y para el evento del huracán Tomás.

### 3.3.1 Numero de curva (N)

Mediante la implementación de la Tabla 35. Adjunta en los anexos se determina el número de curva para diferentes tipos de cobertura con una condición de humedad antecedente II (NII). Por lo tanto si se cuenta con una condición de humedad antecedente III el número de curva equivalente se calcula con la siguiente ecuación:

$$N_{(III)} = \frac{23N_{(II)}}{10+0,13N_{(II)}} \dots(1)$$

Para la determinación del número de curva ponderado en función del área se utiliza la ecuación (1).

$$\frac{\sum(N_1*a_1+N_2*a_2+\dots+N_n*a_n)}{\sum a_1+a_2+\dots+a_n} \dots(2)$$

Donde:

N= número de curva

a= área para cada tipo de cobertura

### 3.3.2 Abstracciones Iniciales (Ia)

Según menciona Villón, 2006 las abstracciones iniciales son un valor definido como la precipitación acumulada hasta el inicio de la escorrentía, mismo determinado por las condiciones del suelo, relacionando el número de curva para la determinación del almacenamiento inicial de la precipitación en el terreno. Se calculó con la siguiente ecuación:

$$Ia = \frac{5080}{N} - 50,8 \dots(3)$$

### 3.3.3 Tiempo de concentración (Tc)

Para el presente estudio se implementó el método de velocidad promedio del NRCS, donde se estableció el tiempo de concentración como la suma de los tiempos de tránsito de los n tramos que completan la línea de flujo desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto en estudio. Con lo que se tiene:

$$t_c = t_{t1} + t_{t2} + \dots + t_{tn} = \frac{\sum L_i}{v_i} \dots(4)$$

Por lo que para:

- a) Flujo superficial en lámina (hortoniano)  $L \leq 91$  m

$$t_t = 9,126 * 10^{-2} (nL)^{0,8} P_2^{-0,5} J^{-0,4} \dots(5)$$

Donde:

n: coeficiente de rugosidad de Manning (Tabla 25, Anexos)

P<sub>2</sub>: es la profundidad de la lluvia (mm) de la tormenta de 24 h con período de retorno de 2 años.

- b) Flujo superficial concentrado poco profundo  $L > 91$  m para velocidades de suelos sin pavimentar ( $v = 4,92$  m/s).

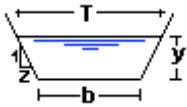
$$t_t = \frac{L}{3600v} \dots(6)$$

- c) Flujo superficial concentrado en canales abiertos donde para la ecuación (6) la velocidad del flujo en canales abiertos se puede calcular a través de la ecuación de Manning:

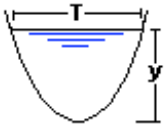
$$v = \frac{R^{\frac{2}{3}}}{n} \sqrt{J} \dots(7)$$

Donde R (Radio Hidráulico) podrá determinarse mediante las siguientes ecuaciones según la sección del canal:

**Tabla 2.** Canal Trapezoidal.

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Radio Hidráulico (m)
	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$

**Tabla 3.** Canal Parabólico.

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Radio Hidráulico (m)
	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T + 8y^2}$



### **3.3.4 Tiempo de retardo (Lag Time)**

El Lag Time se determinó aplicando la relación que involucra el tiempo de inicio del evento con respecto al centroide de la precipitación total y el tiempo del caudal pico, misma dada por la ecuación (8).

$$\text{Lag Time} = T_c * 0,6 \dots (8)$$

Donde

$T_c$ = es el tiempo de concentración obtenido de la ecuación (4)

## **3.4 Modelación Hidrológica e Hidráulica**

### **3.4.1 Implementación de modelo Hec-Hms**

Para el análisis de la subcuenca se determina que el método de pérdida aplicado corresponde al Número de Curva y para el método de transformación corresponde al Hidrograma Unitario del SCS (SCS Unit Unit Hydrograph).

Se realizó la aplicación del programa Hec-Hms con el fin de calcular el caudal máximo que se presentó en el evento de precipitación cada cinco minutos del Huracán Tomas del 1-5 noviembre de 2010, determinado mediante la estación 84116-Salitrillos-Aserrí y visible en Anexos y para la determinación del caudal de diseño para diferentes períodos de retorno se utilizó la precipitación de la tormenta de 24 horas para el evento ocurrido el de 3:10 am del 03/11/2010 a 03:10 am del 04/11/2010 (Huracán Tomas, Anexos) cada 5 minutos esto por cuanto la precipitación máxima registrada en ese horario coincide con la precipitación máxima diaria anual para el año del 2010 según registro de 22 años aportados por el ICE.

Mediante el Modelo Meteorológico se aplicó los datos de la estación meteorológica a la subcuenca.

A través de las especificaciones de control se indicó el período de tiempo para la simulación. Esta longitud de tiempo de simulación es acorde con la duración de la tormenta, donde la simulación del flujo de corriente se programa desde el inicio de la tormenta hasta un tiempo después de que esta ha terminado, específicamente 5 horas después de finalizada la tormenta. Igualmente se especificó el intervalo de tiempo el cual determinó la resolución del hidrograma resultante.

Mediante el procesamiento del registro de la precipitación de la estación 84116-Salitrillos de Aserri y según la metodología del Número de Curva se procedió a realizar un modelado hidrológico mediante la utilización del programa Hec-Hms en el cual se determinó el caudal de diseño para diferentes períodos de retorno.

Para la determinación de caudal según los periodos de retorno se procedió a la utilización del programa HidroEsta donde se determinó la distribución de mejor ajuste para los datos de Precipitación diaria máxima anual (PDMáx) en mm en el periodo 1991 al 2013.

### **3.4.2 Implementación de modelo Hec-Ras**

La sección transversal y longitudinal del cauce se obtiene mediante el levantamiento topográfico el cual abarca la zona afectada. De este levantamiento se definen las dimensiones del cauce mismas necesarias para obtener una modelación hidráulica.

Así mismo se emplea la herramienta HEC-GeoRas que manipulando el Modelo Digital del Terreno en formato vectorial TIN lo más detallado posible (obtenido mediante LiDar) de donde se extraerán los datos geométricos de las secciones transversales.

### **3.5 Verificación del Modelo.**

Se procederá a realizar visitas de campo para identificar elevaciones en las cuales se evidencie inundaciones históricas en los lugares definidos para la modelación hidráulica. El modelo a utilizar dependerá de los flujos secundarios que se identifiquen en la zona de estudio, lo cual dictaminará si es necesario realizar la modelación bidimensional con el modelo FLO-2D. De no encontrarse planicies inundables con flujos secundarios se utilizará el programa HEC-RAS.

### **3.6 Estudio de Zonas Vulnerables a Inundación.**

Mediante información recopilada de la tecnología LiDar se obtiene la topografía de las zonas vulnerables a inundación en los lugares identificados como importantes para su modelación hidráulica, según parámetros mencionados con anterioridad. Se realizó una visita de campo para corroborar las secciones del cauce con las obtenidas por LiDar y de ser necesario se realiza una corrección.

### **3.7 Generación de Mapas de Amenaza Potencial de Inundación en la comunidad.**

Se procederá a implementar la metodología según “GUIA METODOLOGICA PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA NACIONAL DE CARTOGRAFIA DE ZONAS INUNDABLES” del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino del Gobierno de España (2011).

Según el Ministerio de Medio de Ambiente y Medio Rural y Marino del Gobierno de España la Guía metodológica abarca cada uno de los aspectos a tener en cuenta en los trabajos de definición de zonas inundables que darán lugar a la generación de mapas de peligrosidad.

La Guía se desarrolla en siete bloques principales los cuales corresponden a:

- 1.Desarrollo de los aspectos relacionados con la cartografía necesaria para la elaboración de los trabajos posteriores, necesitándose básicamente un modelo de elevación digital de alta resolución lo más actual posible (LiDar, para el presente estudio), al igual que ortofotos actuales.
- 2.Estudios Hidrológicos requeridos, generando la construcción de un hidrograma de la avenida que se propagara a lo largo del tramo.
- 3.Análisis histórico del tramo considerado, a través de un estudio del medio fluvial.
- 4.Estudios geomorfológicos del tramo tratado, mediante observación minuciosa, tanto en gabinete como en campo, del cauce y sus márgenes.
- 5.Se conjuga el análisis histórico con el geomorfológico para identificar el Dominio Público Hidráulico y las distintas zonas inundables.
- 6.Corresponde al desarrollo de los aspectos relacionados con la modelación hidráulica requerida para la delimitación de las zonas inundables, de la zona de flujo y del cauce en base a la cartografía y la hidrología generadas.
- 7.La última fase corresponde a la calibración y delimitación de la inundabilidad, donde generalmente será el análisis histórico y geomorfológico el que alimente al estudio hidráulico.

### **3.8 Comparación de datos LiDar y Cartografía Nacional en la generación de Mapas de Amenaza Potencial a Inundación.**

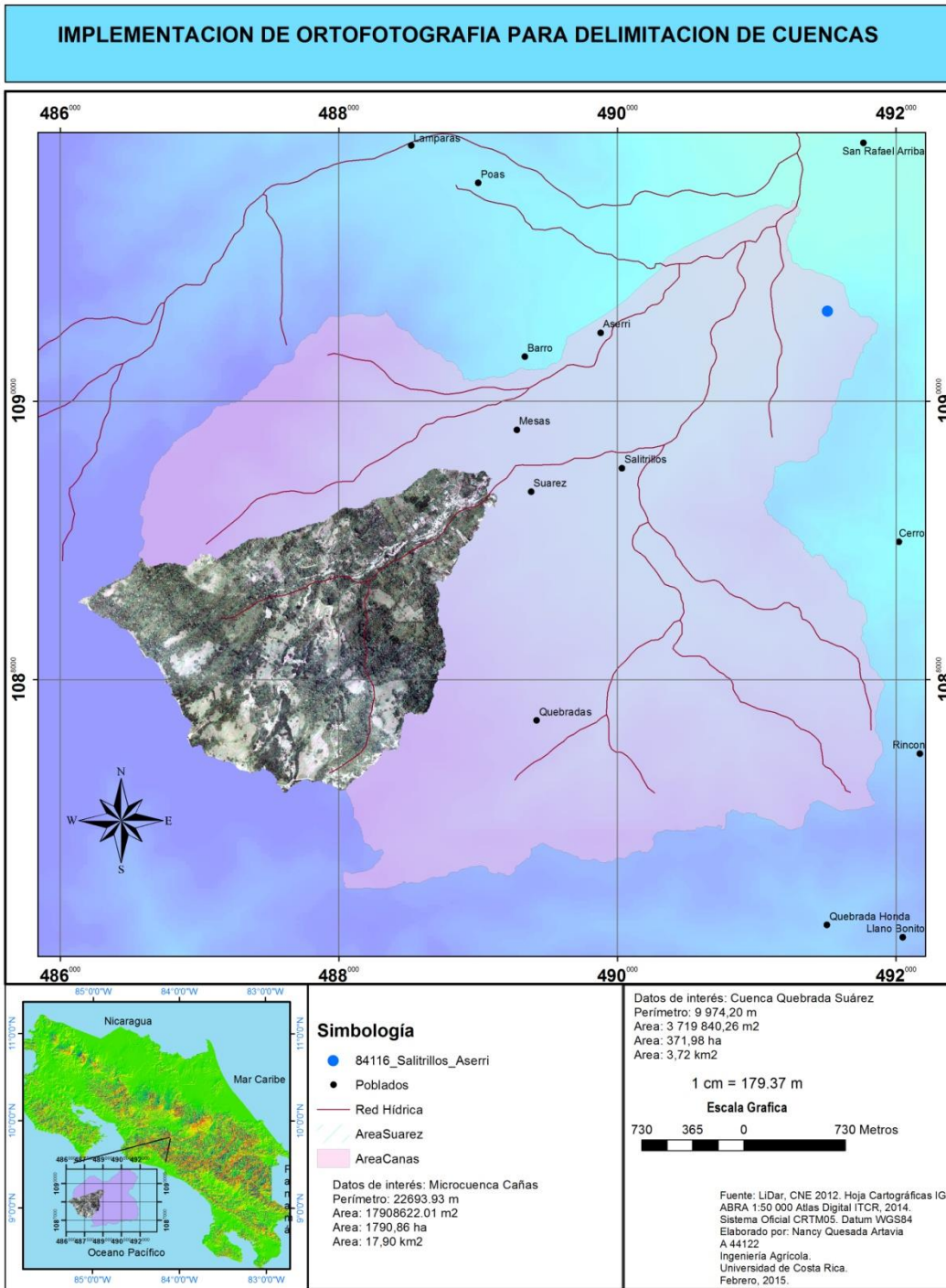
Mediante los resultados obtenidos de la implementación de la tecnología LiDar se procede a realizar una comparación a los datos que se obtendrían mediante la utilización de Cartografía Nacional para la creación de Mapas de Amenaza Potencial a Inundación.

## IV. RESULTADOS

### 4.1 Análisis físico de la cuenca

Para la delimitación de la cuenca se procedió a manipular tecnología LiDar, 2012 del cantón de Aserrí, misma facilitada por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). Mediante un procesamiento del Modelo Digital del Terreno de la zona se delimitó la subcuenta del Río Cañas cuya área corresponde a 17,90 km<sup>2</sup>, sin embargo y por cuanto el equipo con el que se cuenta al alcance (computador portátil de 4 GB RAM) no es capaz de realizar el procesamiento de la tecnología LiDar mediante el programa ArcMap 10 para un área tan extensa es que se define un área de menor estudio correspondiente a la microcuenca de la Quebrada Suárez; esta igualmente encontrándose dentro de la microcuenca propuesta inicialmente (Figura 4.).

La cuenca de la Quebrada Suárez cuenta con un área de 3,72 km<sup>2</sup> y un perímetro de 9,97 km. La estación meteorológica utilizada para el análisis hidrológico corresponde a la denominada 84116 Salitrillos Aserrí; del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE); ésta se ubicó a 2,5 km al noreste respecto al lugar en estudio (Figura 4.) esto por cuanto al reducir el área en estudio la estación se ubicó fuera del área de la microcuenca de la Quebrada Suarez. Sin embargo se determinó que por falta de información meteorológica en la zona en análisis, por cercanía a la zona y por encontrarse en una misma cuenca la estación 84116 Salitrillos Aserrí es la estación más adecuada para el desarrollo del estudio hidrológico.



**Figura 4.** Delimitación de la microcuenca del Rio Cañas y de la cuenca de la Quebrada Suárez

Mediante la delimitación de la cuenca Suarez y según el Modelo de Elevación Digital se obtuvo los siguientes parámetros de la misma, lo cual se muestra en la Tabla 4.

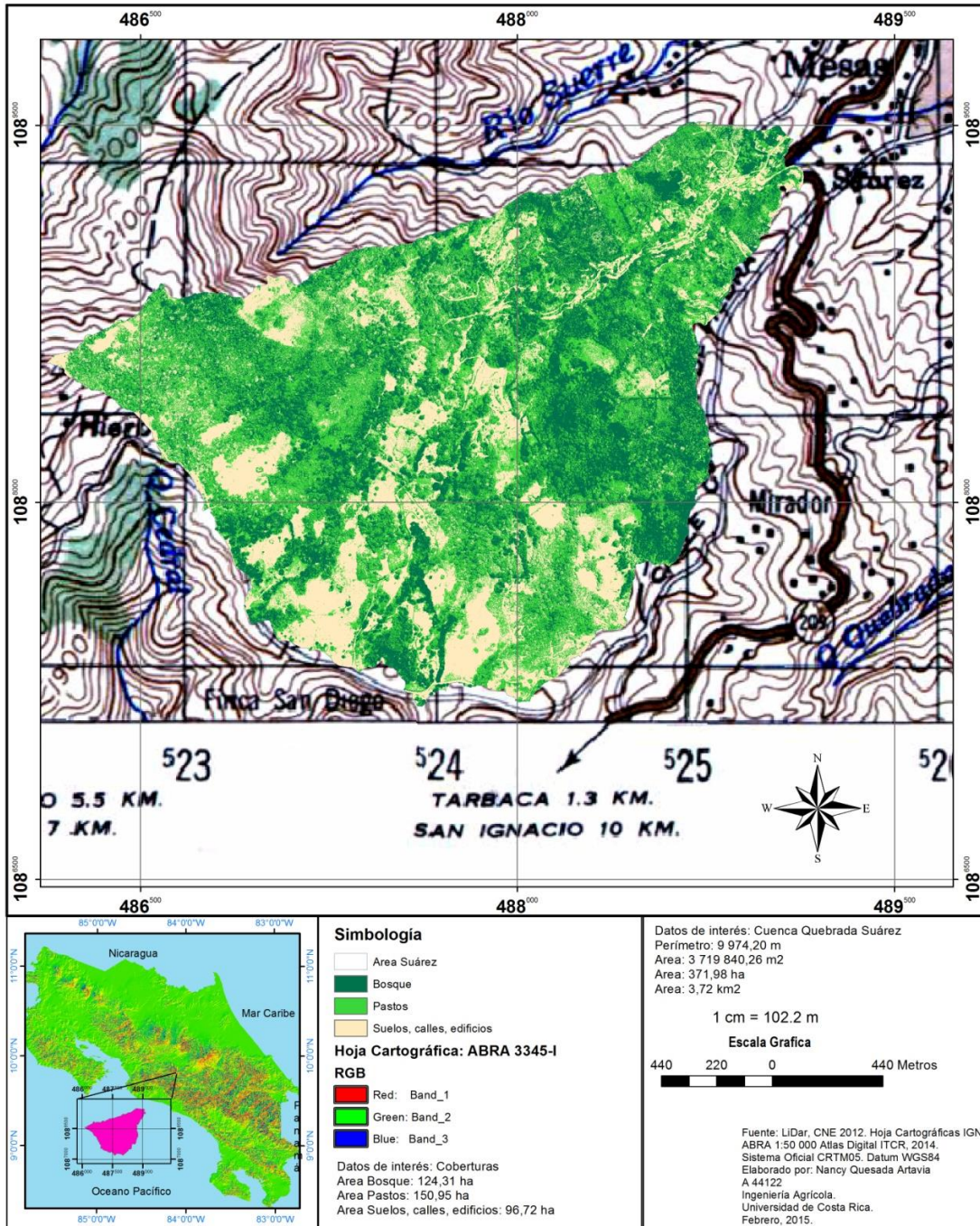
**Tabla 4.** Parámetros de la microcuenca Suarez

Área (km <sup>2</sup> )	3,72
Perímetro (m)	9974,20
Cota H1 (m)	2046,17
Cota H2 (m)	1403,21
Diferencia de elevaciones (m)	642,96
Longitud entre el punto más alejado y el punto en estudio (m)	4065,92
Pendiente (m/m)	0,1581

Se realiza una clasificación no supervisada usando Arc Map 10 y las fotografías ortorectificadas del LIDAR para determinar los tipos de cobertura los cuales se muestran en la Figura 5.



## COBERTURA EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA SUAREZ



**Figura 5.** Tipos de Cobertura en la Cuenca de la Quebrada Suarez.



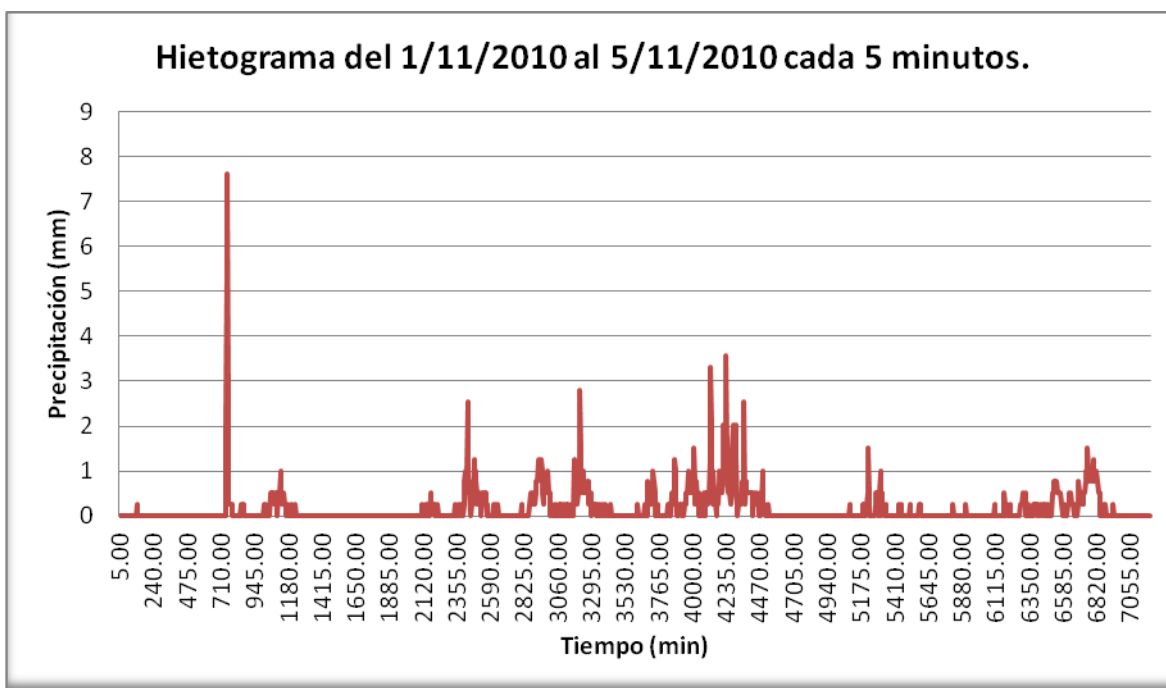
Con lo que fue posible la generación de la siguiente tabla:

**Tabla 5.** Área de los diferentes tipos de cobertura en la Cuenca Suárez.

Tipo de cobertura	Área (ha)
Bosques	124,31
Pastos	150,95
Caminos, casas, etc.	96,72
Total	371,98

#### 4.2 Estudio de la Pluviometría

Mediante el procesamiento de los datos de la estación 84116-Salitrillos de Aserri se genera el hietograma del evento del 1 al 5 de noviembre del 2010 de la precipitación determinada cada 5 minutos Figura 6.



**Figura 6.** Hietograma Huracán Tomas

Se determina que el evento ocurrido entre el minuto 3075 al minuto 4515, de las 3:10 am del 03/11/2010 a las 3:10 am del 4/11/2010 corresponde al evento de mayor precipitación en un periodo de 24 horas el cual se muestra en Anexos.

#### **4.3 Número de Curva Ponderado**

##### **4.3.1 Clasificación Hidrológica de los suelos**

Como se indicó con anterioridad la subcuenta planteada inicialmente para el estudio (Cañas) contaba con un área de 17,90 km<sup>2</sup> por lo que primeramente se definieron seis ubicaciones para la obtención de muestras de suelos, por cuanto se observó la existencia de tres órdenes de suelo según el ATLAS 2013 (Figura 7).

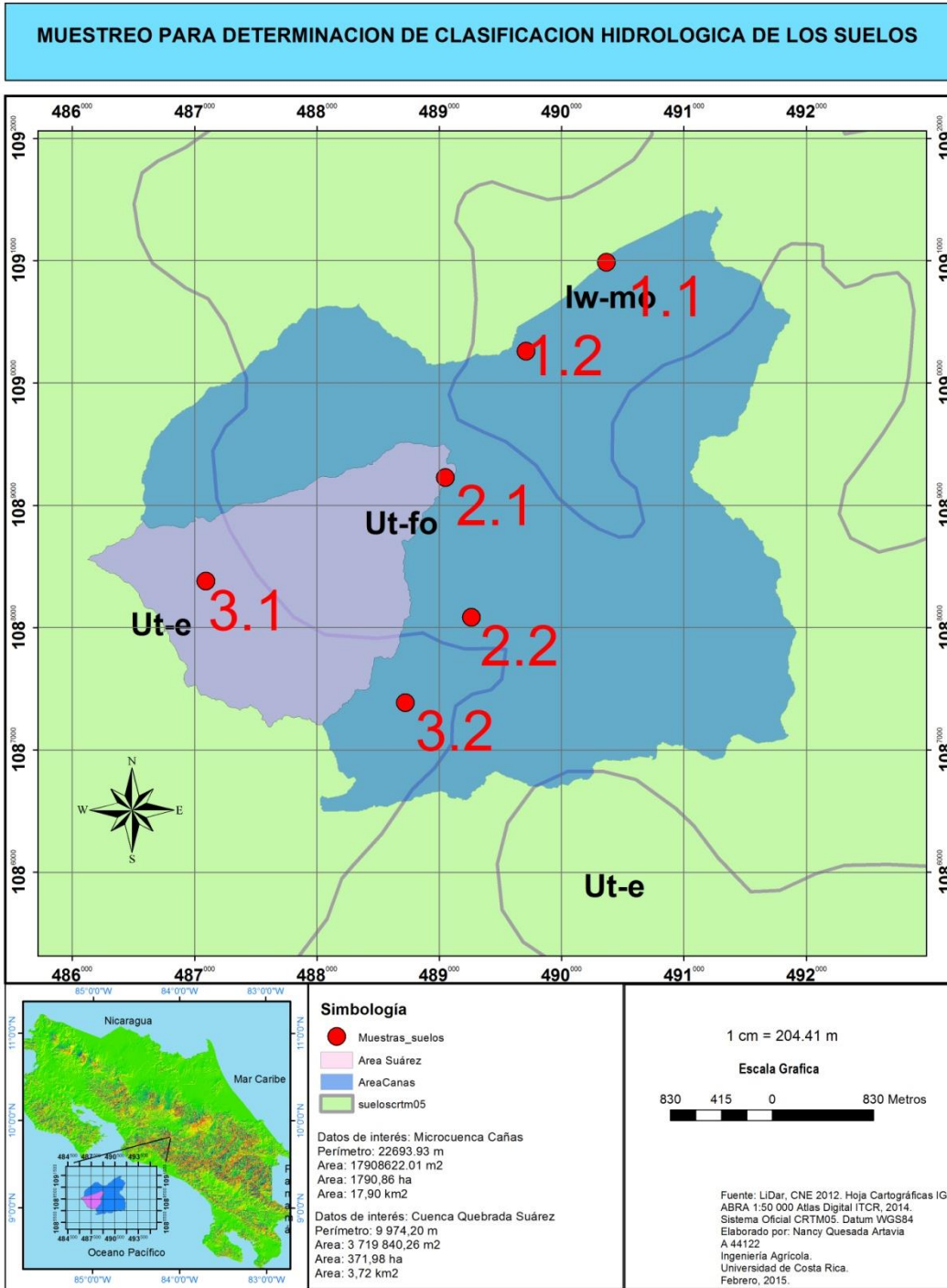


Figura 7. Ubicación de muestras de suelo en zona en estudio.

Donde cada abreviatura corresponde a cada orden del suelo (Tabla 6.) y su caracterización según el Centro de investigaciones Agronómicas de la Facultad de Ciencias Agroalimentarias corresponde a:

Iw-mo: Inceptisoles. Suelo joven con horizonte b cambico (apenas se forma un b), sin otro horizonte diagnostico. Moderadamente ondulado, pendiente de 15 - 30%

Ut-fo: Ultisoles. Suelo con un horizonte argilico (20% de aumento en el contenido de arcillas en la sección de control) con menos de un 35% de saturación de bases en la sección de control. Generalmente profundos, bien drenados de color rojo o amarillo y relativa baja fertilidad.

Ut-e: Ultisoles. Suelo con un horizonte argilico (20% de aumento en el contenido de arcillas en la sección de control) con menos de un 35% de saturación de bases en la sección de control. Generalmente profundos, bien drenados de color rojo o amarillo y relativa baja fertilidad.

**Tabla 6.** Orden de suelo en zona inicial de estudio

Orden	Nombre	Ubicación de Muestras CRTM 05		
		Muestra	Latitud	Longitud
Inceptisoles	Iw-mo	1.1	1 090 987	490 365
		1.2	1 090 261	489 709
		2.1	1 089 227	489 048
Ultisoles	Ut-fo	2.2	1 088 084	489 260
		3.1	1 087 386	488 720
Ultisoles	Ut-e	3.2	1 088 381	487 091

Según menciona Henríquez la aplicación de ensayos de campo mediante la determinación al tacto corresponde a una metodología ampliamente utilizada para trabajos de mapeo de suelos a nivel de campo por lo que se procede a efectuar la misma para la determinación de la textura al tacto en el lugar en estudio (Figura 8).



**Figura 8.** Muestras y pruebas de suelo.

Con lo que se obtienen los siguientes tipos de suelo para la zona en estudio:

**Tabla 7.** Determinación de textura del suelo en zona en estudio

Muestras	Textura
1.1 y 1.2	Franco arcilloso
2.1 y 2.2	Franco arenoso
3.1 y 3.2	Franco arenoso

Sin embargo y por cuanto se determinó posteriormente que el área de estudio correspondería a la Cuenca de la Quebrada Suárez, las muestras que se tomaron

en consideración corresponderían a la 2.1 y la 3.1 mismas ubicadas dentro de la zona en análisis.

Según las pruebas realizadas se determina mediante la implementación de la Tabla 34 que la Clasificación hidrológica de los suelos corresponde al grupo de suelos tipo B.

#### 4.3.2 Condición de humedad antecedente

En la siguiente tabla y mediante la acumulación de la precipitación de cinco días antes del evento Huracán Tomas se obtiene la condición de humedad antecedente (CHA).

**Tabla 8.** Condición de Humedad Antecedente.

CHA	
7,44 cm > 5 cm	III (húmeda)

#### 4.3.3 Condición Hidrológica

Para cada tipo de cobertura se identifica la capacidad de la superficie de la cuenca para favorecer o dificultar el escurrimiento directo, donde para el tipo de cobertura boscosa se consideró una condición hidrológica buena, para el área de pastos los cuales no cuentan con ningún tipo de tratamiento se asigna una condición hidrológica regular y para el sector con un uso de la tierra caminos se supone una superficie firme.

Dado que los valores de N obtenidos mediante la aplicación de la Tabla 35, presentada en los Anexos, corresponden a una condición de humedad antecedente II; se utilizó la ecuación (1) para la determinación del número de curva para una condición de humedad antecedente III y la ecuación (2) para la determinación del número de curva ponderado; con lo que se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 9.** Valores de N según el tipo de cobertura para la Cuenca de la Quebrada Suarez.

Tipo de cobertura	Área (ha)	N <sub>II</sub>	N <sub>III</sub>
Bosques	124,31	55	74
Pastos	150,95	69	84
Caminos, casas, etc.	96,72	84	93
N <sub>III</sub> Ponderado			83

Se observa que el número de curva está más cercano a 100, donde un número de curva igual a 100 indica que toda la lluvia escurre; como es de esperar en una zona donde existe un centro poblacional ya establecido.

#### 4.4 Abstracción Inicial (Ia)

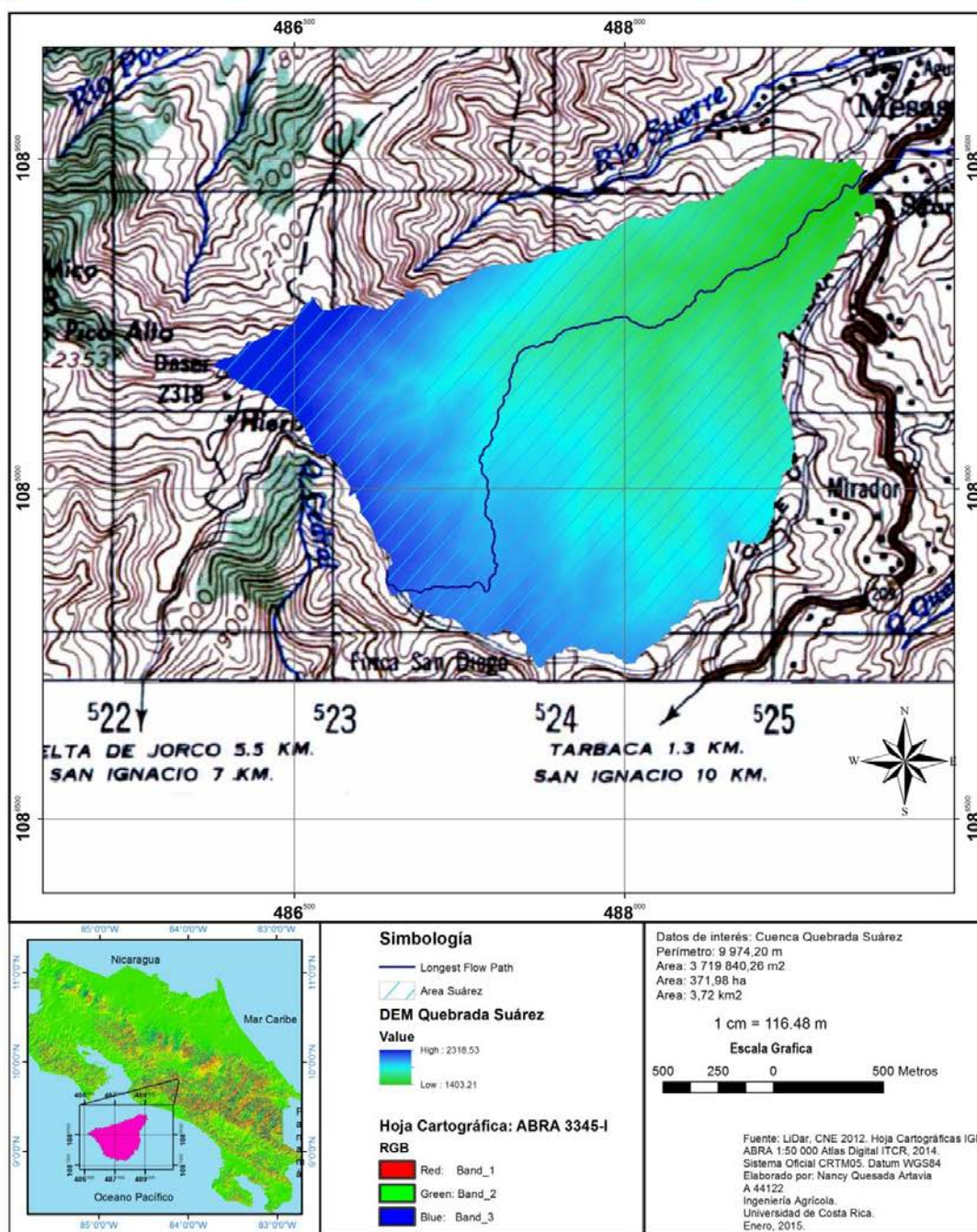
Mediante la determinación del número de curva ponderado para la zona en estudio y la utilización de la ecuación (3) se determinó el valor de la abstracción inicial en 10,40 mm.

#### 4.5 Tiempo de concentración (Tc)

Para la determinación de la línea de flujo que recorrerá el volumen de lluvia producido durante la tormenta en un punto de la cuenca hasta el punto de drenaje de la misma, se procedió a delinear la cuenca usando la herramienta de ArcHydro del programa ArcMap 10 donde mediante un procesamiento del Modelo de Elevación Digital (aportado por la CNE, LiDar) se obtuvo el “Longest Flow Path”, el cual corresponde a la línea de flujo más lejana a la salida de la microcuenca en análisis (Figura 9).



**DELINEACION DE CUENCA MEDIANTE  
ARCHYDRO-LONGEST FLOW PATH EN LA QUEBRADA SUAREZ**



**Figura 9.** Línea de Flujo en Cuenca de Quebrada Suárez

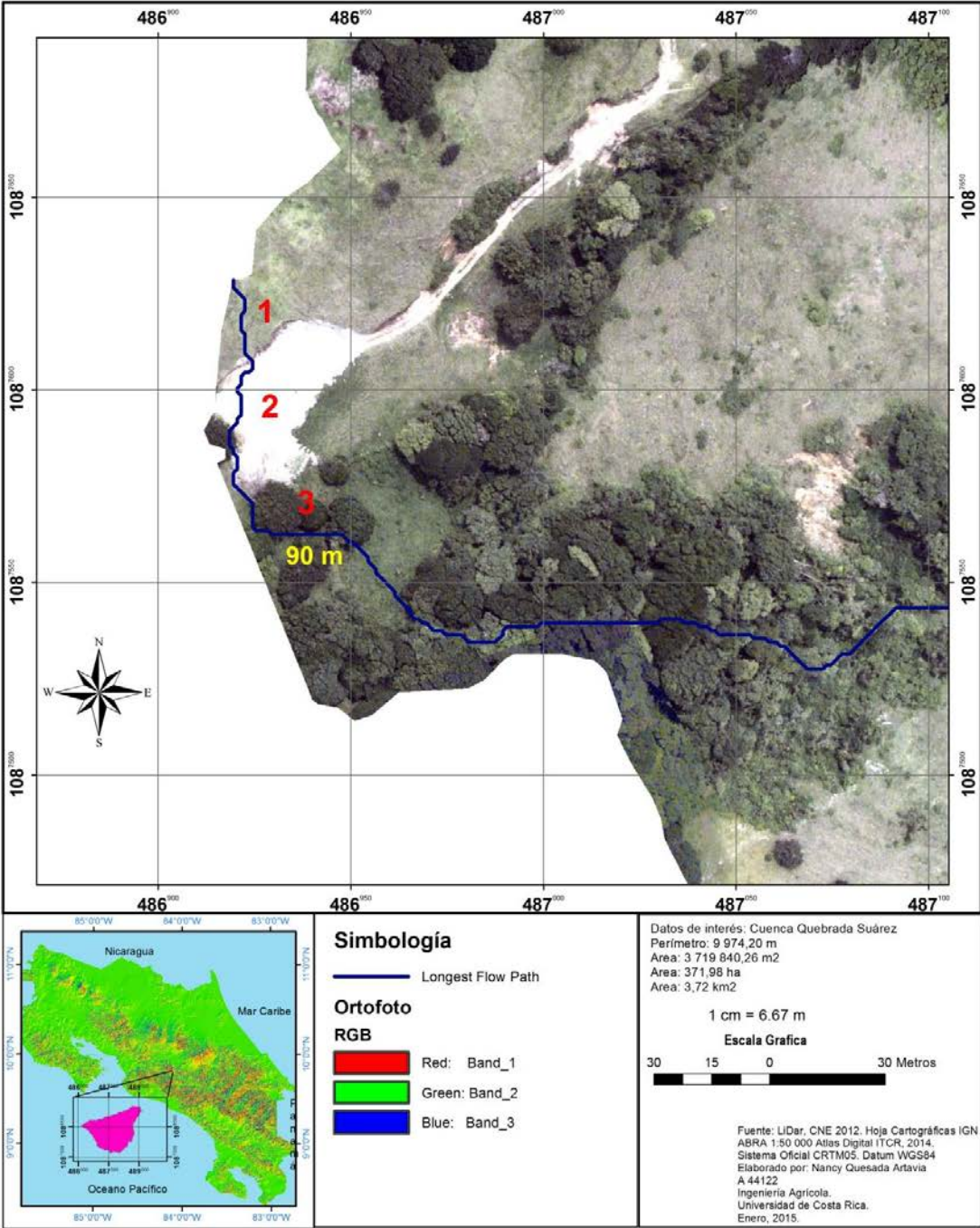


Con la utilización de la ecuación (4) y según los coeficientes de rugosidad de Manning, se establece el valor del tiempo de concentración:

#### **4.5.1 Flujo superficial en lámina (hortoniano)**

Aplicando la ecuación (5); se procedió a dividir en tres tramos la línea de flujo, esto por cuanto se observó; con la utilización de las Ortofotografías de la zona aportadas por la CNE (Figura 10); la existencia de tres tipos de superficies en el tramo  $\leq$  a 91 m; mismas superficies que influyen en el valor del coeficiente de rugosidad; este coeficiente se define con base en la Tabla 36 (Anexos).

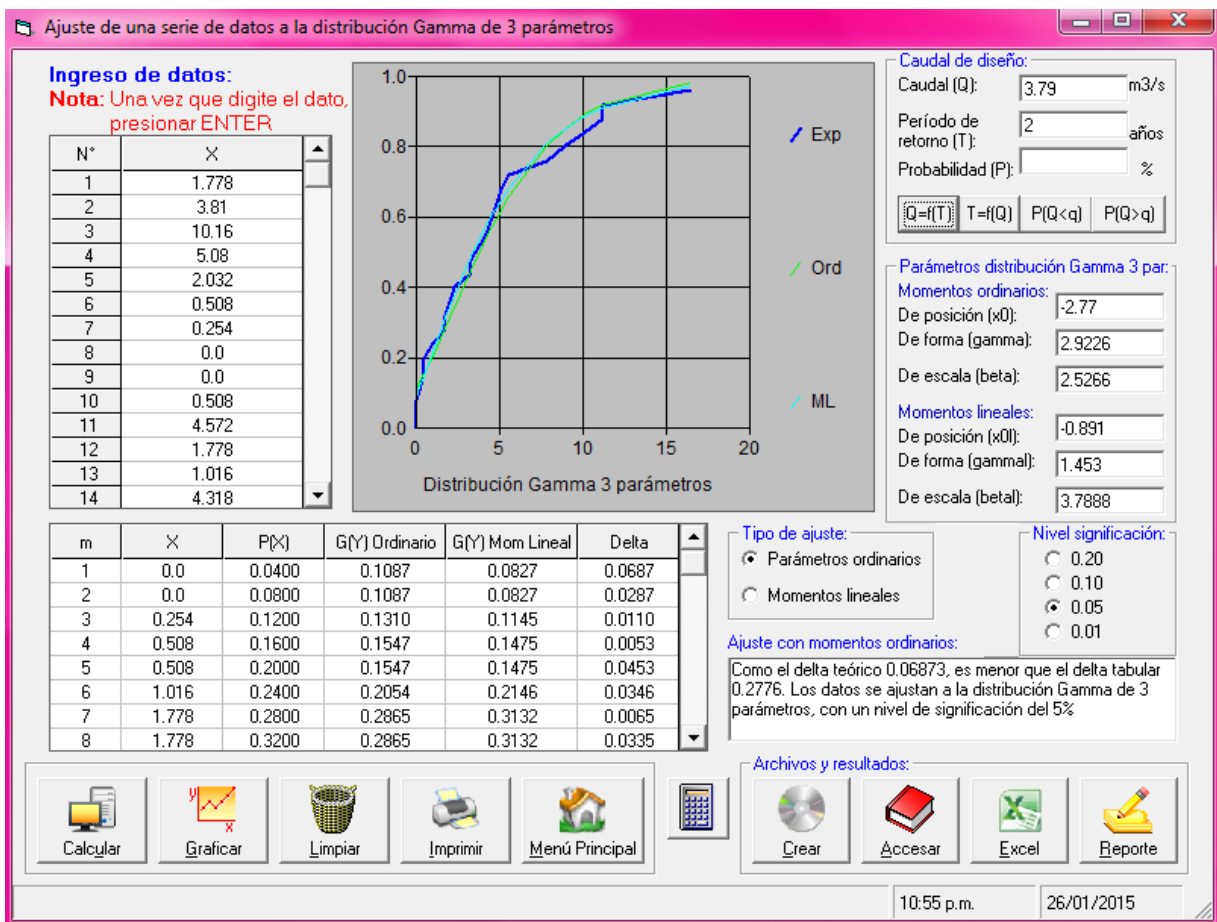
**IMPLEMENTACION DE ORTOFOTOGRAFIA PARA DEETERMINACION DE Tc**



**Figura 10.** Ortofotografía en tramo de 90 m.

La determinación de las pendientes de los tres tramos se realizó mediante la aplicación de la ecuación (1) determinando las variables utilizadas del Modelo de Elevación Digital.

Mediante la manipulación de los datos de lluvia de la estación 84116-Salitrillos de Aserri según Tabla 31 de los Anexos, mismos facilitados por el Instituto Costarricense de Electricidad y la implementación de los mismos a través del programa HidroEsta seleccionando la distribución que se ajuste mejor a los datos experimentales, se determinó la profundidad de la lluvia P (mm) de la tormenta de 24 h con un período de retorno de 2 años (Figura 11).



**Figura 11.** Profundidad de lluvia de la tormenta de 24 h con  $T_r = 2$  años mediante una distribución Gamma de 3 parámetros. HidroEsta.

Con lo que se obtuvo la siguiente tabla:

**Tabla 10.** Tiempo de tránsito para flujo superficial en lámina.

Tramo	Coefficiente n Manning	Altura Y <sub>1</sub> (m)	Altura Y <sub>2</sub> (m)	Longitud L (m)	Pendiente J(m/m)	Profundidad de lluvia P (mm)	Tiempo t <sub>t</sub> (h)
Praderas de pastos cortos	0,15	2046	2041	24	0,21	3,79	0,24
Superficies lisas	0,011	2041	2036	43	0,12	3,79	0,06
Praderas de pastos cortos	0,15	2036	2031	23	0,21	3,79	0,23
<b>Total</b>							0,54

#### 4.5.2 Flujo superficial concentrado poco profundo

Aplicando la ecuación (6) se obtienen la siguiente tabla:

**Tabla 11.** Tiempo de tránsito para flujo superficial poco profundo.

Longitud L (m)	Velocidad v (m/s)	Tiempo t <sub>t</sub> (h)
1806,31	4,92	0,10

#### 4.5.3 Flujo superficial concentrado en canales abiertos

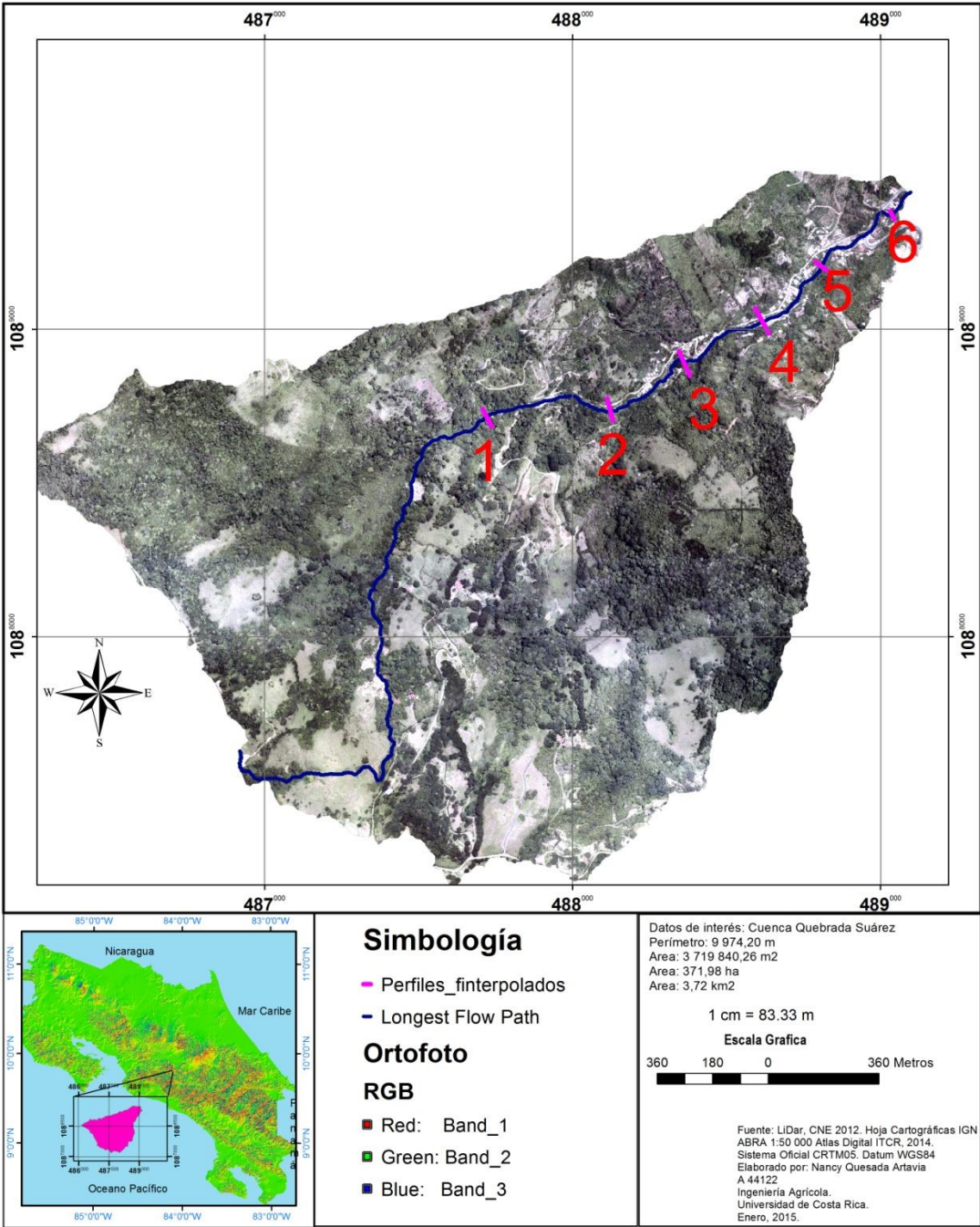
Mediante la manipulación del Modelo de Elevación Digital (LiDar) se obtienen los siguientes datos:

**Tabla 12.** Parámetros a implementar para determinar la velocidad del tramo.

<b>Tramo</b>	<b>Coefficiente n Manning</b>	<b>Altura <math>Y_1</math> (m)</b>	<b>Altura <math>Y_2</math> (m)</b>	<b>Longitud L (m)</b>	<b>Pendiente J(m/m)</b>
Canales Naturales (limpios y curvilíneos)	0,04	1665,61	1403,5	2170	0,12

Para el tramo en estudio se considera una misma rugosidad manteniéndose el Coeficiente n de Manning; sin embargo para la determinación del radio Hidráulico se procedió a obtener seis perfiles topográficos mediante la utilización del modelo de elevación digital generado por la información LiDar aportada (Figura 12) con el fin de definir un radio hidráulico promedio.

**IMPLEMENTACION DE ORTOFOTOGRAFIA PARA DEETERMINACION DE PERFILES**



**Figura 12.** Perfiles topográficos mediante LiDar (Ortofotos y Modelo de Elevación Digital).

Generándose los siguientes perfiles topográficos:

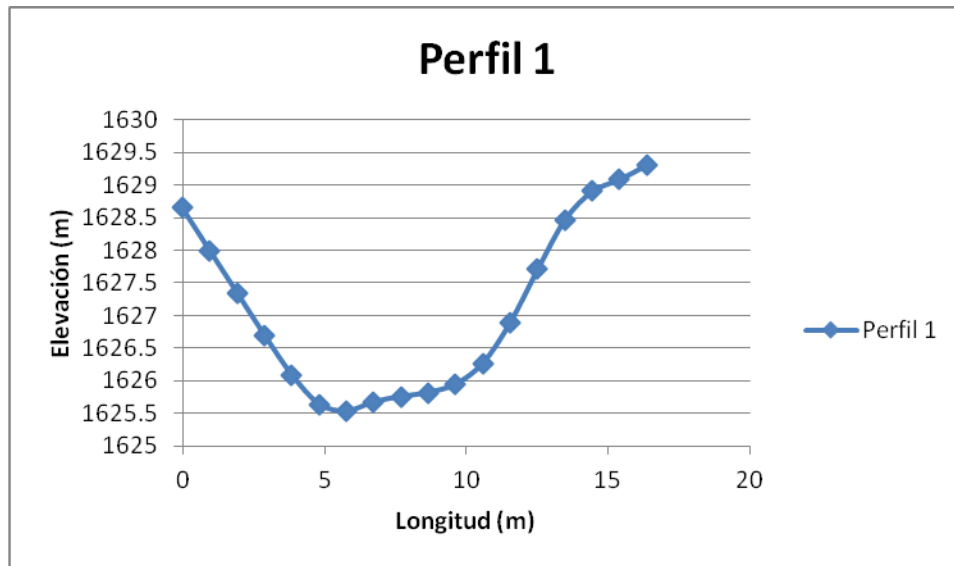


Figura 13. Perfil Topográfico 1. Sección Parabólica.

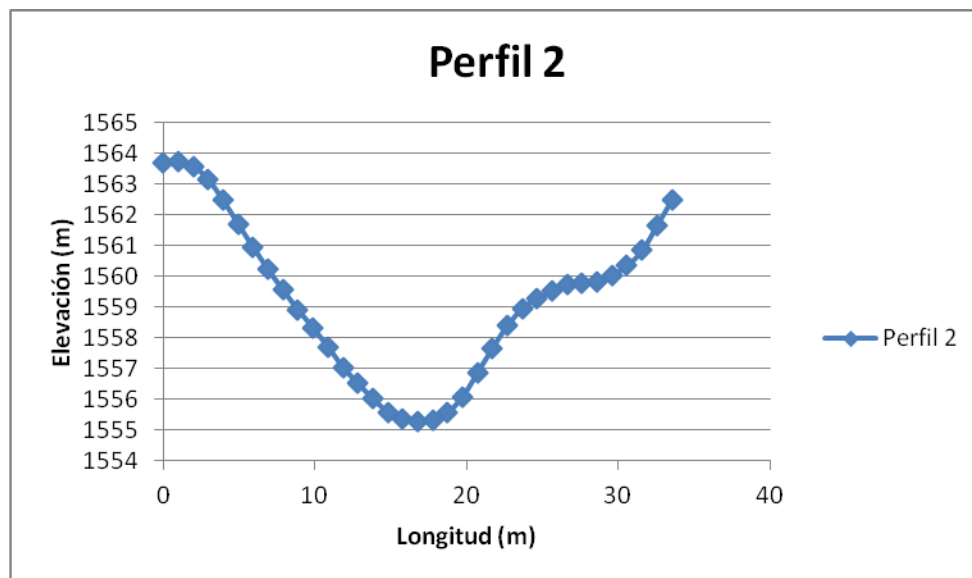
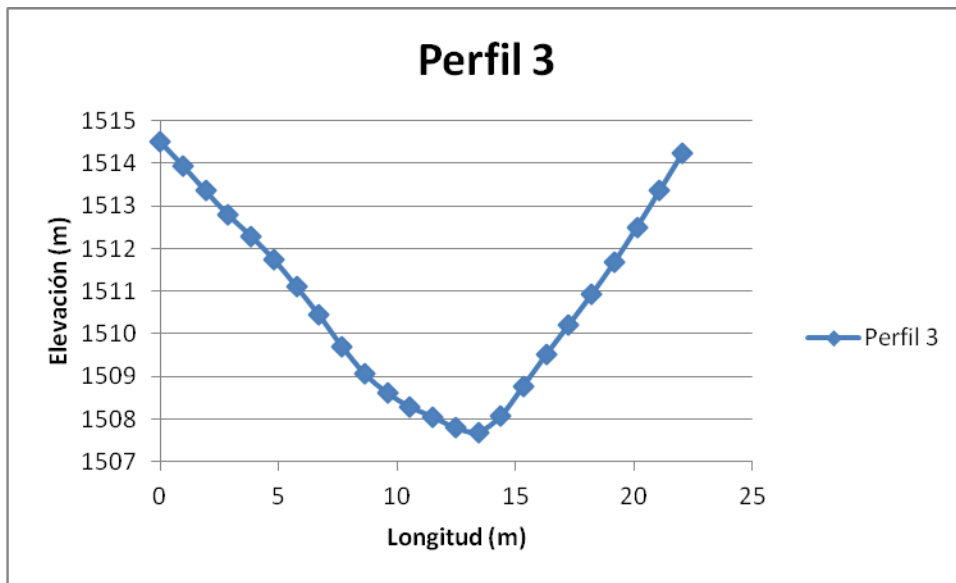
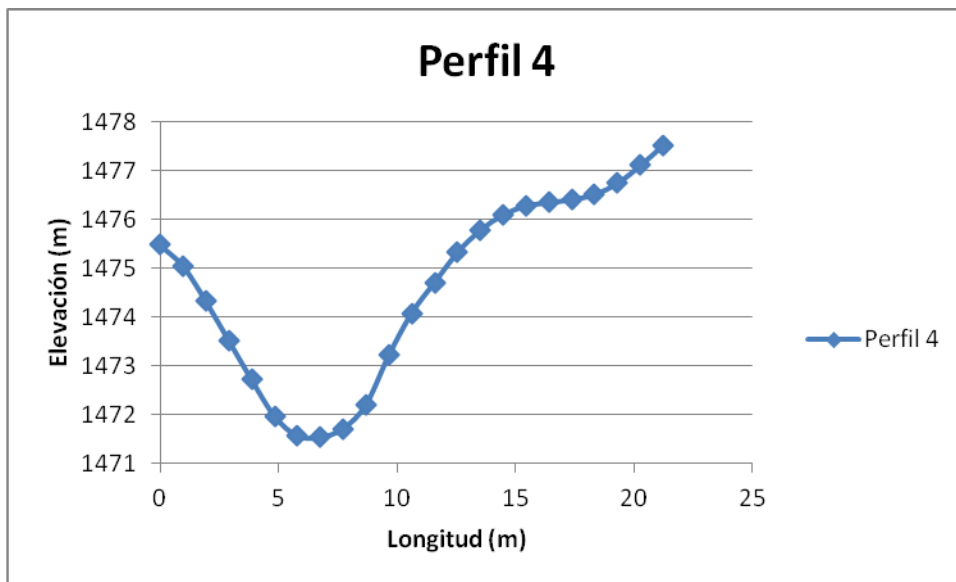


Figura 14. Perfil Topográfico 2. Sección Trapezoidal.

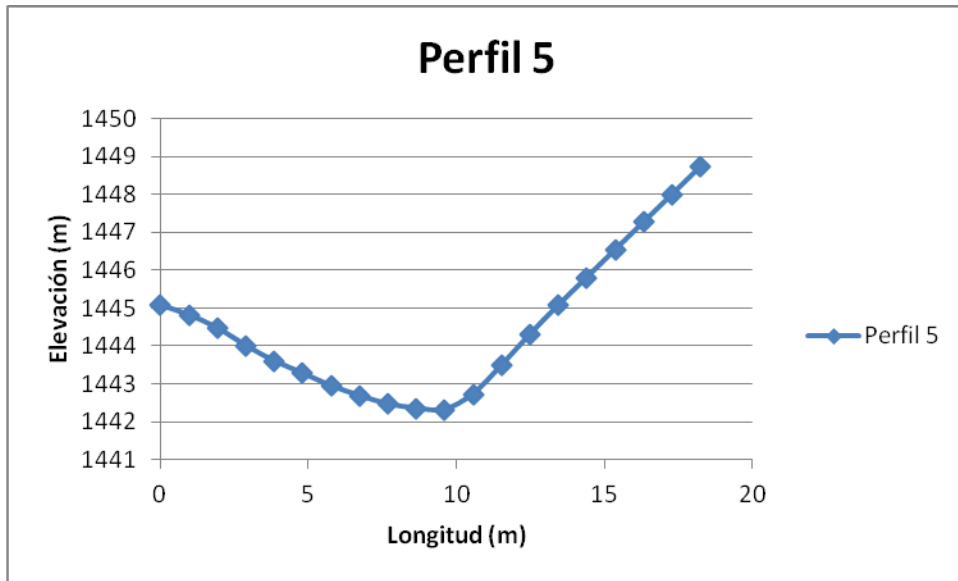


**Figura 15.** Perfil Topográfico 3. Sección Trapezoidal.

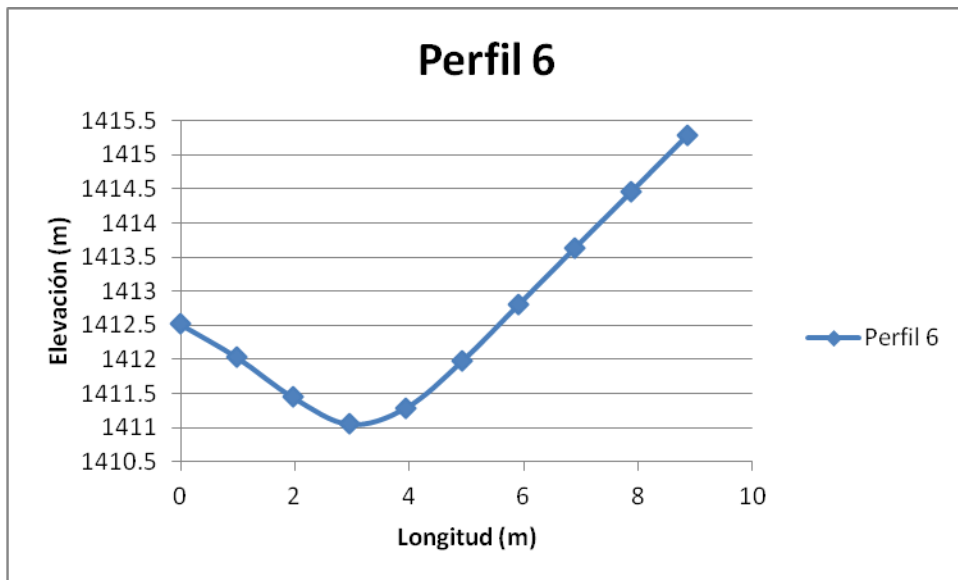


**Figura 16.** Perfil Topográfico 4. Sección Parabólica.





**Figura 17.** Perfil Topográfico 5. Sección Parabólica.



**Figura 18.** Perfil Topográfico 6. Sección Parabólica.

Mediante la definición de la sección transversal del cauce es posible la determinación del radio hidráulico de cada perfil obtenido, mismos mostrados en la siguiente tabla:

**Tabla 13.** Parámetros de cada perfil topográfico.

Perfil	Talud (z)	Ancho de Solera (b)	Tirante (y)	Espejo de Agua (T)	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Radio Hidráulico (m)
1	-	-	0,56	5,77	2,15	5,91	1,88
2	1	4	1,78	8,88	10,29	9,03	1,14
3	1	3	2,74	10,53	15,73	10,75	1,46
4	-	-	1,99	6,75	8,96	8,31	3,49
5	-	-	1,16	6,72	5,20	7,25	3,39
6	-	-	0,98	3,94	2,57	4,59	1,56
Promedio							2,15

Utilizando el promedio del Radio Hidráulico y empleando las ecuaciones (6) y (7) se obtiene:

**Tabla 14.** Tiempo de tránsito para flujo superficial concentrado en canales abiertos.

Longitud L (m)	Velocidad v (m/s)	Tiempo t <sub>t</sub> (h)
2170	14,49	0,04

Por lo que, mediante la sumatoria de los tiempos de tránsito determinados con anterioridad se define que, para la cuenca en estudio, el mismo corresponde a:

**Tabla 15.** Tiempo de tránsito para la microcuenca de la Quebrada Suarez.

Tiempo de transito (t <sub>t</sub> )	
Horas	Minutos

0,68	40,89
------	-------

#### 4.6 Tiempo de retardo (Lag Time)

Aplicando la ecuación (8) y según el tiempo de concentración determinado en el apartado 4.4 (tabla x) se determina el tiempo de retardo:

**Tabla 16.** Tiempo de retardo para la cuenca de la Quebrada Suarez

Lag Time (min)
24,53

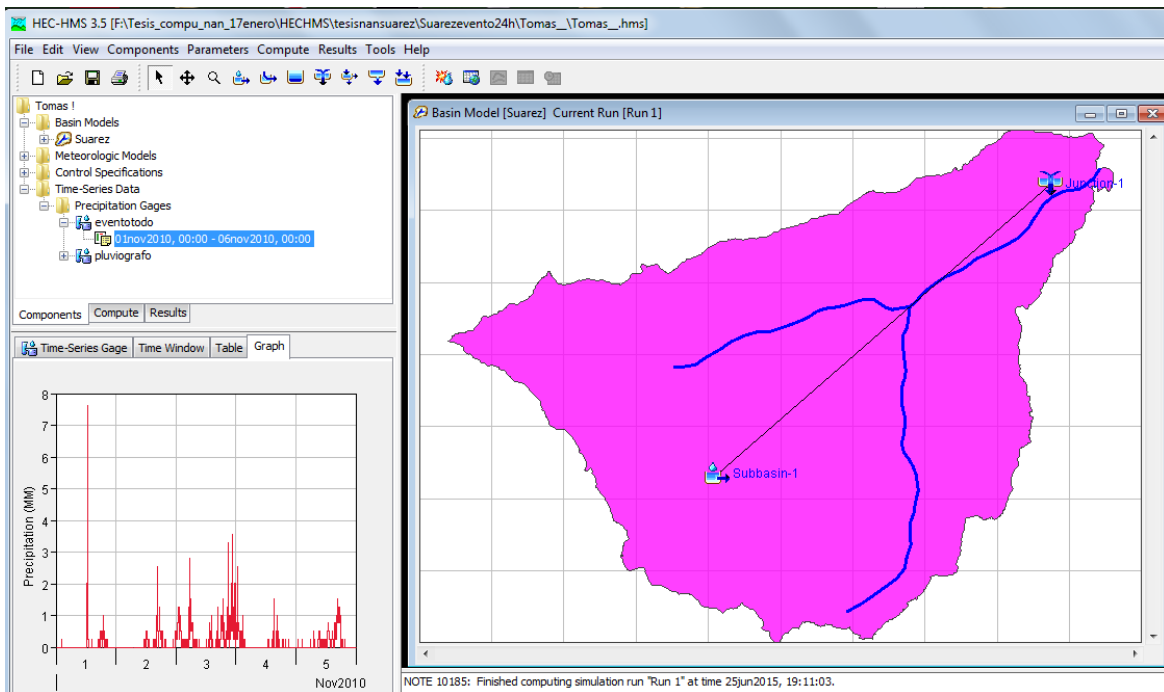
#### 4.7 Modelación Hidrológica e Hidráulica

##### 4.7.1 Implementación de modelo Hec-Hms

Mediante los datos obtenidos con anterioridad: el estudio físico de la cuenca, el número de curva ponderado, las abstracciones iniciales, el tiempo de concentración, el Lag Time se procedió a determinar el caudal  $Q_{\text{máx}}$  de diseño para el evento en estudio mediante la implementación del programa Hec-Hms.

Ya que en el presente estudio la cuenca es única solo se agrega una subcuenca (Subbasin-1) y al final de la cuenca se colocó una unión (Junction-1) ya que la cuenca continúa aguas abajo (Figura 19).

Se procedió a modelar el evento en estudio (Huracán Tomás), ocurrido desde las 00:00 horas del 01 de noviembre 2010 a las 00:00 horas del 5 de noviembre del 2010, cada 5 minutos, mediante el programa Hec-Hms, con lo que se determinó la combinación de precipitaciones que generarían mayor caudal.



**Figura 19.** Hietograma ingresado en el estudio de la tormenta (00:00 am del 01/11/2010 a 00:00 am del 05/11/2010)

Mediante la modelación hidrológica realizada se generan los resultados visibles en la siguiente ilustración:

Global Summary Results for Run "runtodoevento"

Project: Tomas !      Simulation Run: runtodoevento

Start of Run: 01nov2010, 00:00      Basin Model: Suarez  
 End of Run: 06nov2010, 07:00      Meteorologic Model: mettodoevento  
 Compute Time: 25jun2015, 19:43:49      Control Specifications: conttodoevento

Show Elements: All Elements      Volume Units:  MM     1000 M3      Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
Subbasin-1	3.72	19.9	03nov2010, 22:50	185.74

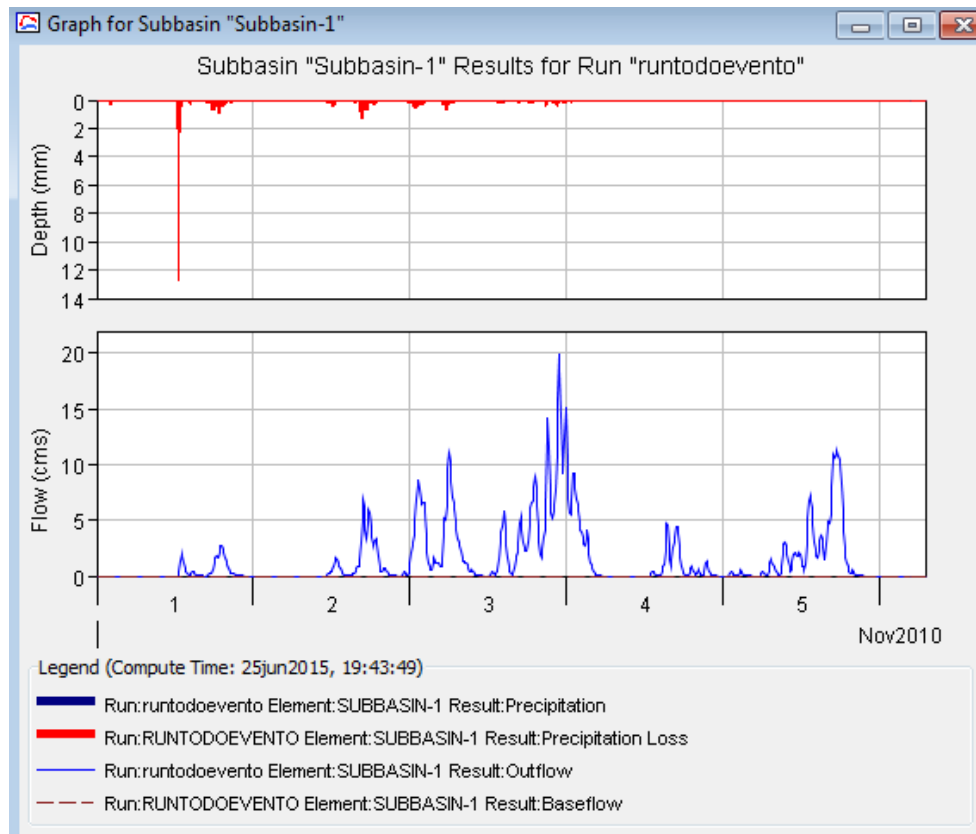
**Figura 20.** Resumen Global de los resultados evento 01-06 de noviembre de 2010.

Mostrándose que el caudal máximo que se presentó para el Huracán Tomás del 1-6 noviembre de 2010 en la cuenca de la quebrada Suárez corresponde a 19,9

m<sup>3</sup>/s o 19 900 l/s a las 22:50 horas del 03 de noviembre de 2010. Donde es posible verificar lo anteriormente expuesto según la Figura 21, ya que se identifica que el mayor caudal se produce el día 3 de noviembre del 2010.

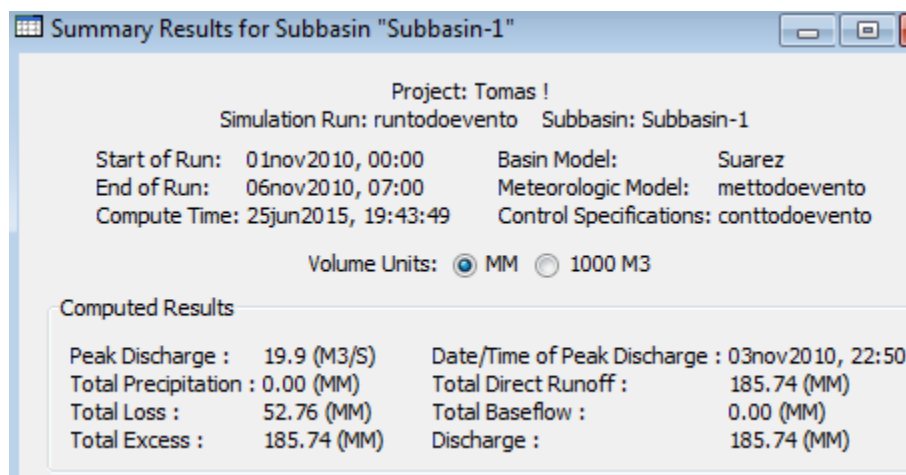
Determinándose que a partir del 2 de noviembre del 2010 se produce un aumento en los caudales generados por las precipitaciones ocurridas cada 5 minutos en la zona en estudio, así como una disminución de caudales para los días 4 y 5 de noviembre; lo cual es congruente con el evento en estudio por cuanto según entrevistas realizadas en la zona en estudio así como la información de noticieros nacionales, las afectaciones a casas de habitación así como a infraestructura vial se generaron del 3 de noviembre al 4 de noviembre del 2010.

La Figura 21 muestra la distribución del caudal según los días analizados para el evento, así como las precipitaciones que generan dichos caudales en el tiempo del 1 al 5 de noviembre del 2010.



**Figura 21.** Hidrograma resultante para el evento 03-04 de noviembre de 2010.

A través de la siguiente figura se observa un resumen de la simulación realizada:



**Figura 22.** Resumen de resultado para la simulación del evento 03-04 de noviembre de 2010.

Por lo que para un escurrimiento de 185,74 mm ocurrido a las 22:50 horas del 03 de noviembre del 2010, se produce el mayor caudal del evento en estudio.

Igualmente se procede a calcular los caudales máximos de diseño para diferentes periodos de retorno según la distribución temporal de precipitación ocurrida 3-4 de noviembre de 2010, la cual se muestra en Tabla 31. (ANEXOS); esto por cuanto según el registro de precipitación diaria (24 horas) máxima anual (PDM<sub>máx</sub>) en la estación 84116-Salitrillos de Aserrí en el periodo de 1991 al 2013 la PDM<sub>máx</sub> para el año 2010 fue de 110,74 mm; donde dicha precipitación se genera de las 03:10 a.m. del día 03 de noviembre del 2010 a las 3:10 a.m. del 04 de noviembre del 2010.

Nuevamente considerando datos obtenidos con anterioridad como el área de la cuenca de la Quebrada Suarez, el número de curva, la distancia entre el punto más alejado y el lugar de estudio, la diferencia de elevaciones, las abstracciones iniciales, el tiempo de concentración y el Lagtime, se procede a realizar una modelación hidrológica mediante el programa Hec-Hms.

Es necesario contar con los hietogramas para T= 2, 10, 25, 50 y 100 años por lo que se procede a realizar el cálculo de los mismos a partir de los datos de la distribución temporal de lluvia del evento Tomás.

Realizando un análisis de frecuencia a los máximos diarios de lluvia, la distribución que mejor se ajustó es la Distribución Log-Pearson tipo III (ANEXOS). Obteniéndose las precipitaciones diarias máximas para los periodos de retorno mediante la aplicación de la distribución definida (Tabla 17).

**Tabla 17.** Precipitación diaria máxima para el periodo de retorno indicado.

<b>T (años)</b>	<b>P (mm)</b>
2	75,82
10	106,4

25	123,98
50	138,01
100	152,86

Se procedió a distribuir la precipitación en el evento en estudio generándose la Tabla 33, donde se muestran los hietogramas horarios de la tormenta asociada a cada periodo de retorno; esto mediante la determinación del cociente (Tabla 18) entre la magnitud de la lluvia generada para cada periodo de retorno (Tabla 17) y la lluvia total observada en la Tabla 32 (ANEXOS, 110,74 mm) donde cada cociente corresponde a:

**Tabla 18.** Cociente para cada T indicado.

T (años)	P (mm)
2	0,68
10	0,96
25	1,12
50	1,25
100	1,38

Con lo que se calcula el comportamiento cada cinco minutos de dicho evento para la estación 84116-Salitrillos de Aserri para los años de los periodos de retorno; por lo que al multiplicar los valores de la Tabla 31 (ANEXOS) por el cociente mostrado con anterioridad, se obtuvo el hietograma cada 5 minutos de la tormenta asociada a cada período de retorno (ANEXOS, Tabla 23).

Por lo que se procedió a modelar hidrológicamente mediante el programa Hec-Hms para la determinación de los caudales de diseño según los periodos de retorno en estudio obteniendo obteniéndose los siguientes resultados:



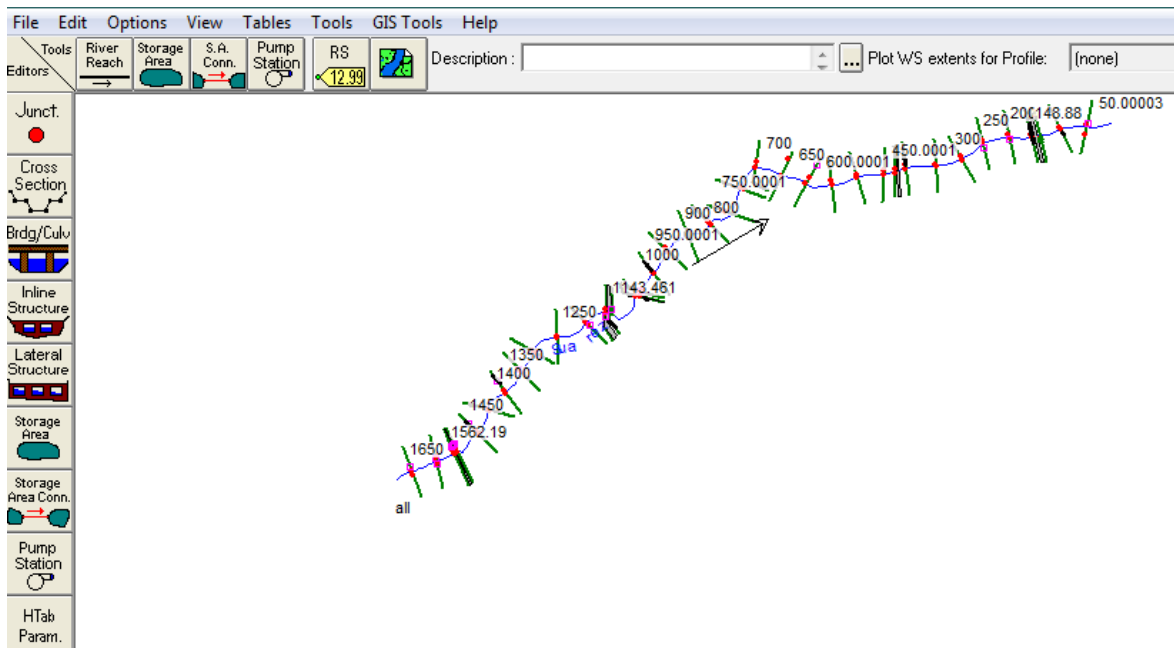
**Tabla 19.** Caudales máximos de diseño para T = 2, 10, 25 y 50.

<b>T (años)</b>	<b>Q máx (m<sup>3</sup>/s)</b>
2	24,2
10	41,8
25	52,6
50	60,6

No se realiza la modelación hidrológica para el periodo de retorno de 100 años por cuanto el período de registro con el que se contó es de 22 años; una modelación adecuada consistiría en un máximo del doble del registro; una modelación para un tiempo mayor al doble del registro no podría considerarse como representativa de la hidrología del lugar.

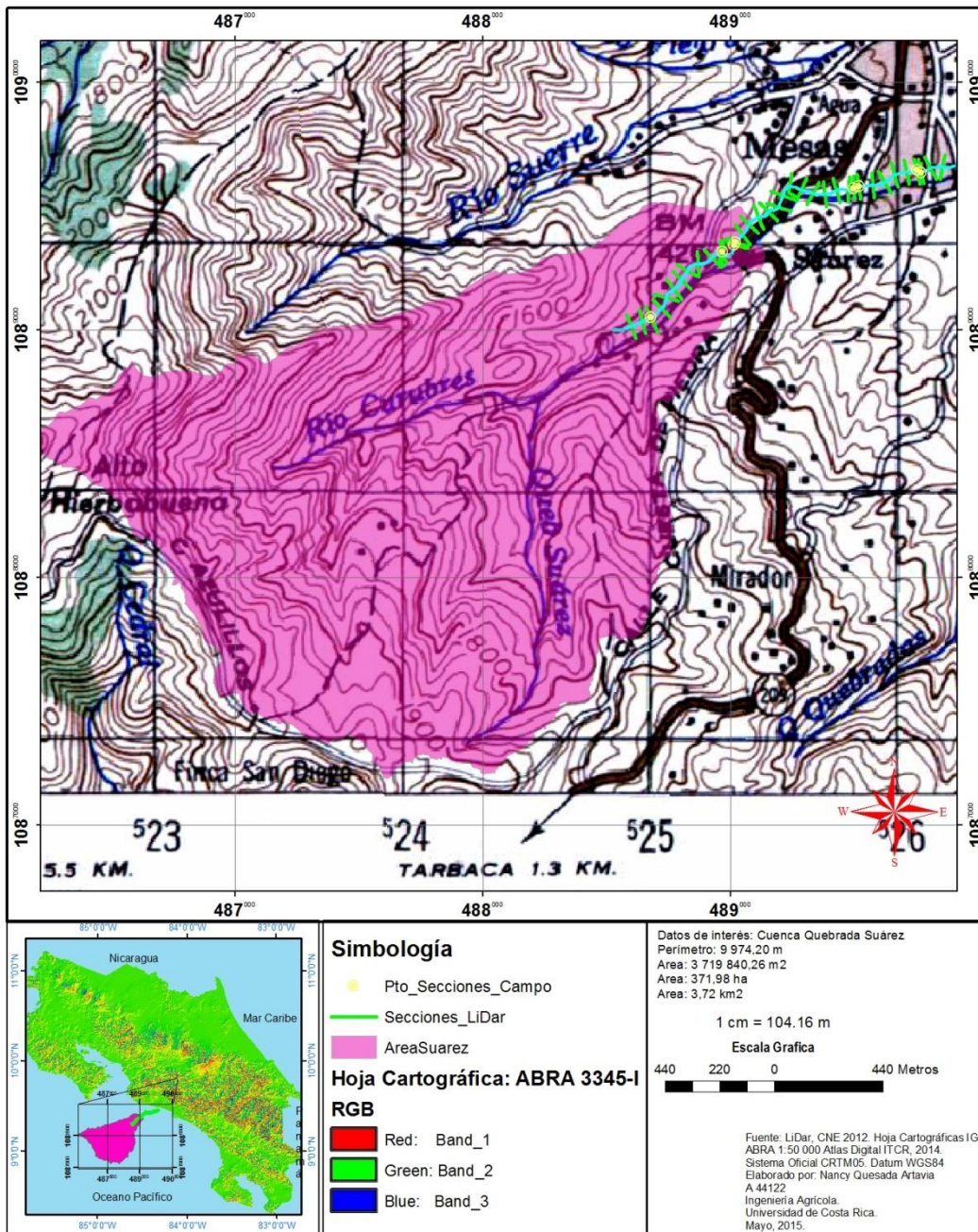
#### **4.7.2 Implementación de modelo Hec-Ras**

Se procedió a obtener 36 secciones transversales del cauce de la Quebrada Suárez cada 50 metros aproximadamente, mediante tecnología LiDar con la herramienta Hec GeoRas; donde, como se indica en el Tutorial de León 2013; fue necesario obtener un TIN del DEM LiDar para la implementación de dicha herramienta; (Figura 23, Secciones\_LiDar) en un tramo de 1730 metros, se hizo la elección del tramo en estudio con base en los puentes ubicados en el lugar en estudio, ubicándose el primer puente 650 metros aguas arriba del punto de cierre de la cuenca en estudio; dichas secciones fueron procesadas para ser importadas al programa HEC-RAS donde se modificó e ingresó las 9 secciones levantadas en campo (Figura 23, Pto\_Secciones\_Campo y visibles en ANEXOS) así como el ingreso de los 5 puentes (donde los mismos solo contaban con el tablero, visibles en ANEXOS, estaciones 138,3557, 403,7426, 1051,574, 1131,405 y 1558,79).



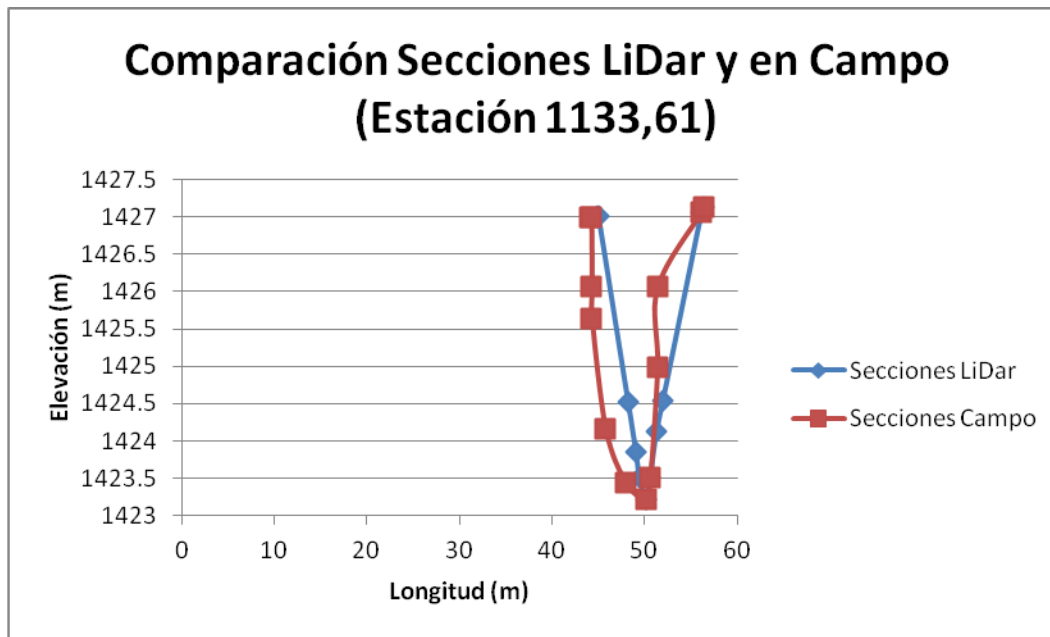
**Figura 23.** Secciones transversales LiDar, Campo y estructuras en la Quebrada Suárez.

**DETERMINACION DE SECCIONES TRANSVERSALES MEDIANTE HEC GEORAS EN LA QUEBRADA SUAREZ**



**Figura 24.** Secciones transversales obtenidas mediante TIN para la implementación de Hec GeoRas.

Con el fin de determinar la exactitud de las dimensiones de las secciones generadas mediante la tecnología LiDar se procedió a comparar dichas secciones con las secciones levantadas en campo para las estaciones 1133,61 y 156,42 (Figura 24 y 25).

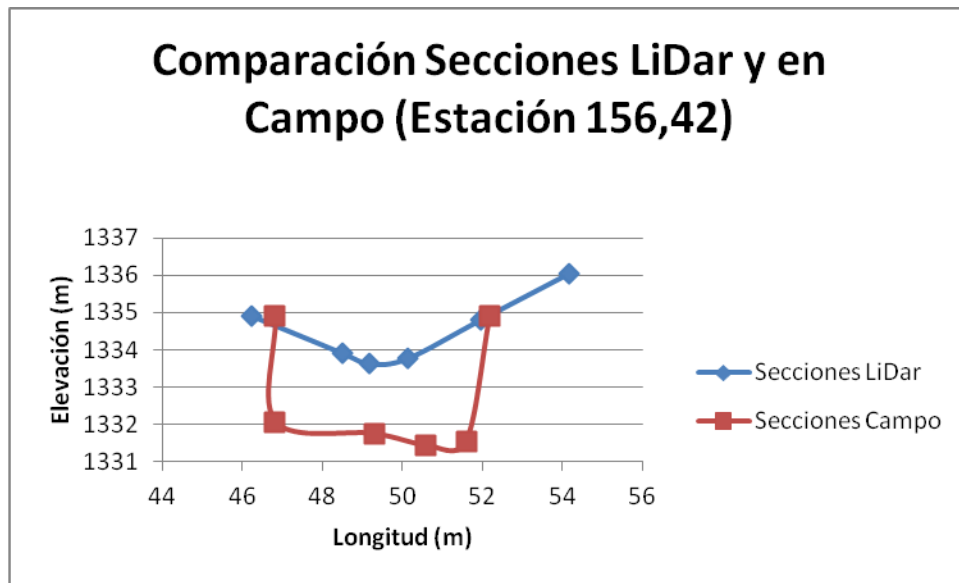


**Figura 25.** Comparación de secciones obtenidas mediante LiDar y mediante levantamiento en campo.

Se procedió a ingresar los datos de ambas secciones al programa HCANALES con el fin de comparar la capacidad hidráulica de las mismas con lo que se determinó la siguiente tabla:

**Tabla 20.** Comparación hidráulica mediante el programa HCANALES estación 1133,61.

	Secciones LiDar	Secciones Campo	Diferencia
Área Hidráulica (m <sup>2</sup> )	21,08	24,37	3,29
Caudal Total (m <sup>3</sup> /s)	29,28	33,08	3,80



**Figura 26.** Comparación de secciones obtenidas mediante LiDar y mediante levantamiento en campo.

Igualmente se realizó un análisis hidráulico de la secciones de la estación 156, 42 mediante el programa HCANALES con lo que se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 21.** Comparación hidráulica mediante el programa HCANALES estación 156,42.

	Secciones LiDar	Secciones Campo	Diferencia
Área Hidráulica (m <sup>2</sup> )	5,63	16,17	10,54
Caudal Total (m <sup>3</sup> /s)	4,09	21,88	17,79

Por lo tanto según datos obtenidos con anterioridad se considera significativa la diferencia obtenida entre ambas secciones, donde un caudal de 3 800 l/s y 17 790 l/s podría determinar un aumento en el diseño hidráulico de estructuras a instalar en la zona en estudio.

La implementación de la tecnología LiDar es de gran ayuda en el desarrollo de estudios Hidrológicos, sin embargo para estudios Hidráulicos se considera necesario contar con levantamientos topográficos realizados en puntos de interés

los cuales podrían definirse como obstrucciones en el cauce (puentes, pasos de alcantarillas, muros o estructuras que estrangulen la sección transversal del cauce en estudio).

Posteriormente se procedió a modelar los caudales de diseño determinados tanto para el evento en estudio (Huracán Tomás) así como para los caudales de diseño para diferentes periodos de retorno.

Se implementó un coeficiente de rugosidad de 0,07 para ambos márgenes del cauce, según lo observado en campo, la aplicación de la Tabla 29 y el Manual de Referencias del programa Hec-Ras 4.1.0, lo cual corresponde a llanuras de inundación con maleza densa a media en invierno. Y para la rugosidad del canal se implementó un coeficiente de 0,055 el cual corresponde a corrientes naturales limpios, con montículos o pozos profundos con mucho más piedras y malezas.

Igualmente se utilizó una distancia hasta la sección de aguas abajo como se muestra en la siguiente Tabla:

**Tabla 22.** Distancias hasta la sección de aguas abajo para cada estación de la Quebrada Suárez.

Estación	Distancia hasta la sección de aguas abajo		
	LOB	Channel	ROB
1650	51.03	50	47.33
1600	35.387	37.8	40.037
1562.19	0.843	0.9	0.953
1561.297	4.302	5	5.326
1558.79	Bridge		
1556.29	1.118	1.3	1.385
1554.99	47.31	54.99	58.579
1500	42.1	49.99	57.31
1450	57.64	50	39.38
1400	47.55	50	52.66
1350	41.3	45.05	48.98
1304.932	65.35	54.92	38.86

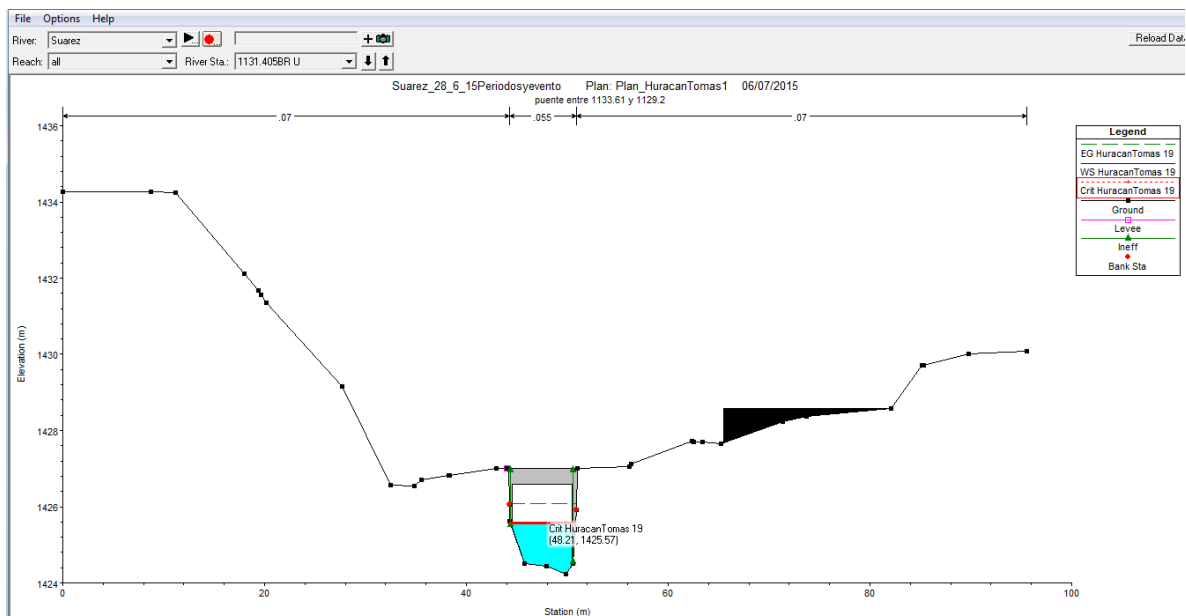
1250	56.01	64.83	74.29
1185.174	53.77	41.68	24.9
1143.461	11.041	9.42	19.214
1134.01	0.469	0.4	0.816
1133.61	2.934	4.4	4.874
1131.405	Bridge		
1129.2	0.333	0.5	0.554
1128.7	49.206	73.8	81.752
1054.87	0.867	1.3	1.44
1053.577	4.681	4	3.563
1051.574	Bridge		
1049.57	2.224	1.9	1.692
1047.67	5.945	5.08	4.525
1042.597	48.99	42.6	32.87
1000	46.83	49.98	53.41
950.0001	54.06	49.99	43.77
900	42.26	50	55.17
850	42.83	49.98	55.09
800	51.51	50	49.72
750.0001	65.55	50	25.16
700	52.9	50	49.49
650	51.54	50	48.82
600.0001	43.48	50	57.58
550	47.38	50	51.11
500	54.98	50	47.28
450.0001	21.05	21.59	22.98
428.4072	19.926	21.43	23.161
406.973	0.214	0.23	0.249
406.7432	6.037	6	5.961
403.7426	Bridge		
400.742	0.533	0.53	0.527
400.212	50.52	50.21	49.882
350	45.42	50	56.42
300	52.36	50	45.77
250	50.77	49.99	49.82
200	42.42	43.57	43.83
156.4265	15.059	14.97	14.94
141.455	0.101	0.1	0.1
141.3554	5.53	6	6.319
138.3557	Bridge		
135.356	0.323	0.35	0.369

135.006	32.267	35.01	36.872
99.99998	56.65	50	43.22
50.00003	44.06	50	50.96

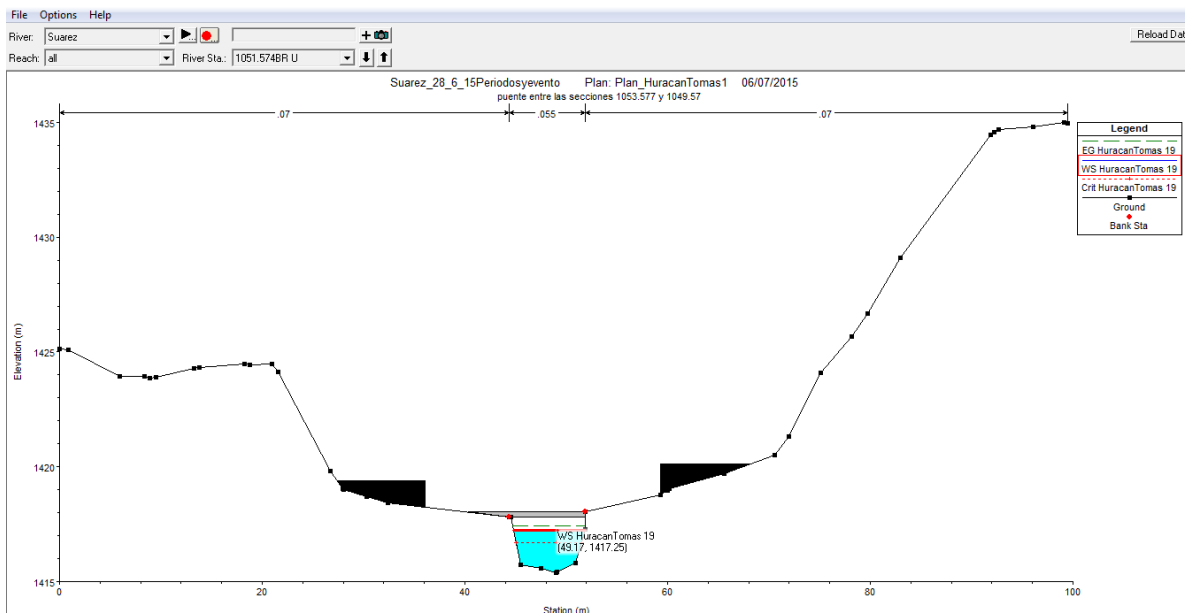
Una vez ingresadas las secciones transversales del cauce de la Quebrada Suárez se procedió a ingresar los datos hidráulicos para un flujo mixto de caudal permanente en el programa Hec Ras; este caudal se obtuvo con anterioridad en la modelación mediante el programa Hec Hms (19,9 m<sup>3</sup>/s) así como los caudales de diseño para los periodos de retorno de 2, 10, 25 y 50 años; igualmente y con el fin de determinar el caudal que provocaría los eventos ocurridos para el Huracán Tomas según niveles de inundación indicados por habitantes del lugar, se procedió a ingresar varios perfiles de datos hidráulicos partiendo de los 19,9 m<sup>3</sup>/s, aumentando el caudal hasta determinarse que un caudal de 60 m<sup>3</sup>/s cumplía con las condiciones de crecida, esto por cuanto se evidencia que para un caudal de 19,9 m<sup>3</sup>/s, no se provocan los eventos ocurridos para el Huracán Tomas ya que dicho caudal no produce inundación en la secciones de las cuales se tiene la altura de inundación ocurrida en el evento en estudio (estas alturas corresponden en 30 cm sobre el nivel del puente ubicado entre las estaciones 1133,61 y 1129,2 y en aproximadamente 80 cm bajo el nivel del puente ubicado entre las estaciones 1053,577 y 1049,57 (donde las estaciones ubicadas entre dichos tramos comprende a secciones interpoladas y determinadas para la ubicación de las mismas en la Longitud de expansión y Longitud de contracción según corresponde); estas altura fueron adquiridas mediante entrevistas a los vecinos de la localidad). Esto podría atribuirse a que el evento en estudio no solo incluyó el trasiego de agua sino que incluyó materiales como troncos, arrastre de sedimentos generado por deslizamientos provocando obstrucciones en los puentes y disminuyendo la capacidad hidráulica de las secciones transversales del cauce lo cual concuerda con el documento denominado “Desarrollo de escenarios por inestabilidad a laderas para la implementación de restricciones, en el uso de la tierra en las áreas de influencia del deslizamiento de El Burío, Aserrí, San José”



disponible en el sitio web de la CNE; donde se menciona que en la zona en estudio se encuentra el deslizamiento denominado El Burío.



**Figura 27.** Modelación  $Q = 19,9 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 1131,405BR U. Altura del agua 1425,57m. Quebrada Suárez.



**Figura 28.** Modelación  $Q = 19,9 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 1051,574BR U. Altura del agua 1417,25m. Quebrada Suárez.

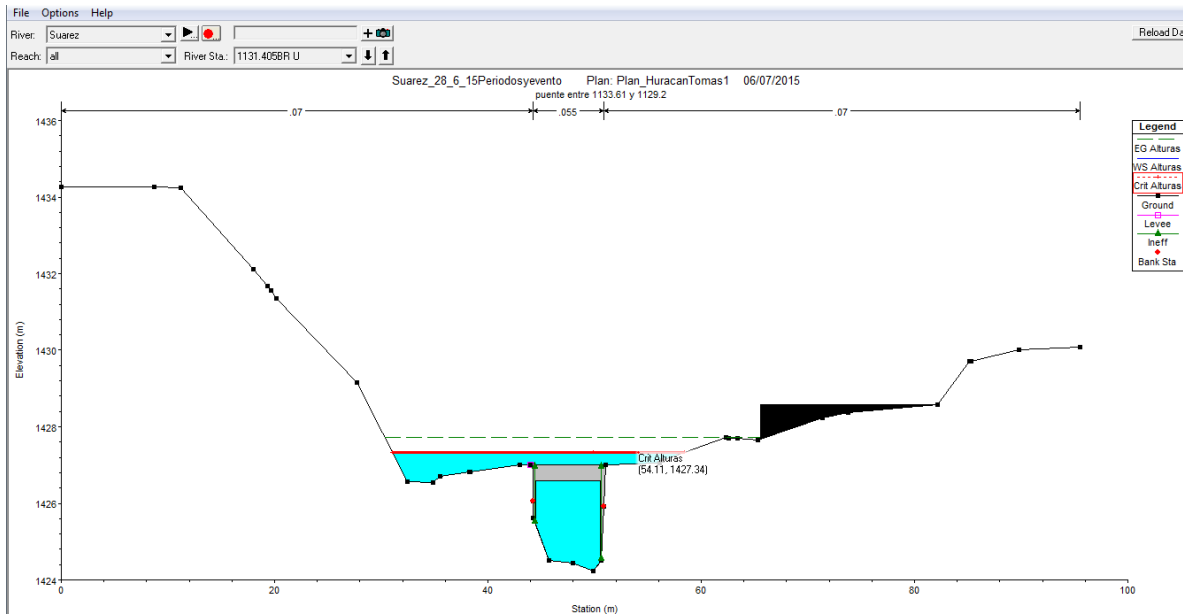
Donde se observó que la modelación hidráulica para un caudal de 60 m<sup>3</sup>/s la elevación superficial del puente para la estación 1131,405BR U corresponde a 1427m y la altura del agua corresponde a 1427,34 generando una diferencia de 0,34 m, y para la estación 1051,57 BR U la elevación debajo del puente corresponde a 1417,82 m y la altura del agua corresponde a 1416,90 m con una diferencia de 0,91 m; lo cual concuerda con lo indicado en campo por los pobladores; con lo que se determinó la siguiente tabla:

**Tabla 23.** Modelación Hidráulica de caudales de diseño para el evento en estudio, diferentes períodos de retorno y alturas según entrevistas.

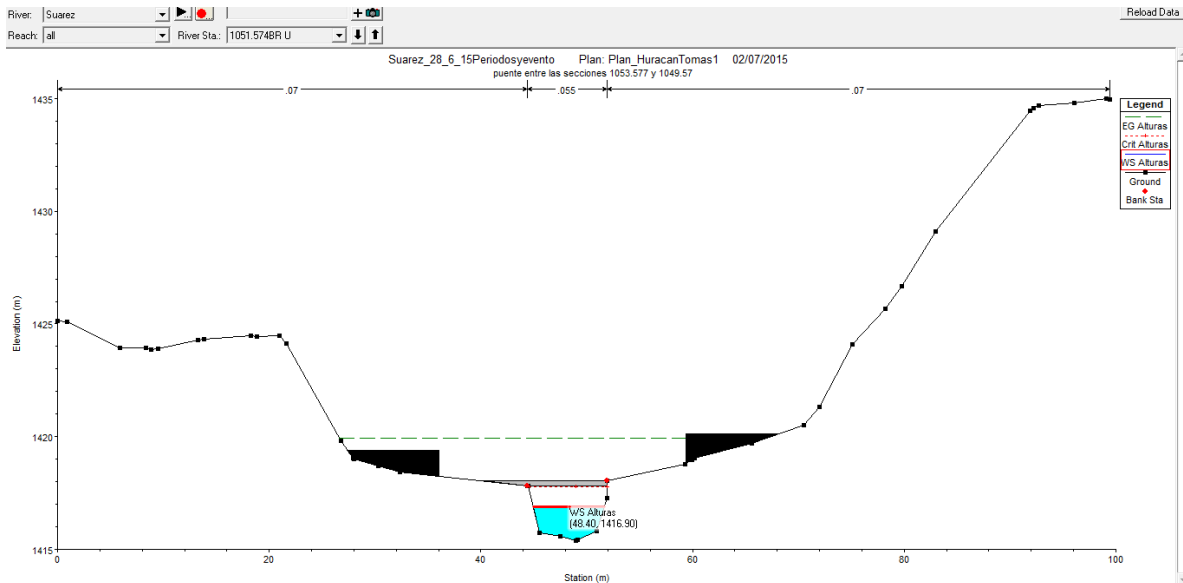
Tabla completa visible en CD adjunto

Estación	Perfil	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S Elev (m)	Crit W.S (m)	E.G Elev (m)	E.G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
1133.6	Huracán Tomas 19,9	19.9	1424.22	1425.69	1425.6	1426.08	0.021414	2.79	7.14	6.59	0.83
	T=2 años	24.2	1424.22	1425.85	1425.7	1426.3	0.020344	2.97	8.15	6.62	0.83
	T= 10 años	41.8	1424.22	1426.69	1426.2	1427.19	0.011781	3.14	13.33	6.75	0.68
	T= 25 años	52.6	1424.22	1427.51	1426.5	1427.74	0.00525	2.26	32.15	29.54	0.42
	T=50 años	60.6	1424.22	1427.35	1426.7	1427.73	0.009533	2.92	27.33	27.51	0.56
	Alturas	60	1424.22	1427.34	1426.7	1427.72	0.009377	2.9	27.28	27.49	0.56
1131.4		Bridge									
1129.2	Huracán Tomas 19,9	19.9	1423.74	1424.99	1425.1	1425.59	0.041084	3.43	5.81	6.31	1.12
	T=2 años	24.2	1423.74	1425.12	1425.2	1425.81	0.041477	3.68	6.58	6.49	1.14
	T= 10 años	41.8	1423.74	1425.38	1425.7	1426.7	0.059177	5.09	8.21	6.67	1.41
	T= 25 años	52.6	1423.74	1425.63	1426	1427.11	0.053092	5.4	9.74	6.7	1.38
	T=50 años	60.6	1423.74	1426.73	1426.2	1427.21	0.012203	3.19	23.77	25.83	0.63
	Alturas	60	1423.74	1426.71	1426.2	1427.2	0.012385	3.2	23.29	25.61	0.63
1053.6	Huracán Tomas	19.9	1415.4	1417.26	1416.7	1417.45	0.009279	1.93	10.33	7.14	0.51

	<b>19,9</b>										
	<b>T =2 años</b>	24.2	1415.4	1417.47	1416.8	1417.68	0.009402	2.05	11.79	7.24	0.51
	<b>T= 10 años</b>	41.8	1415.4	1418.69	1417.3	1418.83	0.003854	1.79	28.39	22.22	0.34
	<b>T= 25 años</b>	52.6	1415.4	1416.73	1417.6	1419.89	0.227718	7.88	6.68	6.52	2.49
	<b>T=50 años</b>	60.6	1415.4	1416.79	1417.8	1420.52	0.254733	8.56	7.08	6.59	2.64
	<b>Alturas</b>	60	1415.4	1416.79	1417.8	1420.45	0.250016	8.48	7.08	6.59	2.61
<b>1051.6</b>		Bridge									
	<b>Huracán Tomas 19,9</b>	19.9	1414.51	1415.46	1415.9	1416.87	0.171117	5.26	3.78	5.78	2.08
	<b>T =2 años</b>	24.2	1414.51	1415.55	1416	1417.14	0.167799	5.57	4.34	5.92	2.08
	<b>T= 10 años</b>	41.8	1414.51	1415.89	1416.5	1418.07	0.161114	6.55	6.39	6.38	2.09
	<b>T= 25 años</b>	52.6	1414.51	1416.22	1416.8	1418.13	0.110053	6.13	8.58	6.88	1.75
	<b>T=50 años</b>	60.6	1414.51	1416.42	1417	1418.3	0.094941	6.08	9.97	7.03	1.63
	<b>Alturas</b>	60	1414.51	1416.42	1416.9	1418.26	0.092848	6.01	9.98	7.04	1.61



**Figura 29.** Modelación  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 1131,405BR U. Altura del agua 1427,34m .Quebrada Suárez.



**Figura 30.** Modelación  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 1051,574BR U. Altura del agua 1416,90m. Quebrada Suárez.

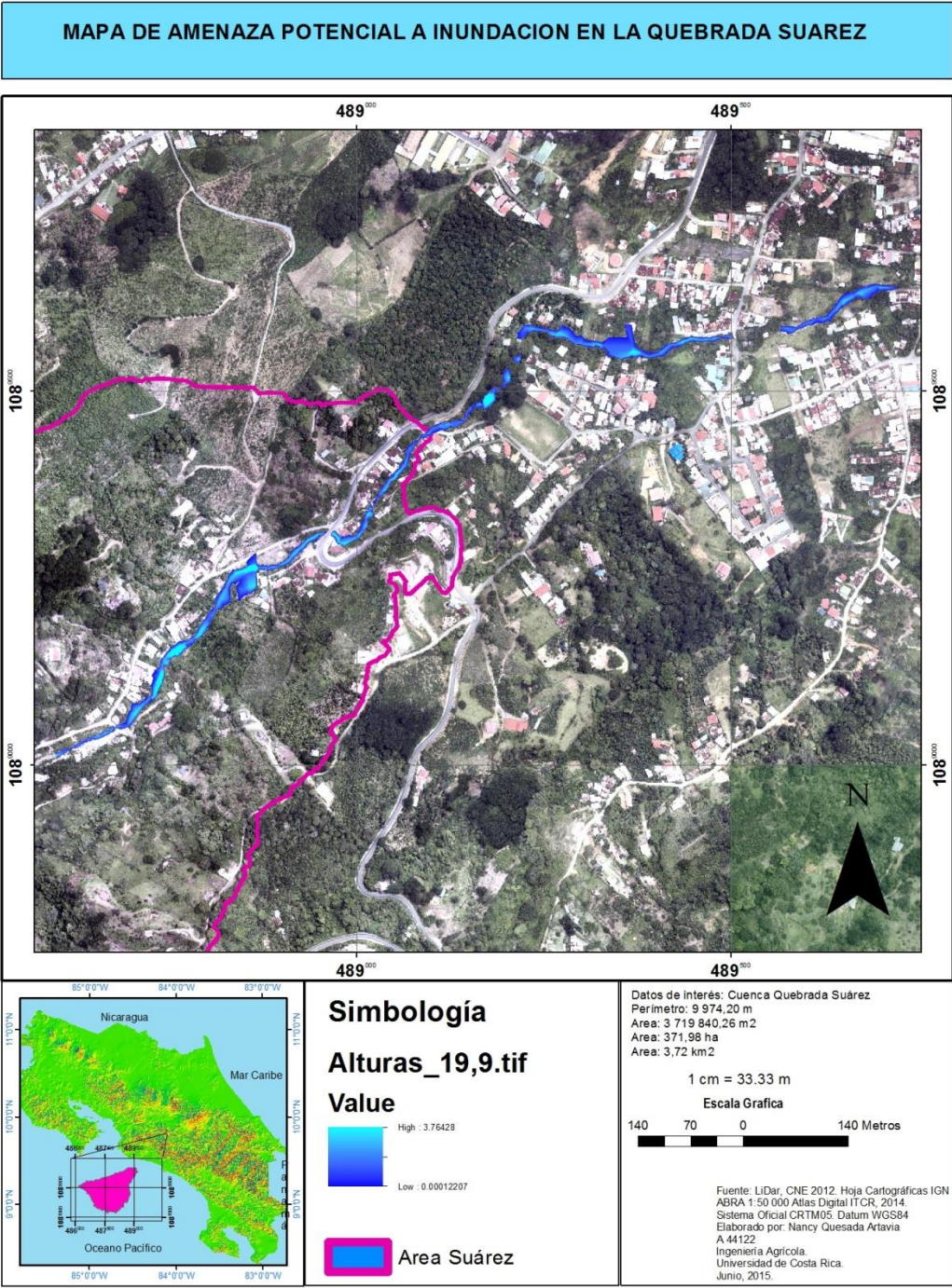
**Tabla 24.** Modelación Hidráulica de puentes. Quebrada Suárez.

River Sta	Profile	E.G. US.	Min El Prs	BR Open Area	Prs O WS	Q total	Min El Weir Flow	Delta EG
		(m)	(m)	(m2)	(m)	(m3/s)	(m)	(m)
1558.79	Huracán Tomas 19,9	1465.32	1465.67	11.67		19.9	1465.8	0.55
	T=50 años	1467.1	1465.67	11.67	1465.52	60.6	1465.8	0.79
	Alturas	1467.08	1465.67	11.67	1465.51	60	1465.8	0.78
1131.405	Huracán Tomas 19,9	1426.08	1426.6	12.47		19.9	1427	0.49
	T=50 años	1427.73	1426.6	12.47		60.6	1427	0.52
	Alturas	1427.72	1426.6	12.47		60	1427	0.53
1051.574	Huracán Tomas 19,9	1417.45	1417.81	11.28		19.9	1418.03	0.58
	T=50 años	1420.52	1417.81	11.28	1416.79	60.6	1418.03	-45.79
	Alturas	1420.45	1417.81	11.28	1416.79	60	1418.03	-45.85
403.7426	Huracán Tomas 19,9	1352.2	1352.9	22.92	1350.82	19.9	1353.4	-112.57
	T=50 años	1353.97	1352.9	22.92	1351.48	60.6	1353.4	-112.34
	Alturas	1353.95	1352.9	22.92	1351.47	60	1353.4	-112.36
138.3557	Huracán Tomas 19,9	1331.72	1332.3	10.76		19.9	1332.77	0.38
	T=50 años	1333.96	1332.3	10.76		60.6	1332.77	0.7
	Alturas	1334.23	1332.3	10.76		60	1332.77	0.99

Como se observa en la figura anterior y ya que los cálculos de flujo a presión empiezan cuando la elevación de la línea de energía aguas arriba de la sección de los puentes sea ligeramente mayor que la elevación más alta de la cuerda inferior aguas abajo. Según comparación de las columnas 3 (donde se muestra la elevación de la línea de energía de la sección aguas arriba) y 4 (donde se

muestra la elevación asignada para que empiece el flujo a presión) es posible determinar que para el caudal de 19,9 m<sup>3</sup>/s en ninguno de los puentes ocurre flujo a presión mas no así en los caudales de 60 m<sup>3</sup>/s y 60,6 m<sup>3</sup>/s donde la elevación de la línea de energía es mayor a la elevación para que empiece el flujo a presión.

Con el fin de visualizar los resultados de las modelaciones para los caudales en estudio (19,9 m<sup>3</sup>/s, 24,2 m<sup>3</sup>/s, 41,8 m<sup>3</sup>/s, 52,6 m<sup>3</sup>/s, 60,6 m<sup>3</sup>/s, y 60 m<sup>3</sup>/s), mediante el programa ArcMap 10 y así obtener los Mapas de Amenaza Potencial a Inundación es que se procede a exportar la información generada mediante Hec Ras obteniéndose las siguientes figuras; donde es posible identificar que en algunos de los lugares donde se ubican los puentes ingresados en la modelación hidráulica se produce desbordamiento a partir de un caudal para un período de retorno de 25 años.



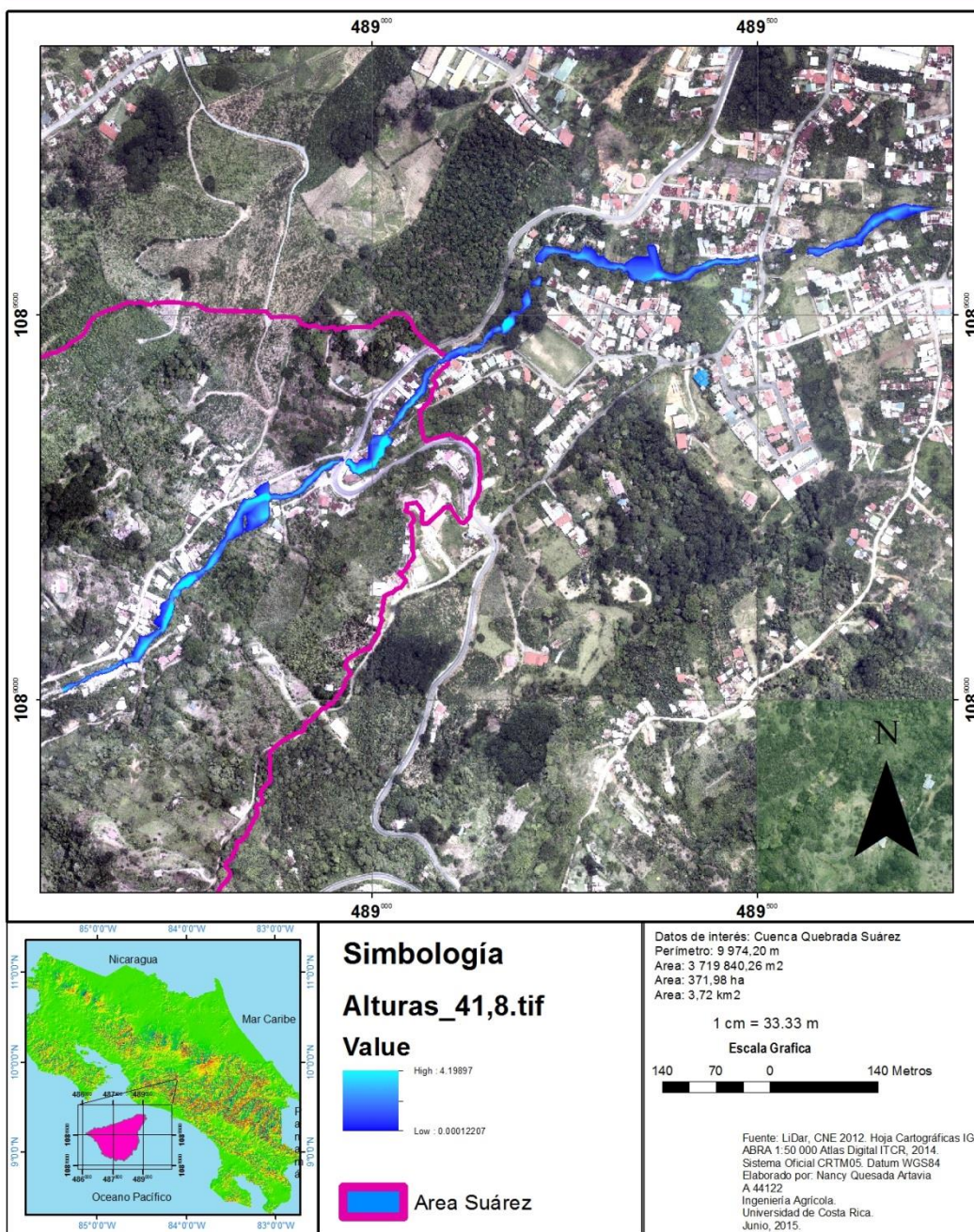
**Figura 31.** Mapa de Amenaza Potencial a Inundación para un caudal de 19,9 m<sup>3</sup>/s en la Quebrada Suárez.







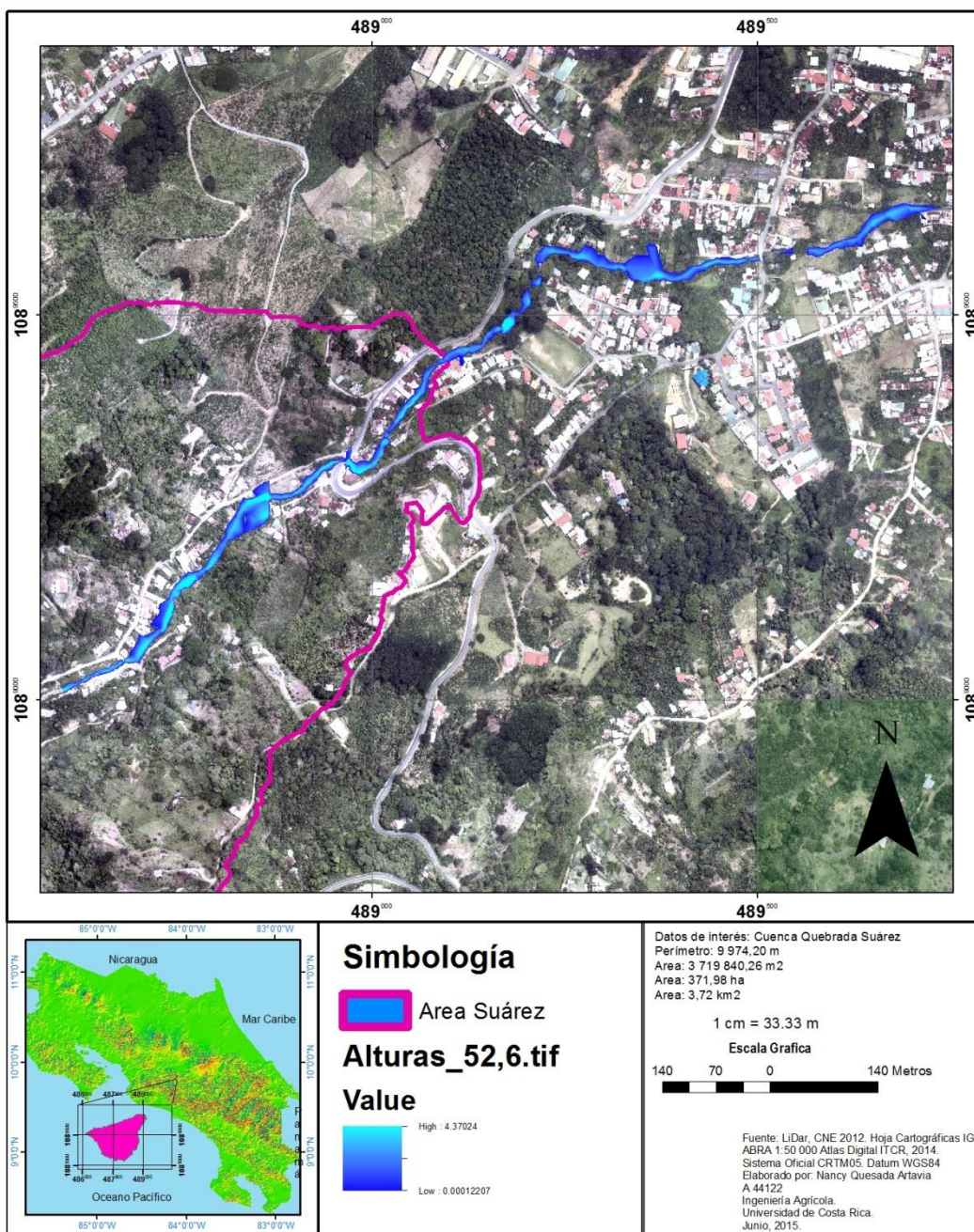
**MAPA DE AMENAZA POTENCIAL A INUNDACION EN LA QUEBRADA SUAREZ**



**Figura 33.** Mapa de Amenaza Potencial a Inundación para un caudal de 41,8 m<sup>3</sup>/s en la Quebrada Suárez.



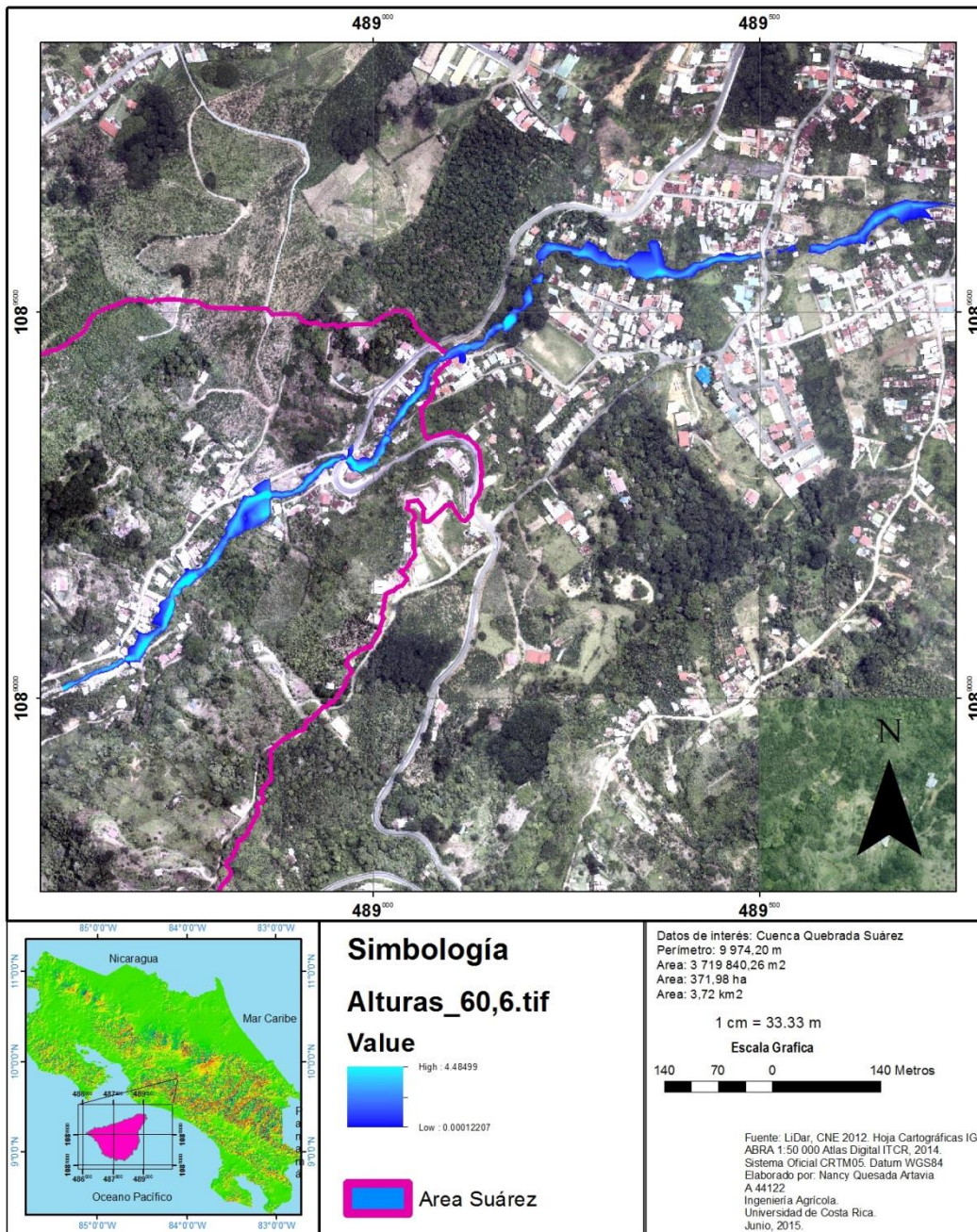
**MAPA DE AMENAZA POTENCIAL A INUNDACION EN LA QUEBRADA SUAREZ**



**Figura 34.** Mapa de Amenaza Potencial a Inundación para un caudal de 52,6 m<sup>3</sup>/s en la Quebrada Suárez.



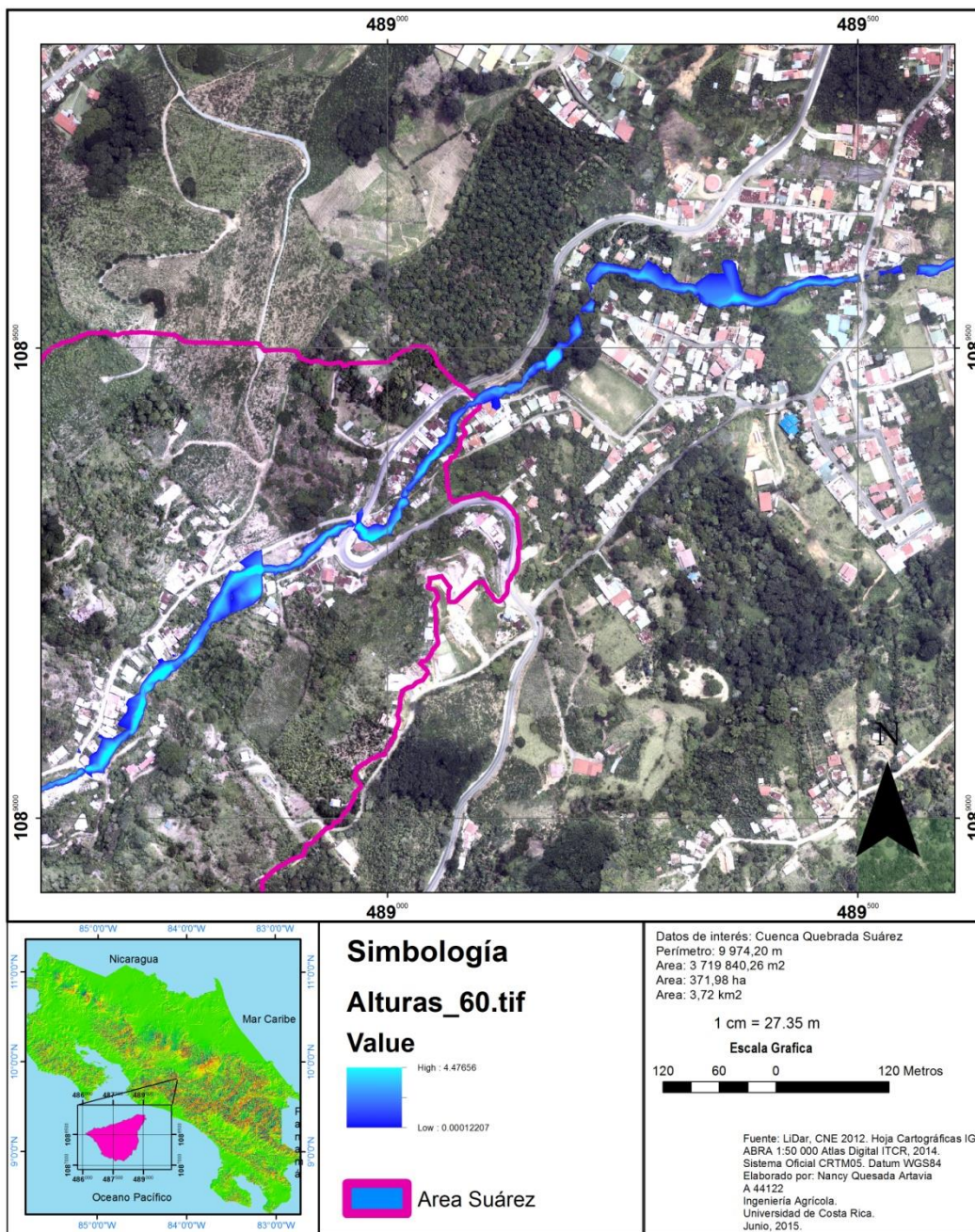
**MAPA DE AMENAZA POTENCIAL A INUNDACION EN LA QUEBRADA SUAREZ**



**Figura 35.** Mapa de Amenaza Potencial a Inundación para un caudal de 60,6 m<sup>3</sup>/s en la Quebrada Suárez.



**MAPA DE AMENAZA POTENCIAL A INUNDACION EN LA QUEBRADA SUAREZ**



**Figura 36.** Mapa de Amenaza Potencial a Inundación para un caudal de 60 m<sup>3</sup>/s en la Quebrada Suárez.

Como se observó mediante la comparación de la Figura 33. Mapa de Amenaza Potencial a Inundación para un caudal de 60,6 m<sup>3</sup>/s en la Quebrada Suárez y la Figura 34. Mapa de Amenaza Potencial a Inundación para un caudal de 60 m<sup>3</sup>/s en la Quebrada Suárez los mapas obtenidos para los caudales modelados varían en 8 milímetros la profundidad máxima a la cual llega el agua. Donde se evidencia una profundidad máxima de 4,48499 m para un caudal de 60 m<sup>3</sup>/s y una profundidad máxima de 4,47656 m para un caudal de 60,6 m<sup>3</sup>/s. Por lo tanto un caudal de 600 l/s no es significativo con relación a la profundidad que genera un caudal de 60 000 l/s lo cual podría atribuirse a la topografía del lugar y la capacidad hidráulica de la Quebrada Suárez. Mas no así con un caudal de 19,9 m<sup>3</sup>/s por cuanto se observó que la máxima profundidad a la cual llega el agua corresponde a 3,76428 m evidenciándose una diferencia de 0,72 m con la altura producida por el caudal para el periodo de retorno de 50 años (60,6 m<sup>3</sup>/s).

Con el fin de realizar un análisis de sensibilidad del modelo hidráulico respecto al cambio en el coeficiente de rugosidad en el cauce es que se procedió a realizar dos modelaciones hidráulicas para el evento del Huracán Tomas (19,9 m<sup>3</sup>/s) en las cuales se incrementó en un 10 % el n de manning y otra en la que se disminuyó en un 10% los mismos con lo que se comparó el modelo como se muestra en la siguiente Tabla:

**Tabla 25.** N de manning utilizados para el análisis de sensibilidad del modelo Hidráulico respecto a coeficiente de rugosidad.

Plan	N de manning		
	LOB	Channel	ROB
<b>Huracán Tomas (PlanHT1)</b>	0,07	0,055	0,07
<b>Mas 10% n (Plan+10n_2)</b>	0,077	0,0605	0,077
<b>Menos 10% n (Planmenos10n_2)</b>	0,063	0,0495	0,063

Realizada una comparación entre los tres planes en estudio respecto a las alturas del agua y velocidades resultantes se obtuvo la siguiente Tabla:

**Tabla 26.** Comparación de Planes análisis de sensibilidad n de manning.

Tabla completa visible en CD adjunto

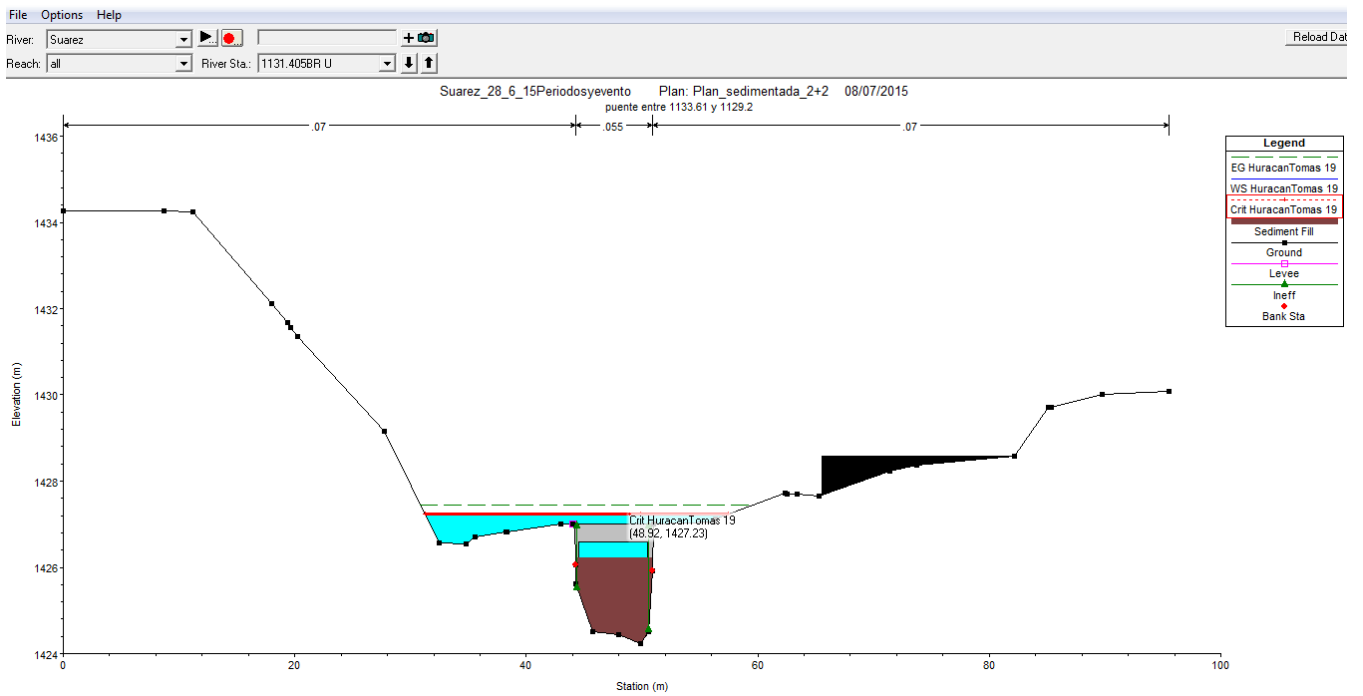
River Sta	Plan	Q Total	Min Ch El	W.S Elev	Dif Elev	Desv Est	Vel Chnl	Dif Vel	Desv Est	Froude #
		(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m)			(m/s)			Chl
1133.61	PlanHT1	19.9	1424.22	1425.69			2.79			0.83
	Plan+10n_2	19.9	1424.22	1425.69	0.00	0.04	2.78	0.01	0.27	0.83
	Planmenos10n_2	19.9	1424.22	1425.39	0.30	0.19	3.74	0.95	0.66	1.27
1131.41		Bridge								
1129.20	PlanHT1	19.9	1423.74	1424.99			3.43			1.12
	Plan+10n_2	19.9	1423.74	1425	0.01	0.04	3.4	0.03	0.27	1.11
	Planmenos10n_2	19.9	1423.74	1424.99	0.00	0.19	3.45	0.02	0.66	1.13
1053.58	PlanHT1	19.9	1415.4	1417.26			1.93			0.51
	Plan+10n_2	19.9	1415.4	1417.27	0.01	0.04	1.91	0.02	0.27	0.51
	Planmenos10n_2	19.9	1415.4	1416.21	1.05	0.19	5.81	3.88	0.66	2.44
1051.57		Bridge								
1049.57	PlanHT1	19.9	1414.51	1415.46			5.26			2.08
	Plan+10n_2	19.9	1414.51	1415.46	0.00	0.04	5.21	0.05	0.27	2.05
	Planmenos10n_2	19.9	1414.51	1415.45	0.01	0.19	5.3	0.04	0.66	2.1

Con lo que se determina que las diferencias de alturas al aumentar un 10 % el valor del n de manning generan una desviación estándar de 0.04 lo que indica que las diferencias de altura son muy similares al promedio de las mismas mas no así con una disminución en un 10% del n de manning por cuanto se observó que la desviación estándar aumenta (0.19) lo cual indica mayor variación respecto al promedio de diferencias de alturas.

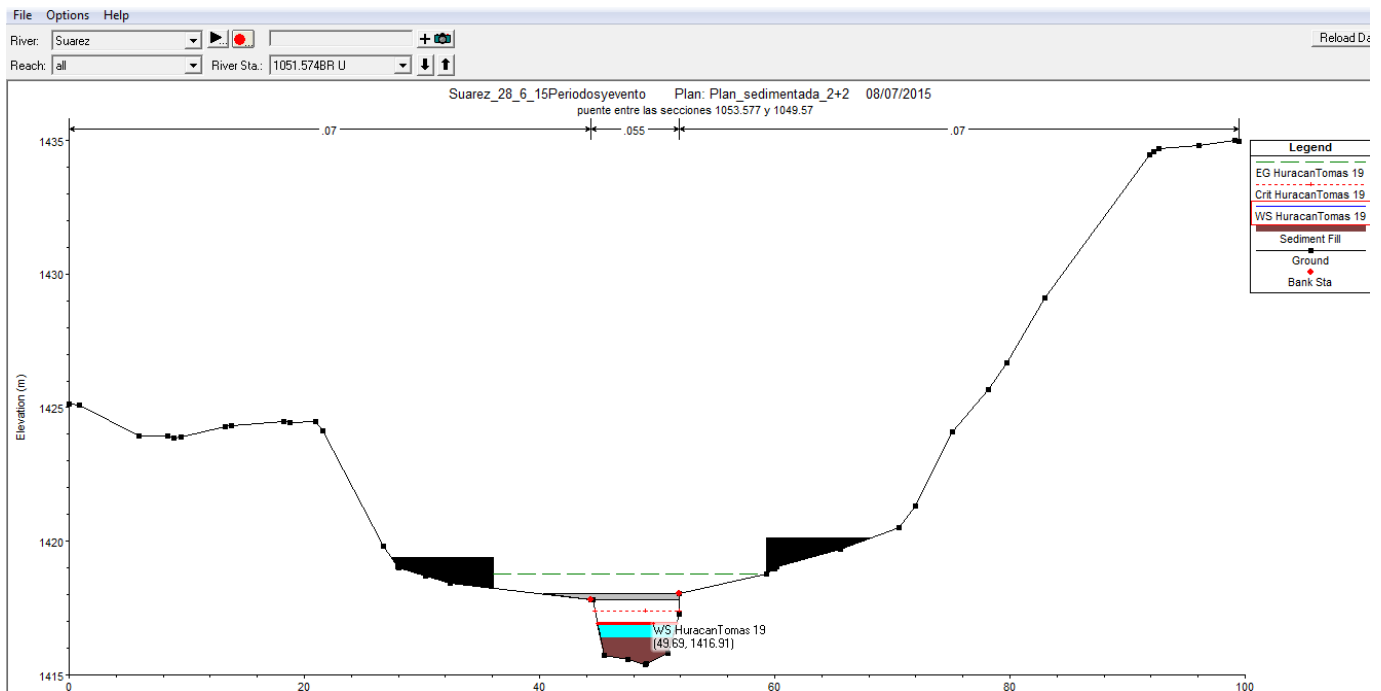
Igualmente se determinó que existe una mayor variación respecto a las velocidades del evento en estudio y las velocidades al aumentar o disminuir en 10% los valores del coeficiente de rugosidad; donde para la un 10 % menos existe una desviación estándar mayor indicando que los valores de velocidad varían mayormente con relación al promedio de diferencias de velocidad.

Posteriormente se realizó una modelación ingresando alturas de sedimentación con el fin de simular los eventos ocurridos en noviembre del 2010 por la afectación del Huracán Tomas, para un caudal de 19,9 m<sup>3</sup>/s, donde fue posible representar la acumulación y arrastre de material.

Inicialmente se ingresó una altura de sedimentación de 1 metro sin embargo no se cumplió con las alturas históricas reportadas por los vecinos de la zona para el evento en estudio; posteriormente se procedió a aumentar las alturas de sedimentos en la mayoría de las secciones del cauce a 2 metros y en 1 metro las secciones 1053,577 y 1049,57 entre las cuales se tiene la altura a la cual llegó el agua en el puente ubicado entre las secciones anteriormente mencionadas; con lo que se determina que para la sección 1133,61 la altura del agua sería 1427,35 m con una diferencia de 0,35 m, con lo que se cumple con la altura histórica, para una altura aproximada de 30 cm sobre el nivel del terreno (altura sobre el puente 1427 m) y una altura del agua de 1416,91 m para la estación 1051,574 BR U con una diferencia de 0,90 m, con lo que se cumple la altura histórica para un aproximado de 80 cm (1417,81 altura bajo el puente,).



**Figura 37.** Altura de Agua 1427,23 m. Estación 1131,405BR U. Quebrada Suarez.



**Figura 38.** Altura de Agua 1416,91 m. Estación 1051,574 BR U. Quebrada Suarez.



Con lo que se obtuvo la siguiente Tabla:

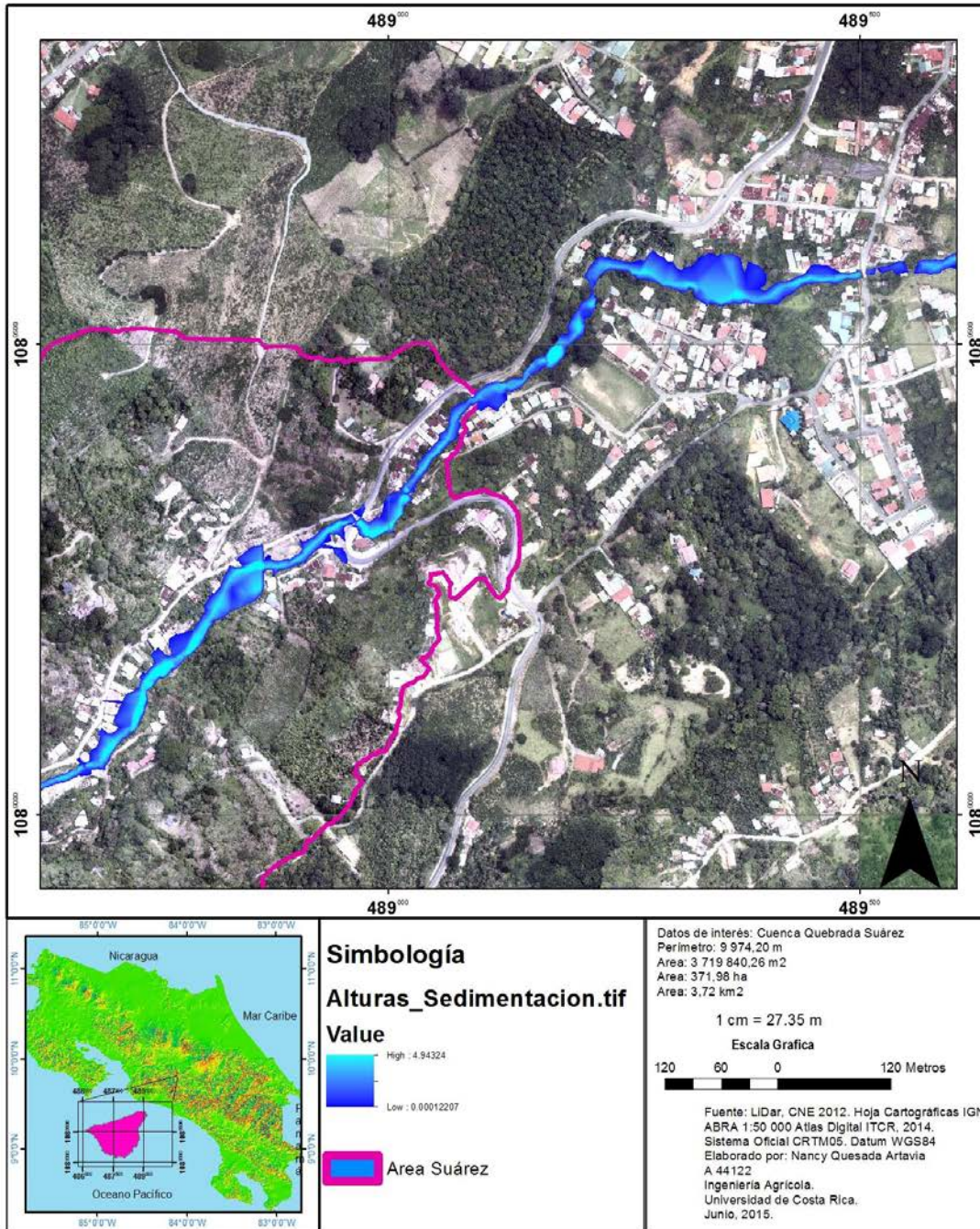
**Tabla 27.** Modelación altura de sedimentación en secciones.

River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S Elev	Crit W.S	E.G Elev	E.G Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl	
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)		
1650	Huracan Tomas 19.9	19.9	1474.43	1475.38	1475.38	1475.78	0.03131	2.85	7.34	9.15	0.98	
1600		19.9	1469	1469.41	1469.9	1471.6	0.4937	6.56	3.03	7.96	3.39	
1562.19		19.9	1465.3	1466.11	1466.33	1466.65	0.05159	3.35	7.03	17.74	1.22	
1561.297		19.9	1465.21	1465.98	1466.23	1466.59	0.06268	3.57	6.58	17.31	1.33	
1558.79		Bridge										
1556.29		19.9	1464.75	1465.72	1465.72	1465.97	0.01993	2.41	10.94	21.98	0.79	
1554.99		19.9	1464.63	1465.45	1465.59	1465.88	0.03981	3.07	8.05	18.27	1.09	
1500		19.9	1459.56	1459.87	1460.13	1460.86	0.37352	5.1	4.83	17.97	2.92	
1450		19.9	1454.61	1455.31	1455.34	1455.69	0.04921	3.12	7.61	12.05	1.19	
1400		19.9	1450.13	1450.52	1450.74	1451.22	0.1906	4.24	5.55	14.93	2.17	
1350		19.9	1444.9	1445.44	1445.54	1445.87	0.06648	3.12	7.16	14.1	1.35	
1304.932		19.9	1440.57	1440.82	1440.9	1441.12	0.17432	2.99	8.36	34.87	1.92	
1250		19.9	1434.78	1435.37	1435.37	1436.09	0.11257	4.27	5.66	11.09	1.78	
1185.174		19.9	1429.38	1429.94	1430.07	1430.39	0.06917	3.25	7.44	17.89	1.39	
1143.461		19.9	1426.71	1427.59	1427.71	1428.09	0.04449	3.17	6.76	11.89	1.08	
1134.01		19.9	1426.24	1427.02	1427.22	1427.62	0.05269	3.54	6.96	19.18	1.28	
1133.61		19.9	1426.22	1427.35	1427.17	1427.47	0.00782	1.75	16.75	27.62	0.52	
1131.405		Bridge										
1129.2		19.9	1425.74	1426.69	1426.69	1426.92	0.0184	2.39	11.78	25.3	0.78	
1128.7		19.9	1425.68	1426.56	1426.62	1426.88	0.0276	2.76	9.86	24.72	0.94	
1054.87		19.9	1417.54	1417.91	1418.48	1420.66	0.69047	7.35	2.71	7.39	3.87	
1053.577		19.9	1416.4	1416.81	1417.38	1419.76	0.66386	7.61	2.61	6.62	3.87	
1051.574		Bridge										
1049.57		19.9	1415.51	1417.53	1416.51	1417.63	0.00425	1.45	13.88	9.12	0.33	
1047.67		19.9	1416.08	1417.02	1417.03	1417.5	0.04235	3.06	6.49	6.9	1.01	
1042.597		19.9	1414.95	1415.57	1415.95	1416.87	0.18217	5.04	3.95	6.39	2.05	
1000		19.9	1412.36	1413.23	1413.23	1413.62	0.0383	3.24	7.8	10.3	1.11	
950.0001		19.9	1408.1	1408.47	1408.77	1409.54	0.27297	4.92	4.54	13.23	2.57	
900		19.9	1404.08	1404.49	1404.49	1404.69	0.05919	2.42	10.25	26.1	1.21	
850		19.9	1398.96	1399.47	1399.69	1400.19	0.13375	4.25	5.55	11.65	1.9	
800		19.9	1389.56	1389.95	1390.21	1390.88	0.25563	4.87	4.83	13.16	2.5	
750.0001		19.9	1385.06	1385.61	1385.64	1385.91	0.04924	2.71	8.56	16.58	1.17	
700	19.9	1379.33	1379.72	1380.05	1380.9	0.28853	4.98	4.23	12.68	2.63		

<b>650</b>	19.9	1373.79	1374.16	1374.22	1374.43	0.06852	2.31	8.61	25.29	1.27
<b>600.0001</b>	19.9	1371.09	1371.33	1371.33	1371.45	0.06704	1.82	13.18	55.43	1.18
<b>550</b>	19.9	1366.72	1367.09	1367.2	1367.44	0.10975	3.13	8.67	32.67	1.63
<b>500</b>	19.9	1361.02	1361.53	1361.68	1362.06	0.10619	3.76	6.46	14.24	1.69
<b>450.0001</b>	19.9	1356.88	1357.56	1357.7	1358.07	0.0622	3.52	6.93	12.9	1.36
<b>428.4072</b>	19.9	1355.28	1355.95	1356.1	1356.57	0.07656	3.49	5.7	8.58	1.37
<b>406.973</b>	19.9	1352	1352.41	1352.76	1353.7	0.26987	5.11	4.04	10.59	2.56
<b>406.7432</b>	19.9	1351.96	1352.38	1352.72	1353.63	0.25516	5.02	4.11	10.65	2.49
<b>403.7426</b>	Bridge									
<b>400.742</b>	19.9	1351.62	1352.37	1352.37	1352.71	0.0349	2.68	8.06	12.34	1
<b>400.212</b>	19.9	1351.59	1352.31	1352.34	1352.68	0.0408	2.82	7.66	12.22	1.08
<b>350</b>	19.9	1348.73	1349.21	1349.32	1349.64	0.09857	3.51	7.13	15.94	1.61
<b>300</b>	19.9	1345.03	1345.57	1345.6	1345.87	0.05466	2.82	8.67	17.96	1.22
<b>250</b>	19.9	1342.55	1343.1	1343.11	1343.37	0.04725	2.65	9.02	17.89	1.14
<b>200</b>	19.9	1337.98	1338.19	1338.3	1338.57	0.2881	3.41	7.41	37.69	2.4
<b>156.4265</b>	19.9	1333.45	1334.6	1334.6	1335.16	0.04501	3.34	5.97	5.31	1
<b>141.455</b>	19.9	1331.05	1333.34	1332.15	1333.43	0.00354	1.35	18.81	21.38	0.29
<b>141.3554</b>	19.9	1331.03	1333.35	1332.29	1333.43	0.00338	1.33	19.24	21.66	0.28
<b>138.3557</b>	Bridge									
<b>135.356</b>	19.9	1330.99	1332.38	1332.25	1332.76	0.02438	2.71	7.51	9.11	0.74
<b>135.006</b>	19.9	1330.99	1332.36	1332.13	1332.74	0.0256	2.76	7.39	9.1	0.75
<b>99.99998</b>	19.9	1330.75	1331.14	1331.14	1331.28	0.061	2.38	12.55	44.72	1.22
<b>50.00003</b>	19.9	1327.98	1328.21	1328.2	1328.29	0.05009	1.53	16.09	74.13	1.02

Igualmente se realiza el mapa potencial a inundación para la simulación anteriormente realizada:

**MAPA DE AMENAZA POTENCIAL A INUNDACION EN LA QUEBRADA SUAREZ**



**Figura 39.** Mapa de Amenaza Potencial a Inundación para una modelación de sedimentación para caudal de 19,9 m<sup>3</sup>/s en la Quebrada Suárez.

Con el fin de realizar una comparación entre las modelaciones hidráulicas para un caudal de 19,9 m<sup>3</sup>/s, implementado las secciones obtenidas con LiDar y las secciones obtenidas mediante LiDar mas las levantas en campos es que se procedió a comparar el ancho de superficie generado según cada modelación con lo que se obtuvo la siguiente tabla:

**Tabla 28.** Comparación del ancho de superficie entre las secciones LiDar y las secciones LiDar mas topografía.

River Sta	Q Total	Top WidthCampo	Top WidthLiDar	Diferencia
	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m)	(m)
1650	19.9	5.7	5.67	0.03
1600	19.9	4.36	4.39	-0.03
1562.19	19.9	5.3		
1561.297	19.9	5.33	33.45	-28.12
1558.79	Bridge			
1556.29	19.9	5.19		
1554.99	19.9	5.12		
1500	19.9	6.81	5.84	0.97
1450	19.9	6.86	7.13	-0.27
1400	19.9	9.01	8.61	0.4
1350	19.9	7.91	8.04	-0.13
1304.932	19.9	8.96	15.05	-6.09
1250	19.9	5.67	5.78	-0.11
1185.174	19.9	7.74	7.62	0.12
1143.461	19.9	5.63	10.55	-4.92
1134.01	19.9	6.6		
1133.61	19.9	6.59	4.12	2.47
1131.405	Bridge			
1129.2	19.9	6.31		
1128.7	19.9	6.19		
1054.87	19.9	5.95		
1053.577	19.9	7.14	9.89	-2.75
1051.574	Bridge			
1049.57	19.9	5.78		
1047.67	19.9	5.73		
1042.597	19.9	5.35	7.22	-1.87
1000	19.9	6.94	6.59	0.35
950.0001	19.9	5.89	6.2	-0.31

900	19.9	10.06	10.06	0
850	19.9	5.57	5.57	0
800	19.9	7.76	7.76	0
750.0001	19.9	10.66	10.66	0
700	19.9	6.34	6.34	0
650	19.9	10.67	10.67	0
600.0001	19.9	22.4	22.4	0
550	19.9	8.3	8.3	0
500	19.9	6.93	6.92	0.01
450.0001	19.9	6.11	6.11	0
428.4072	19.9	7.14	5.53	1.61
406.973	19.9	6.66		
406.7432	19.9	6.67	13.6	-6.93
403.7426	Bridge			
400.742	19.9	7.47		
400.212	19.9	7.19		
350	19.9	9.39	9.05	0.34
300	19.9	8.44	8.74	-0.3
250	19.9	10.89	10.63	0.26
200	19.9	6.96	7.13	-0.17
156.4265	19.9	4.99	5.96	-0.97
141.455	19.9	5.47		
141.3554	19.9	5.46	20.82	-15.36
138.3557	Bridge			
135.356	19.9	5.23		
135.006	19.9	5.22		
99.99998	19.9	9.7	9.32	0.38
50.00003	19.9	11.97	14.27	-2.3
Promedio		7.29	9.61	

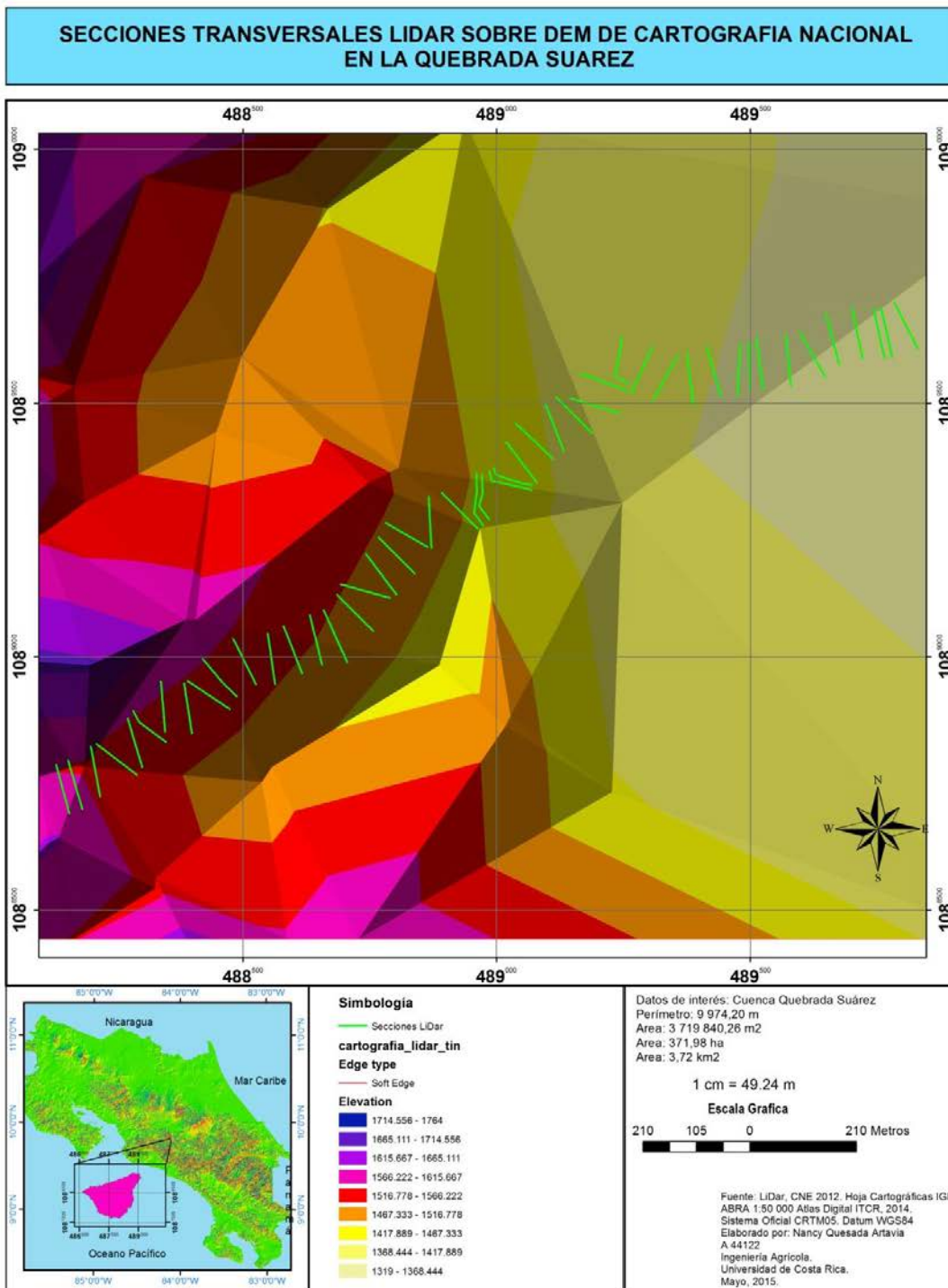
Mediante la tabla anterior es posible identificar que existen grandes diferencias métricas en aquellas secciones cercanas a los puentes mas no así en las que no se identifican puentes adyacentes, con un promedio para las secciones levantadas en campo de 7,29m y para las secciones LiDar de 9,61 m, donde se identifica que la mayor variación en el ancho de superficie del agua se obtiene en la sección 1561.29 con 28,12 m de diferencia; lo cual podría atribuirse a la precisión de la topografía esto por cuanto en las secciones LiDar no se cuenta con secciones

levantadas en campo. Por lo que se identifica que es necesario el levantamiento de secciones transversales en campo con el fin de obtener resultados precisos.

#### **4.8 Comparación de resultados de datos LiDar y Cartografía Nacional.**

Con el fin de determinar la exactitud y uso de la tecnología LiDar con la cartografía nacional se procede a generar Mapas de Amenaza Potencial a Inundación a partir de Cartografía Nacional escala 1:5000 (IGN) donde se obtiene un Modelo de Elevación Digital con resolución de 10x10 metros para realizar la comparación con datos LiDar donde el Modelo de Elevación Digital posee una resolución de 1x1 metros (Mapas de Amenaza obtenidos con anterioridad).

Inicialmente y realizando análisis de las Secciones transversales obtenidas mediante LiDar (anterior apartado) y las mismas sobrepuestas sobre TIN Cartografía Nacional, es posible identificar que el cauce en estudio según datos LiDar se ubica aproximadamente a 150 o 200 metros en relación con algunas secciones del cauce identificadas mediante TIN; con lo que es posible prever que las secciones que se obtendrán mediante el TIN de Cartografía Nacional no serán apegadas a la realidad según la escala a la cual se realiza el presente estudio.

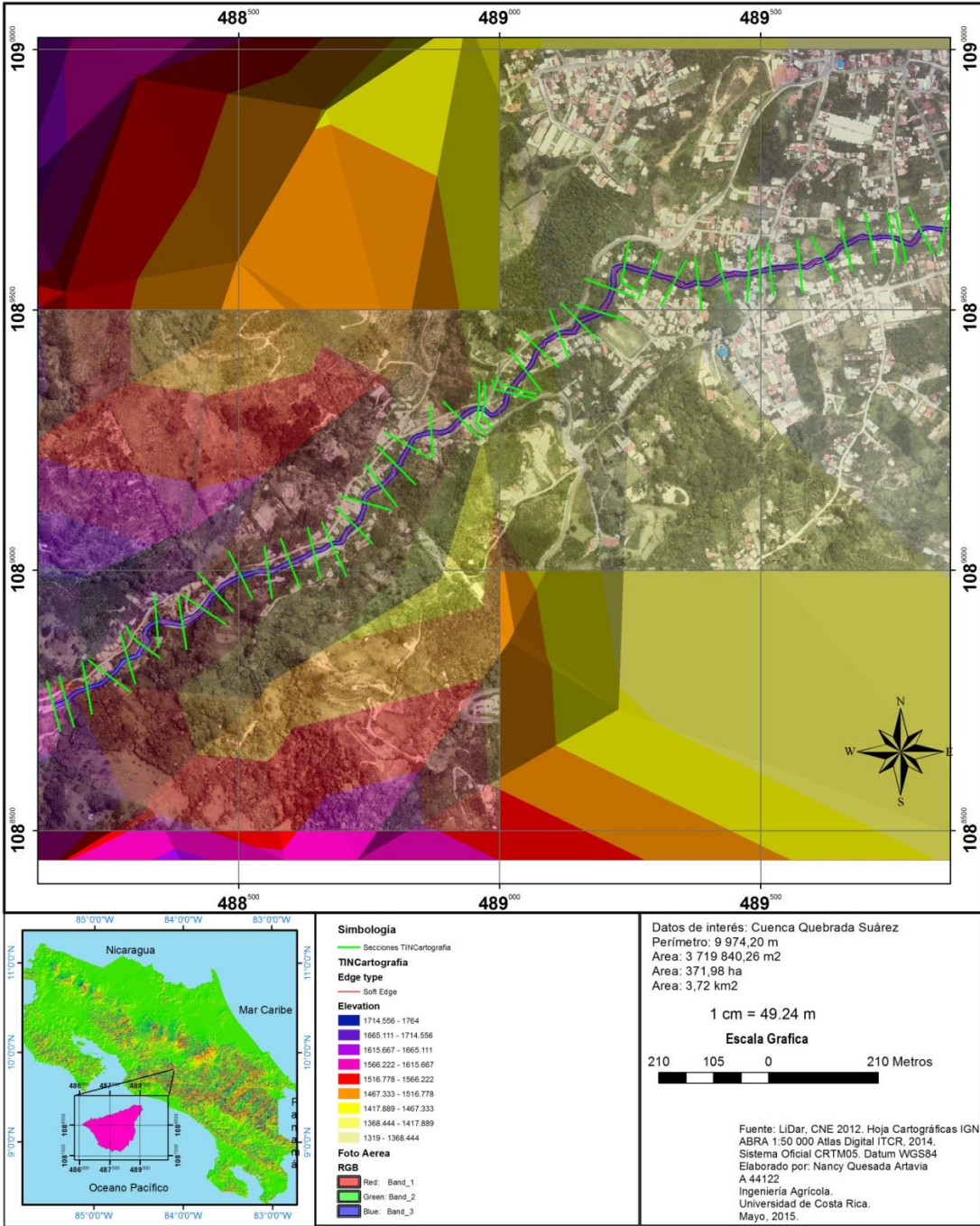


**Figura 40.** Secciones Transversales LiDar sobrepuestas sobre TIN Cartografía Nacional.

Se procedió a generar las secciones transversales del cauce según el TIN de Cartografía Nacional, donde las nuevas secciones estarían ubicadas en el mismo sitio geográfico que las obtenidas mediante LiDar con el fin de realizar comparación de las mismas; igualmente la digitalización de las secciones se realiza tomando como guía la fotografía aérea del sitio en estudio (Figura 42).



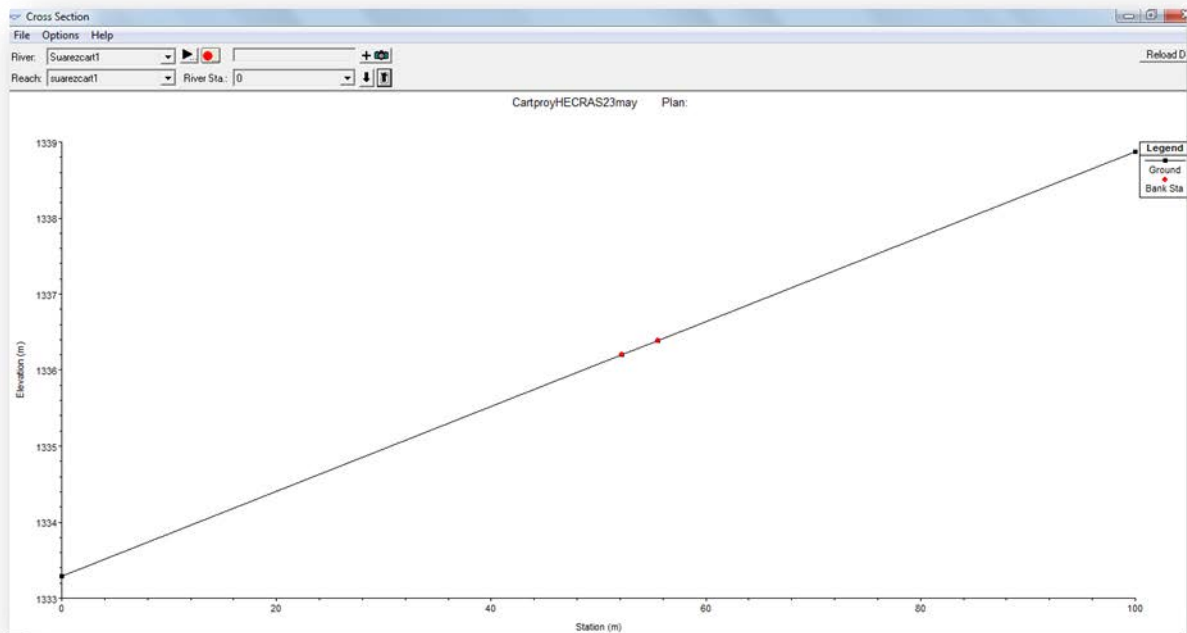
**SECCIONES TRANSVERSALES Y FOTOGRAFIA AEREA  
SOBRE DEM DE CARTOGRAFIA NACIONAL  
EN LA QUEBRADA SUAREZ**



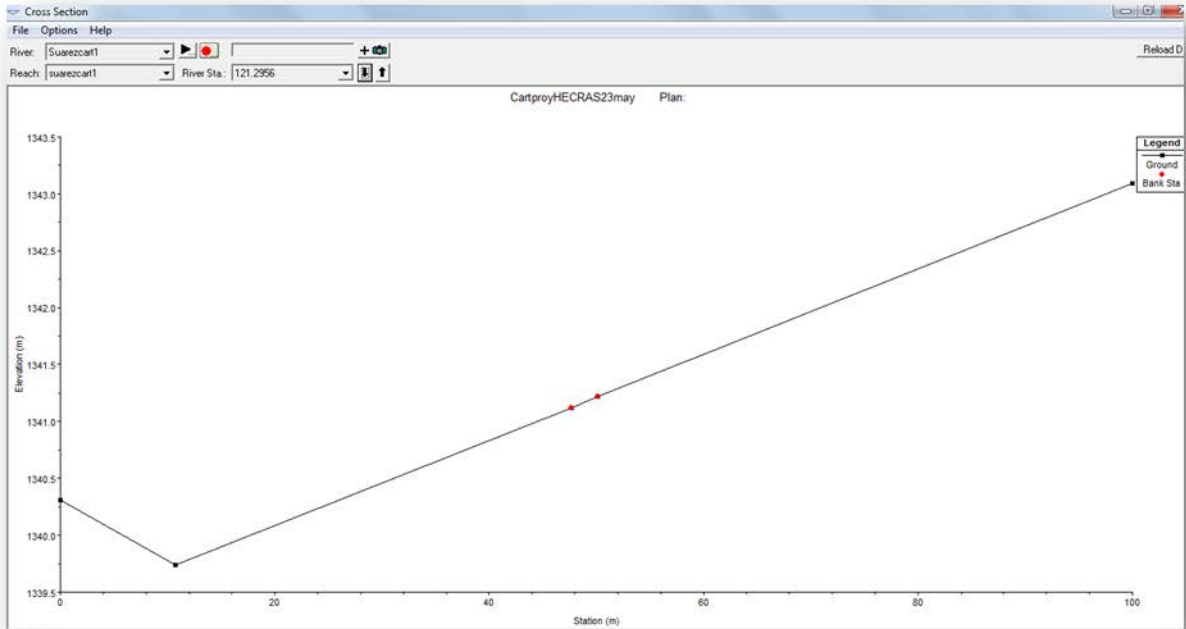
**Figura 41.** Fotografía aérea y secciones transversales sobre TIN Cartografía Nacional.

Mediante el programa ArcMap y la utilización de la herramienta Hec-GeoRAS fue posible importar el archivo generado de las secciones transversales del sitio en estudio al programa Hec Ras para realizar la modelación hidráulica del cauce de la Quebrada Suárez para un caudal de periodo de retorno de 50 años ( $60,6 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

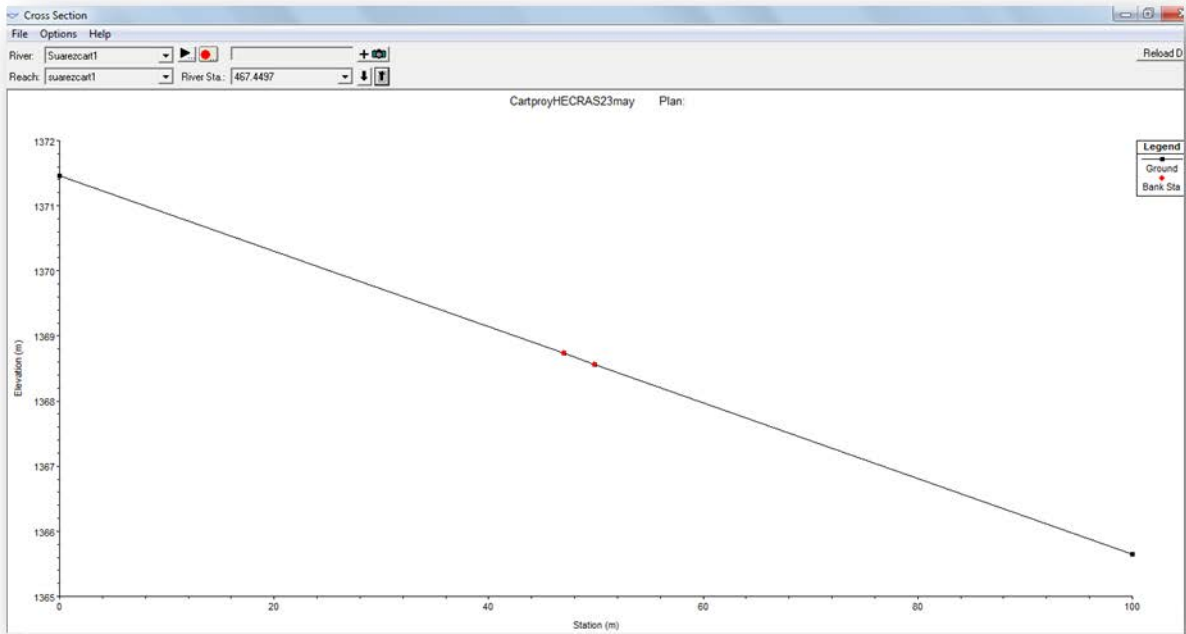
No fue posible la modelación mediante el programa Hec Ras por cuanto las secciones transversales obtenidas para la Quebrada Suárez no corresponden a una sección característica de un cauce; mismas visible en las siguientes figuras.



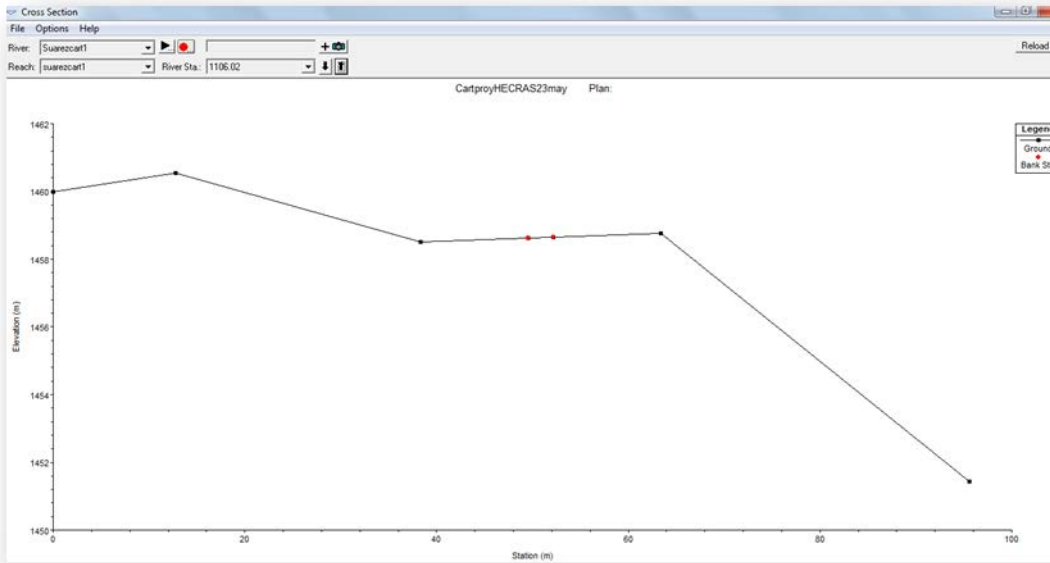
**Figura 42.** Sección transversal estación 0 según TIN Cartografía Nacional. Quebrada Suárez



**Figura 43.** Sección transversal estación 121,29 según TIN Cartografía Nacional. Quebrada Suárez



**Figura 44.** Sección transversal estación 467,44 según TIN Cartografía Nacional. Quebrada Suárez



**Figura 45.** Sección transversal estación 1106,02 según TIN Cartografía Nacional. Quebrada Suárez.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- Los datos LiDar contienen gran información que dificulta su procesamiento, lo cual se pudo evidenciar en el presente estudio ya que inicialmente la microcuenca en estudio contaría con un área de 17,90 km<sup>2</sup> sin embargo y por no contarse con instrumentos como computador personal con gran capacidad en disco duro y cuantiosa memoria de acceso aleatorio se dificulta el procesamiento de este tipo de tecnología para zonas de gran área territorial como la subcuenta inicialmente propuesta.
- La implementación de LiDar facilita el desarrollo de estudios hidrológicos para la determinación de caudales de diseño sin embargo para el análisis hidráulico de estructuras en el cauce es necesario contar con levantamientos topográficos de las secciones transversales del cauce; por cuanto las diferencias de secciones obtenidas en el presente estudio se consideran significativas al evidenciarse que la secciones levantadas en campo pueden trasegar mayor caudal que las secciones de LiDar.
- El caudal determinado mediante el modelo Hec Hms para el evento del Huracán Tomas fue de 19,9 m<sup>3</sup>/s, y no proporcionó las condiciones de inundación ocurridas en el evento según el histórico obtenido en campo mediante entrevistas realizadas a los pobladores; lo anterior podría atribuirse a que el evento ocurrido no fue exclusivo de agua en el cauce sino que incluyó materiales como troncos, arrastre de sedimentos ocasionados por deslizamientos en la zona provocando obstrucciones o fallos en los puentes y acumulación de materiales en la sección transversal, restándole capacidad hidráulica a la misma. Por lo que se realizó una modelación hidráulica donde se incluye una altura de sedimentación de 2 metros para la mayoría de secciones y 1 metro para las secciones

1053,577 y 1049,57; para lo cual se cumplen las condiciones evidenciadas en el evento en estudio.

- Se determinó que los efectos provocados por el nivel de agua del evento en estudio podrían ser ocasionados por un caudal de 60,6 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 50 años. Por lo que se generaron los Mapas de Amenaza Potencial de Inundación con el fin de identificar las zonas vulnerables a inundación así como el área que abarcaría un evento de inundación en la zona en estudio para un caudal de 60,6 m<sup>3</sup>/s.
- Para la realización de Mapas de Amenaza Potencial a Inundación la implementación de tecnología LiDar en conjunto con secciones levantadas topográficamente es adecuada por cuanto es posible la identificación de accidentes topográficos con gran precisión.
- Actualmente la Cartografía Nacional disponible no permite realizar modelos hidráulicos a pequeña escala para generar Mapas de Amenaza Potencial a Inundación en la toma de decisiones en instituciones como Municipios o la CNE.

## **5.2 Recomendaciones**

- Modelar el evento en estudio considerando más factores en el flujo obtenido de la modelación hidrológica como el arrastre de sedimentos, esto, con el fin de obtener un resultado más real a lo ocurrido.
- Realizar un modelo que contemple el contenido de humedad distribuido en el suelo para identificar la capacidad característica del mismo.
- Realizar modificaciones en los puentes que generan un cuello de botella (efecto embudo) en el cauce y generan problemas de inundación.

- Respetar zonas de protección según lo establecido en el artículo 33 de la Ley Forestal por cuanto se evidencia estructuras ubicadas en los márgenes del cauce en estudio.

## VI. BIBLIOGRAFIA

Villón, Máximo. *Hidrología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 2004.

FAO. Textura del Suelo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Ven Te Chow. 2004. "Hidráulica de Canales Abiertos". McGraw Hill. Santa Fe de Bogotá, Colombia.

C. Henríquez et G. Cabalceta. 1999. Guía Práctica Para el Estudio Introductorio de los Suelos con un Enfoque Agrícola. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica

Hernandez J.C. 1994: "Factores de control y dinámica del deslizamiento El Burío, Aserrí, San José, Costa Rica". Tesis. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica

Hernandez J.C. 1994: "Caracterización geológica-geotécnica del deslizamiento El Burío cantón de Aserrí" Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

*Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Ministerio de Medio Ambiente, Y Medio Rural Marino. Gobierno de España. 2011.

Hernández, J. 1994: Caracterización geológica-geotécnica del deslizamiento el Burío, Cantón de Aserrí. Inf. CNE. 9 págs., 2 mapa. (Informe inédito)

Leon, Arturo. 2013. Tutorial on using HEC-GeoRAS 10.1 whit ArcGis 10.1 and HEC RAS 4.1.0 for flood inundation mapping in steady and unsteady flow conditions. Universidad del Estado de Oregon. USA.



Monsalve, Germán. *Hidrología en la Ingeniería*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 2nd Edición, Santa Fe de Bogotá, Colombia. 1998.

Magdaleno, F; Martínez, R. 2006. Aplicaciones de la teledetección Laser (LIDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial. Ministerio de Ambiente, Madrid, España.

Villón, Máximo. *HEC-RAS Ejemplos*. Centro de Desarrollo de Material Bibliográfico. Cartago, Costa Rica. 2011.

Martínez, R; Merino, S; et al. 2009. Aplicaciones de la Teledetección Laser (LIDAR) en Hidrología Forestal y en la Gestión de Ecosistemas Fluviales. Área de Ingeniería Ambiental, CEDEX. Ministerio de Fomento, Madrid, España.

Monge, Gerardo; et al. *Deslizamientos Inundaciones Sismos*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. Litografía e Imprenta Universal. San José, Costa Rica. 2012.

Castro, Rubén. *Tecnología LiDar: Principios Fundamentales y Aplicaciones*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. 2011. PowerPoint.

Fernández, J; Willinton; S. 2010. *Procesamiento y accesibilidad de datos LiDAR a través de aplicaciones distribuidas*. Madrid. España. [Consulta: 23/06/2015]

Wallace, R. 2010. GIS for Water Resources 2050. Us Army Engineer Research and Development Center. Estados Unidos. Descargado mediante ascelibrary.org por Universidad de Costa Rica [Consulta: 27/02/2014]

Shatnawi, F; Goodall, J. 2010. Comparison of Flood Top Width Predictions Using Surveyed and LiDar-Derived Channel Geometries. Journal of Hydrologic Engineering ASCE. Descargado mediante ascelibrary.org por Universidad de Costa Rica. [Consulta: 27/02/2014]

Brotóns, M; Sarria, A; et al. 2010. Análisis y Validación de Modelos Digitales de Elevaciones Mediante Datos LiDar. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Tecnologías de la Información Geográfica. España. [Consulta: 02/03/2014]

Gil-Yepes, J; Ruiz, L; et al. 2011. Detección y localización de árboles en zonas forestales mediante datos LiDar e imágenes aéreas. Grupo de Cartografía Geoambiental y Teledetección. Universidad Politécnica de Valencia. España. [Consulta: 02/03/2014]

Wang, Y; Zheng, T. 2005. Comparison of Light Detection and Ranging and National Elevation Dataset Digital Elevation Model on Floodplains of North Carolina. Natural Hazards Review. ascelibrary.org por Universidad de Costa Rica. [Consulta: 27/02/2014]

Colby, J; Donson, J. 2010. Flood Modeling in the Coastal Plains and Mountains: Analysis of Terrain Resolution. Natural Hazards Review. ascelibrary.org por Universidad de Costa Rica. [Consulta: 27/02/2014]

Solano, Johnny; et al. *REGIONES Y SUBREGIONES CLIMATICAS DE COSTA RICA*. Gestión de Desarrollo. Instituto Meteorológico Nacional (IMN) [Documento en Línea]. 2000, San José, Costa Rica. <[http://www.imn.ac.cr/publicaciones/estudios/Reg\\_climaCR.pdf](http://www.imn.ac.cr/publicaciones/estudios/Reg_climaCR.pdf)> [Consulta: 27/01/2014]

*Evaluación demográfica del X Censo Nacional de Población de Costa Rica 2011 y de otras fuentes de información*, Centro Centroamericano de Población (CCP) Universidad de Costa Rica [Documento en Línea]. 2013, San José, Costa Rica. PDF.<<http://www.inec.go.cr/A/MT/Poblaci%C3%B3n%20y%20Demograf%C3%ADa/Poblaci%C3%B3n/Evaluaci%C3%B3n%20Censo%202011/Metodolog%C3%ADa/Evaluaci%C3%B3n%20censal%202011.pdf>> [Consulta: 28/08/2013]

Guía para la descripción de suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, [Documento en línea]. 2009, Roma. PDF <<http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>> [Consulta: 27/01/2014]

*PLAN NACIONAL PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO 2010-2015. Marco estratégico para la aplicación de la política de Gestión del Riesgo*, Departamento de Planificación, Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) [Documento en Línea]. 2010, San José, Costa Rica. PDF <[http://www.cne.go.cr/Documentos/planificacion/plan\\_nacional\\_para\\_gestion\\_riesgo\\_2010\\_2015.pdf](http://www.cne.go.cr/Documentos/planificacion/plan_nacional_para_gestion_riesgo_2010_2015.pdf)> [Consulta: 28/08/2013]

*Desarrollo de escenarios por inestabilidad a laderas para la implementación de restricciones, en el uso de la tierra en las áreas de influencia del deslizamiento de El Burío, Aserrí, San José*, Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) [Documento en Línea]. 2015, San José, Costa Rica. PDF < <http://www.cne.go.cr/Documentos/Deslizamiento%20El%20Burio%20-%20Aserri,%20San%20Jose.pdf>> [Consulta: 23/6/2015]

*INUNDACIONES FLUVIALES. MAPAS DE AMENAZAS RECOMENDACIONES TECNICAS PARA SU ELABORACION. Proyecto Met-Alarm Ineter/Cosude. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.* [Documento en Línea]. 2005, Managua, Nicaragua. PDF < <http://web-geofisica.ineter.gob.ni/proyectos/metalarm/inundaciones.pdf>> [Consulta: 26/01/2014]

*SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA.* Instituto Nacional de Biodiversidad. San José, Costa Rica. <[http://www.inbio.ac.cr/es/inbio/inb\\_sig.htm](http://www.inbio.ac.cr/es/inbio/inb_sig.htm)> [Consulta: 28/09/2013]

*SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICOS (SIG).* Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <<http://www.eclac.cl/cgi->

[bin/getprod.asp?xml=/esalc/noticias/paginas/1/12741/P12741.xml&xsl=/esalc/tpl/p18f.xsl&base=/esalc/tpl/top-bottom.xsl](http://www.eclac.cl/cgi-bin/getprod.asp?xml=/esalc/noticias/paginas/1/12741/P12741.xml&xsl=/esalc/tpl/p18f.xsl&base=/esalc/tpl/top-bottom.xsl)> [Consulta: 28/09/2013]

MAP SERVICE CENTER. Federal Emergency Management Agency. US. <<http://www.eclac.cl/cgi-bin/getprod.asp?xml=/esalc/noticias/paginas/1/12741/P12741.xml&xsl=/esalc/tpl/p18f.xsl&base=/esalc/tpl/top-bottom.xsl>> [Consulta: 28/09/2013]

*HISTORICO DE DESASTRES EN COSTA RICA (FEBRERO 1723-SETIEMBRE 2012)*. Dirección de Gestión en Desastres, Departamento de Prevención y Mitigación, Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) [Documento en Línea]. 2012, San José, Costa Rica. PDF <<http://www.bvs.sa.cr/ambiente/4923.pdf>> [Consulta: 21/01/2014]

COSTA RICA- DISASTER STATISTICS. PreventionWeb, The United Nations Office for Disaster Risk Reduction. <[http://www.preventionweb.net/english/countries/statistics/?cid=41&utm\\_source=pw\\_search&utm\\_medium=search&utm\\_campaign=search](http://www.preventionweb.net/english/countries/statistics/?cid=41&utm_source=pw_search&utm_medium=search&utm_campaign=search)>[Consulta: 22/01/2014]

¿QUE SON DATOS LIDAR?. ArcGis Resources. Esri. <<http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//015w00000041000000>>[Consulta: 22/01/2014]

MAPAS DE AMENAZAS. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) [Documento en Línea]. 2012, San José, Costa Rica. <<http://www.cne.go.cr/index.php/prevencie-desastres-menuprincipal-93/mapas-de-amenazas>> [Consulta: 22/01/2014]

INGENIERIA DE SISTEMAS SAMHI. Centro de Estudios Hidrográficos, Ministerio de Fomento. Gobierno de España [Documento en Línea]. <<http://hercules.cedex.es/IngSis/samhi.htm>> [Consulta: 23/01/2014]

*MODEO IBER.* Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Ministerio de Fomento. Gobierno de España [Documento en Línea]. <  
<http://iberaula.es/modelo-iber/modelo>> [Consulta: 23/01/2014]

*HEC-GEORAS.* Hydrologic Engineering Center. US Army Corps of Engineers. Estados Unidos. [Documento en Línea]. <  
<http://www.hec.usace.army.mil/contact/>> [Consulta: 23/01/2014]

*FLO-2D.* FLO-2D Software Inc. Estados Unidos [Documento en Línea]. <  
<http://www.flo-2d.com/about-us/>> [Consulta: 23/01/2014]

*LEY NACIONAL DE EMERGENCIAS Y PREVENCIÓN DEL RIESGO N° 8488.* Asamblea Legislativa, Costa Rica. [Documento en línea] <  
[http://www.pgr.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_repartidor.asp?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=56178&nValor3=84696&strTipM=TC](http://www.pgr.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_repartidor.asp?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=56178&nValor3=84696&strTipM=TC)> [Consulta: 25/01/2014].

## **ANEXOS**

**Tabla 29.** Clave para las clases texturales del suelo.

			- % arcilla	
1	No es posible enrollar y formar un cordón cilindro o chorizo de un diámetro cercano a 7mm (como el diámetro de un lápiz)			
1.1	no ensucia, no es harinoso, no deja material fino en los dedos:	arena	A	< 5
	• Si el tamaño de granos es mixto:	arena no clasificada	AN	< 5
	• Si la mayoría de granos son muy gruesos (> 0,6 mm):	arena muy gruesa y gruesa	AG	< 5
	• Si la mayoría de granos son de tamaño medio (0,2-0,6 mm):	arena media	AM	< 5
	• Si la mayoría de granos son de tamaño fino (< 0,2 mm) pero aún granuloso:	arena fina	AFi	< 5
	• Si la mayoría de granos son de tamaño muy fino (< 0,12 mm), tendiendo a ser harinoso:	arena muy fina	AMF	< 5
1.2	no es harinoso, granuloso, material escasamente fino entre los dedos, débilmente moldeable, ligeramente adhesivo a los dedos:	areno francoso	AF	< 12
1.3	Similar a 1,2 pero moderadamente harinoso:	franco arenoso	FA (pobre en arcilla)	< 10
2	Es posible enrollar y formar un cordón cilindro o chorizo de un diámetro de 3-7 mm (cerca a la mitad del diámetro de un lápiz) pero se rompe cuando se trata de formar el cordón cilindro de 2-3 cm de diámetro, moderadamente cohesivo, se adhiere a los dedos			
2.1	Muy harinoso y no cohesivo			
	• Se sienten algunos granos:	franco limoso	FL (pobre en arcilla)	< 10
	• No se sienten granos:	limoso	L	< 12
2.2	Moderadamente cohesivo, se adhiere a los dedos, tiene una superficie áspera y desmenuzada luego de apretarla entre los dedos y			
	• Muy granuloso y no pegajoso:	franco arenoso	FA (rico en arcilla)	10-25
	• Granos moderadamente arenosos:	franco	F	8-27
	• No granuloso pero distintamente harinoso y algo pegajoso:	franco limoso	FL (rico en arcilla)	10-27
2.3	De superficie áspera y moderadamente brillante luego de apretarlo entre los dedos, es pegajoso y granuloso a muy granuloso:	franco arcillo arenoso	FYA	20-35
3	Es posible enrollar y formar un cordón chorizo de más o menos 3 mm de diámetro (menos de la mitad del diámetro de un lápiz) y formar un aro de 2-3 cm en diámetro, cohesivo, pegajoso, rechinamiento entre los dientes, tiene una superficie moderadamente brillante luego de apretarlo entre los dedos.			
3.1	muy granuloso:	arcillo arenoso	YA	35-55
3.2	Se ve y se sienten algunos granos, rechinamiento entre los dientes			
	• Moderadamente plástico, superficie moderadamente brillante:	franco arcilloso	FY	25-40
	• Alta plasticidad, superficie brillante:	arcilloso	Y	40-60
3.3	No hay granos visibles, ni se sienten, no hay rechinamiento entre los dientes			
	• Plasticidad baja:	franco arcillo limoso	FYL	25-40
	• Plasticidad alta, superficie moderadamente brillante:	arcillo limoso	YL	40-60
	• Plasticidad alta, superficie brillante:	arcilla pesada	YP	> 60

Nota: La determinación de la textura en campo puede depender de la composición mineralógica de las arcillas. La clave anterior funciona especialmente para suelos que tienen en su composición illita, clorita y/o vermiculita. Las arcillas esmécticas son más plásticas, y las arcillas caolinitas son más pegajosas. Así, el contenido de arcilla puede ser sobrestimado para la primera y subestimado para la segunda. Fuente: Adaptado de Schlichting, Blume y Stahr (1995).

**Tabla 30.** Precipitación de la tormenta (Huracán Tomás) para el evento ocurrido el de 0:00 am del 01/11/2010 a 00:00 am del 05/11/2010 cada 5 minutos.

Visible en CD adjunto.

**Tabla 31.** Precipitación de la tormenta de 24 horas para el evento ocurrido el de 3:10 am del 03/11/2010 a 03:10 am del 04/11/2010 (Huracán Tomas) cada 5 minutos.

Visible en CD adjunto.



**Tabla 32.** Precipitación diaria máxima anual (PDMáx) en mm, obtenida en la estación 84116-Salitrillos de Aserri en el periodo 1991 al 2013.

<b>Año</b>	<b>PDMáx (mm)</b>
1991	57.6
1992	69.2
1993	88.4
1994	71.1
1995	145
1996	84.2
1997	81
1998	86
1999	80.6
2000	71.7
2001	59.9
2002	69.6
2003	77.9
2004	81.8
2005	61
2006	72.4
2007	96.5
2008	107.7
2009	68.3
2010	110.74
2011	90.2
2012	61.7
2013	56.4

Fuente: ICE, 84116 Salitrillos-Aserri

**Tabla 33.** Hietograma para T= 2, 10, 20, 25, 50 y 100 años.

Visible en CD adjunto.

**Tabla 34.** Clasificación Hidrológica de los suelos.

<b>Grupo de suelos</b>	<b>Descripción</b>
A	Son suelos que tienen altas tasas de infiltración (bajo potencial de escurrimiento) aunque están enteramente mojados y constituidos mayormente por arenas o gravas profundas, bien y hasta excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.
B	Son suelos que tienen tasas de infiltración moderadas cuando están cuidadosamente mojados y están constituidos mayormente por suelos profundos de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión del agua.
C	Son suelos que tienen bajas tasas de infiltración cuando están completamente mojados y están constituidos mayormente por suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo, o suelos con una textura que va de moderadamente fina a fina. Estos suelos tienen una baja tasa de transmisión del agua.
D	Son suelos de alto potencial de escurrimiento, de tasas de infiltración muy bajas cuando están completamente mojados y están formados mayormente por suelos arcillosos con un alto potencial de esponjamiento, suelos con índice de agua permanentemente alto, suelos con arcilla o capa de arcilla en la superficie o cerca de ella y suelos superficiales sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa muy baja de transmisión del agua.

Fuente: Villón, 2004.

**Tabla 35.** Numero de curva para diferentes tipos de cobertura y condición de humedad antecedente II.

Cobertura			Número de Curva			
Uso de la tierra	Tratamiento o práctica	Condición Hidrológica	A	B	C	D
Descuidado, en descanso, sin cultivos	Surcos Rectos	----	77	86	91	94
Cultivos	Surcos Rectos	Pobre	72	81	88	91
	Surcos Rectos	Buena	67	78	85	89
	Curvas de Nivel	Pobre	70	79	84	88
	Curvas de Nivel	Buena	65	75	82	86
	Curvas de nivel y en terrazas	Pobre	66	74	80	82
	Curvas de nivel y en terrazas	Buena	62	71	78	81
Pequeños granos	Surcos Rectos	Pobre	65	76	84	88
	Surcos Rectos	Buena	63	75	83	87
	Curvas de Nivel	Pobre	63	74	82	85
	Curvas de Nivel	Buena	61	73	81	84
	Curvas de nivel y en terrazas	Pobre	61	72	79	82
	Curvas de nivel y en terrazas	Buena	59	70	78	81
Sembríos cerrados, legumbres o sembríos en rotación	Surcos Rectos	Pobre	66	77	85	89
	Surcos Rectos	Buena	58	72	81	85
	Curvas de Nivel	Pobre	64	75	83	85
	Curvas de Nivel	Buena	55	69	78	83
	Curvas de nivel y en terrazas	Pobre	63	73	80	83
	Curvas de nivel y en terrazas	Buena	51	67	76	80
Pastizales o similares		pobre	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	Curvas de Nivel	pobre	47	67	81	88
	Curvas de Nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas de Nivel	Buena	6	35	70	79
Pradera		Buena	30	58	71	78
Bosques		pobre	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Patios		----	59	74	82	86
Caminos, incluyendo derecho de vía	Cieno	----	72	82	87	89
	Superficie firme	----	74	84	90	92

Fuente: Villón, 2004

**Tabla 36.** Coeficiente de rugosidad de Manning para flujo laminar

<b>Tipo de superficie</b>	<b>n</b>	<b>Tipo de superficie</b>	<b>n</b>
Superficies lisas (hormigón, asfalto, grava, suelo descubierto)	0,011	Zonas áridas de pastos para ganado extensivo	0,13
Suelos cultivados		Pastos	
Con $\leq 20\%$ residuos superficiales	0,06	Pradera de pastos cortos	0,15
Con $>20\%$ residuos superficiales	0,17	Pastos densos	0,24
Bosques <sup>c</sup>		Bermudagrass	0,41
Maleza no densa	0,40	Barbecho (sin residuos)	0,05
Maleza densa	0,80		
Planicies de inundación		Canales naturales	
Pastos	0,035	Limpios y rectos	0,030
Cultivos	0,040	Limpios y curvilíneos	0,040
Hierbas y pequeños matorrales	0,050	Curvilíneos con hierbas y charcos	0,050
Matorrales densos	0,070	Con matorrales y arboles	0,100
Hormigón	0,012	Arboles densos	0,100
Fondo de grava y paredes de			
Hormigón	0,020		
piedra	0,023		

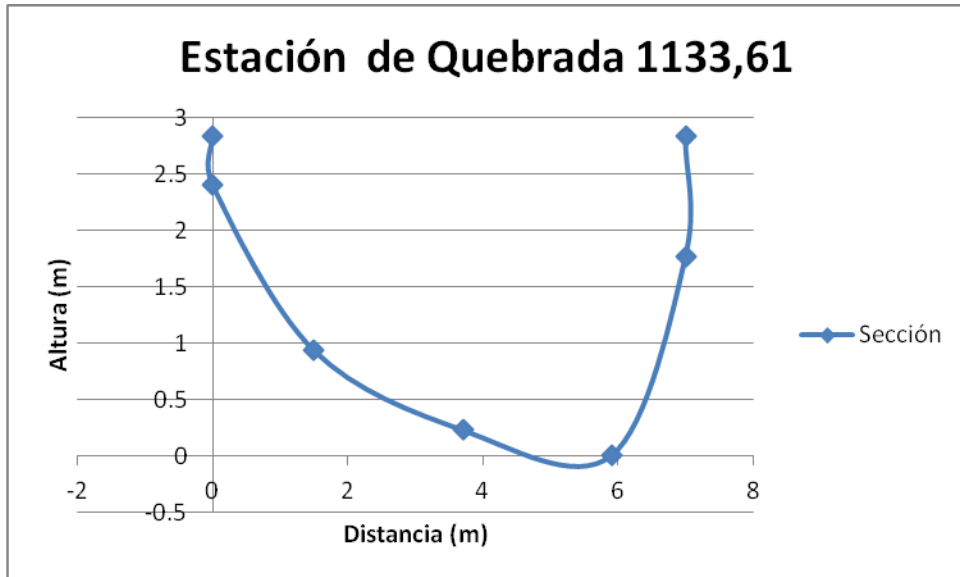
c. Se considera una altura de la cubierta vegetal de hasta 3 cm, ya que es la parte de esta que afecta el flujo laminar.

Fuente: Muñoz y Ritter, 2005

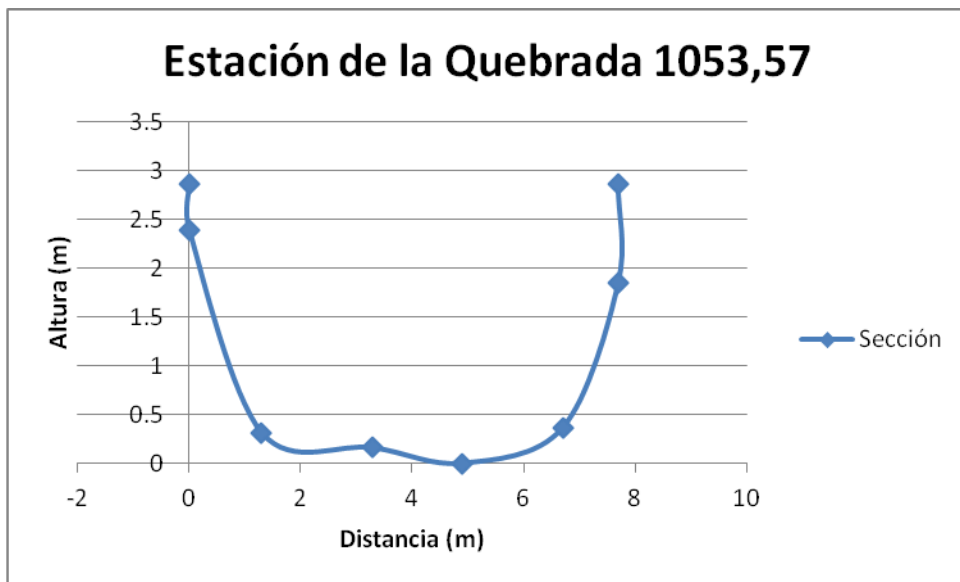
**Tabla 37.** Valores del coeficiente de rugosidad n.

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<b>C. Excavado o dragado</b>			
<b>a. En tierra, recto y uniforme</b>			
1. Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de exposición a la intemperie	0.018	<b>0.022</b>	0.025
3. Con gravas, sección uniforme, limpio	0.022	0.025	0.030
4. Con pastos cortos, algunas malezas	0.022	0.027	0.033
<b>b. En tierra, serpenteante y lento</b>			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pastos, algunas malezas	0.025	0.030	0.033
3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Fondo en tierra con lados en piedra	0.028	0.030	0.035
5. Fondo pedregoso y bancas con malezas	0.025	0.035	0.040
6. Fondo en cantos rodados y lados limpios	0.030	0.040	0.050
<b>c. Excavado con pala o dragado</b>			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Matorrales ligeros en las bancas	0.035	0.050	0.060
<b>d. Cortes en roca</b>			
1. Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2. Afilados e irregulares	0.035	0.040	0.050
<b>e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar</b>			
1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120
2. Fondo limpio, matorrales en los lados	0.040	0.050	0.080
3. Igual, nivel máximo de flujo	0.045	0.070	0.110
4. Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140
<b>D. Corrientes naturales</b>			
<b>D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente &lt; 100 pies)</b>			
<b>a. Corrientes en planicies</b>			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	<b>0.030</b>	0.033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150

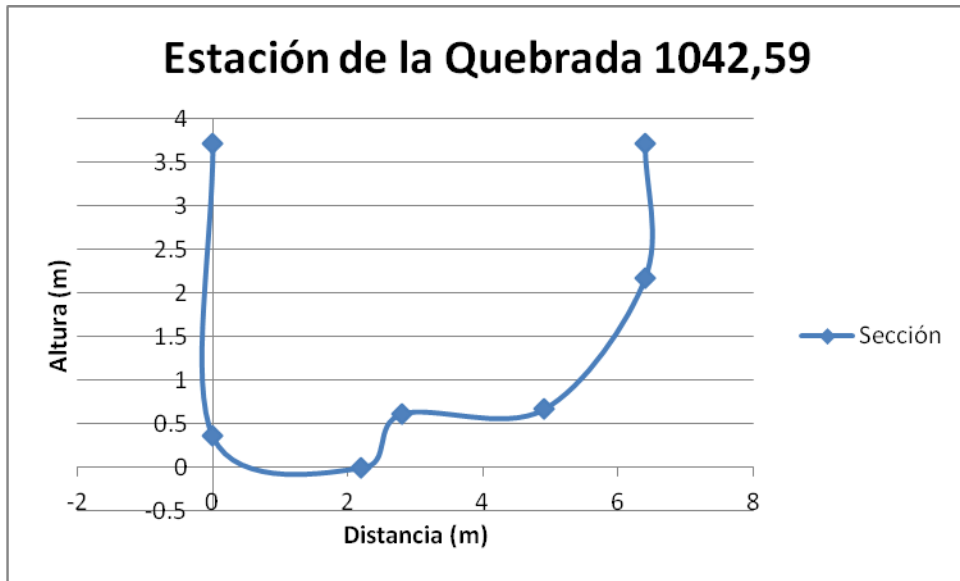
Fuente: Ven Te Chow, 2004



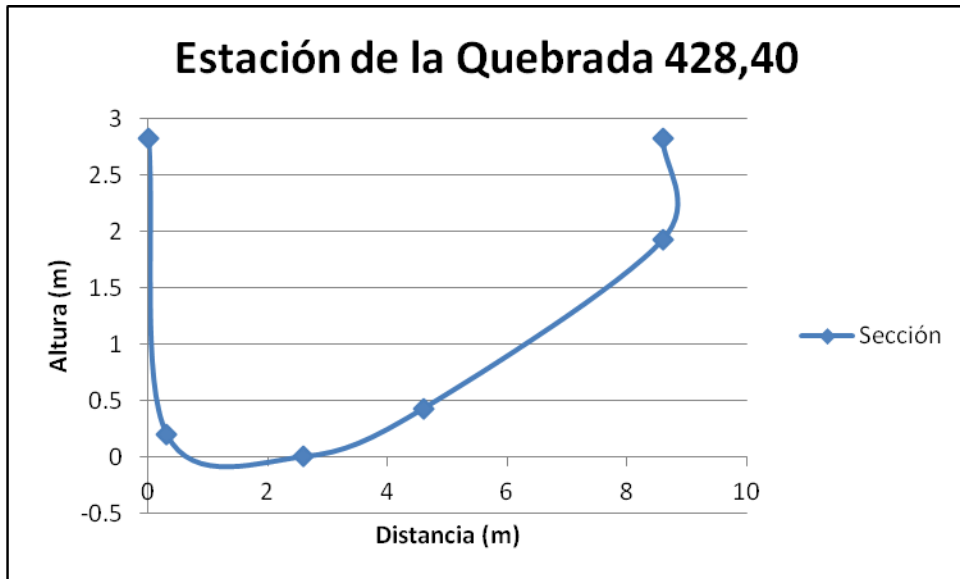
**Figura 46.** Sección transversal de la Quebrada Suarez obtenida en campo.



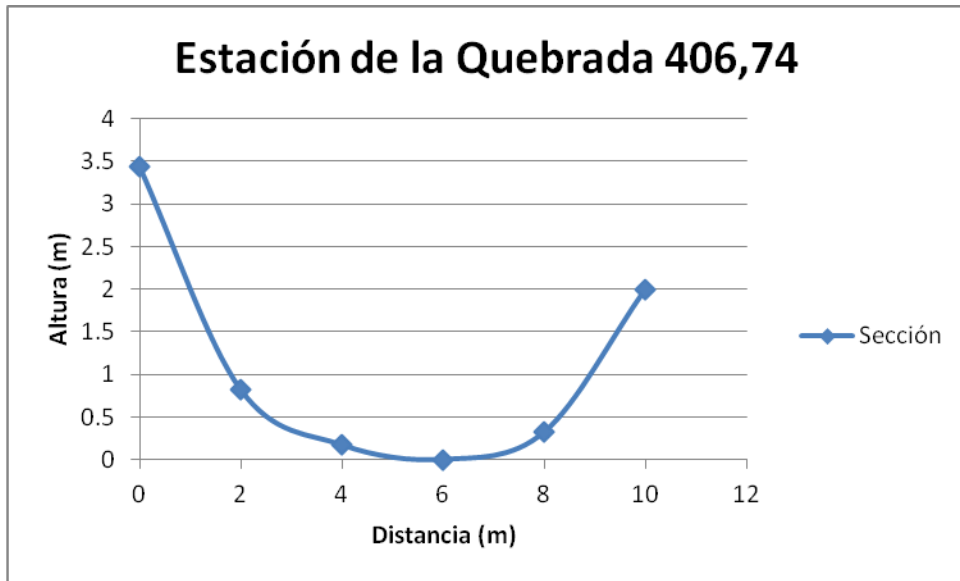
**Figura 47.** Sección transversal de la Quebrada Suarez obtenida en campo.



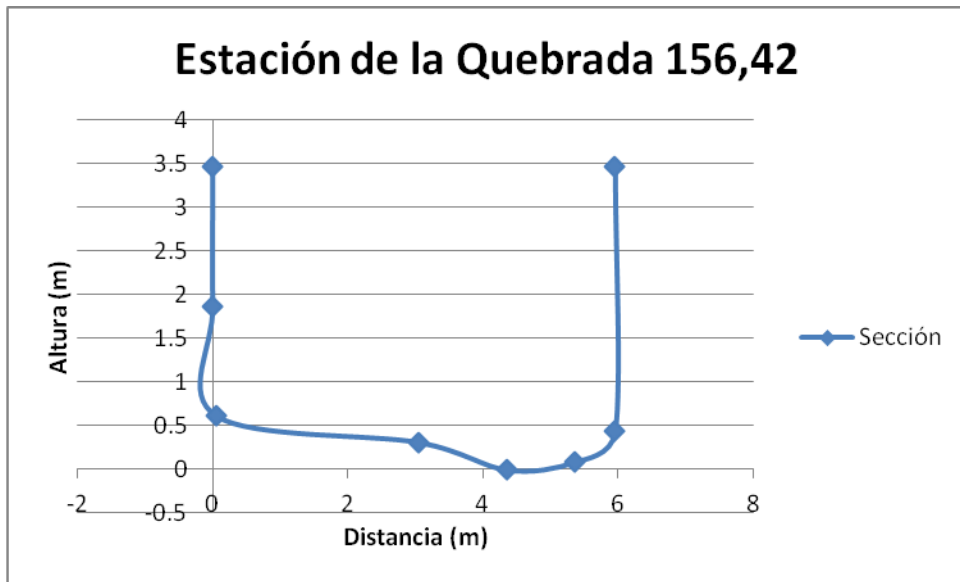
**Figura 48.** Sección transversal de la Quebrada Suarez obtenida en campo.



**Figura 49.** Sección transversal de la Quebrada Suarez obtenida en campo.

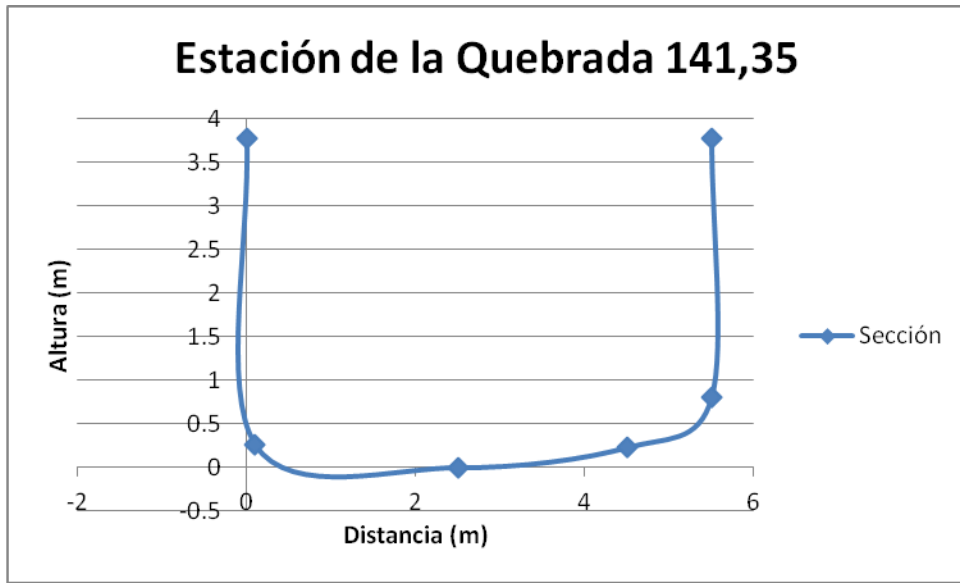


**Figura 50.** Sección transversal de la Quebrada Suarez obtenida en campo.

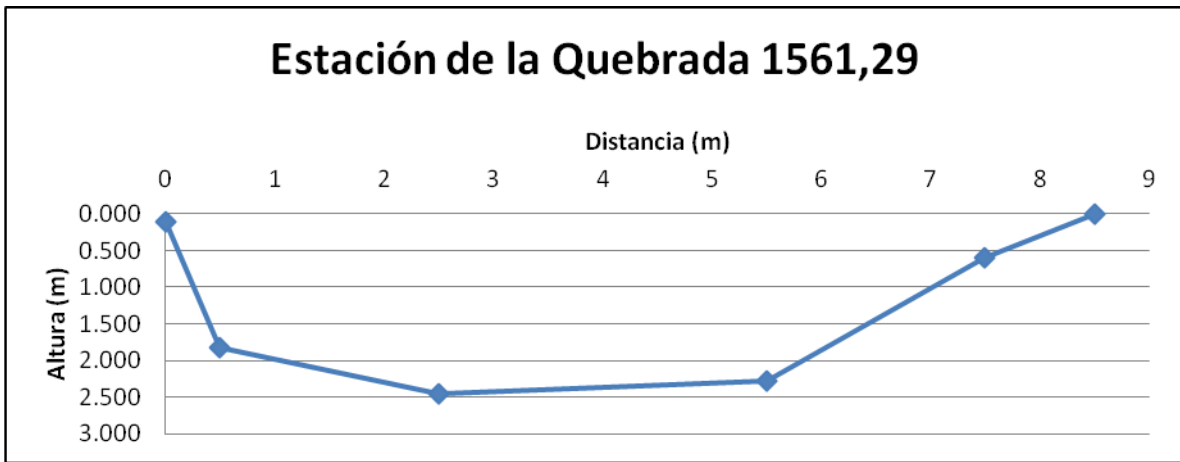


**Figura 51.** Sección transversal de la Quebrada Suarez obtenida en campo.

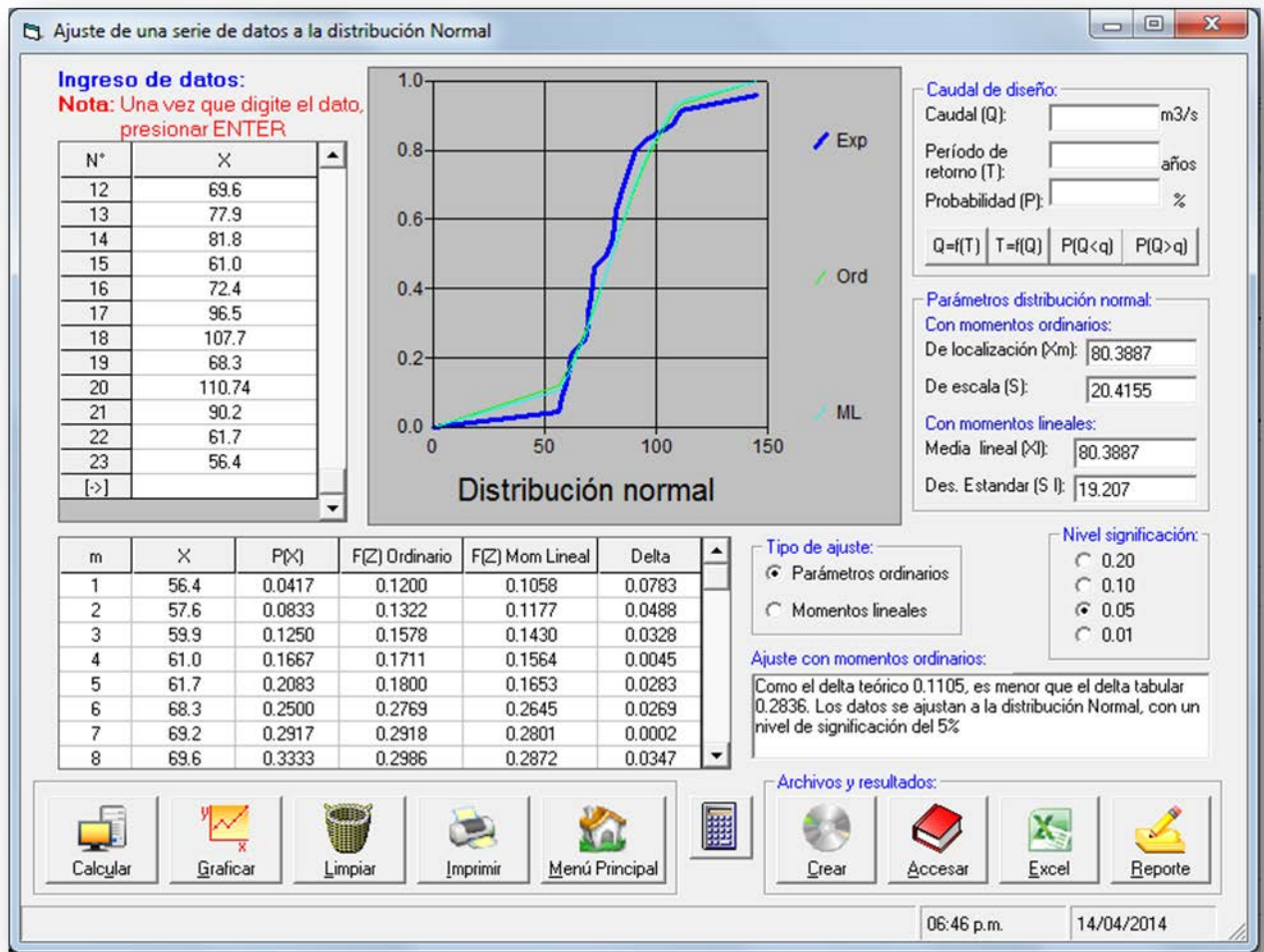




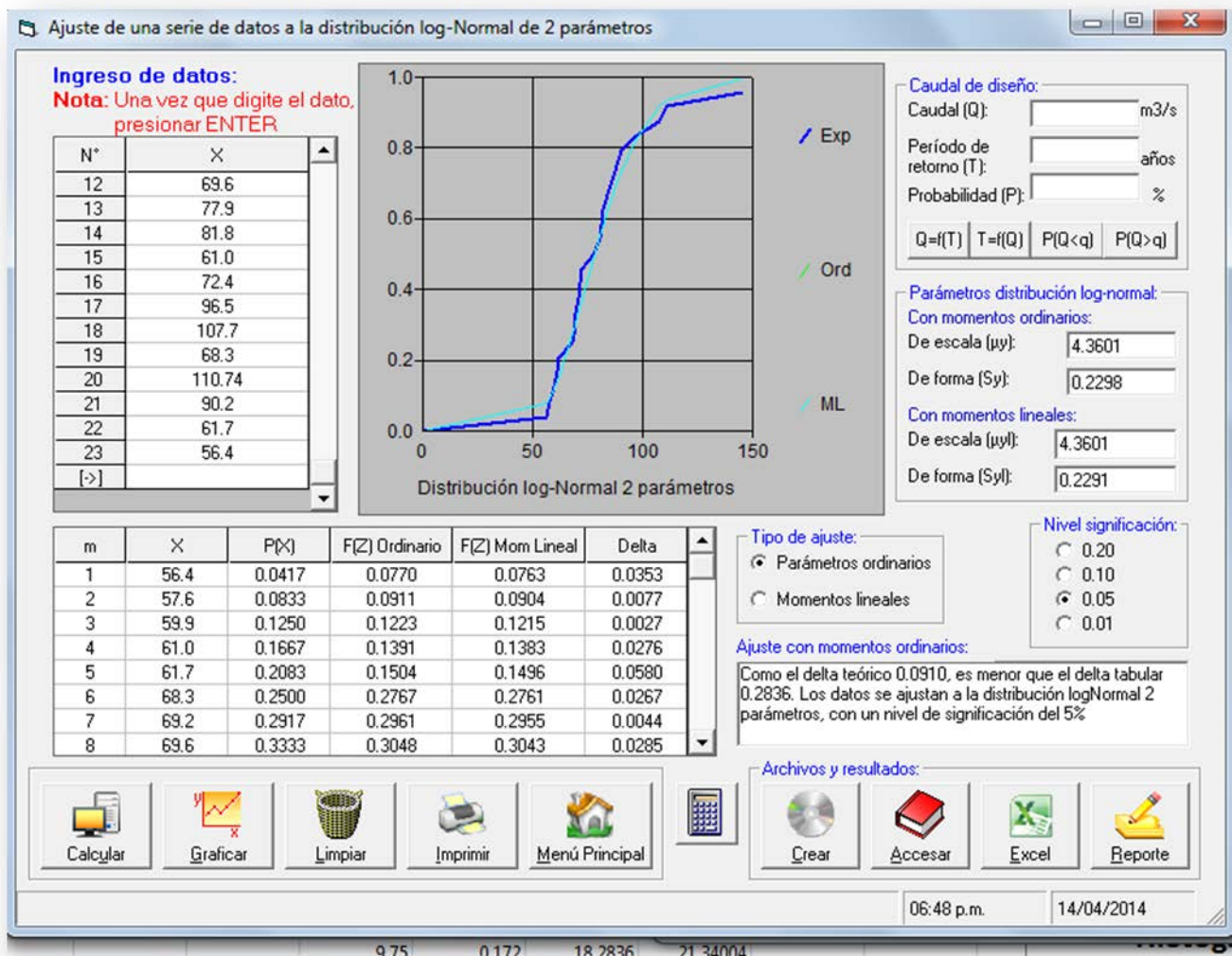
**Figura 52.** Sección transversal de la Quebrada Suarez obtenida en campo.



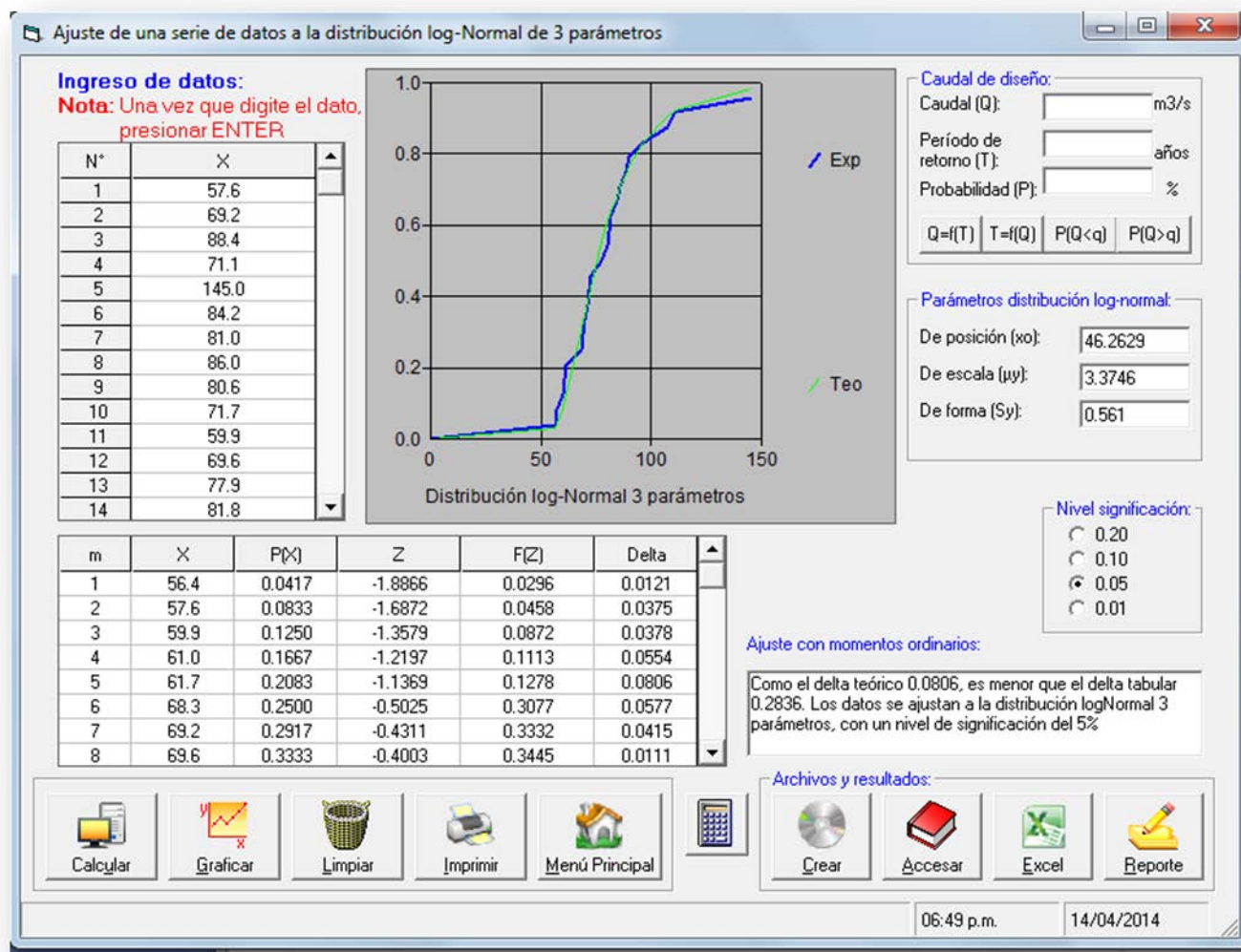
**Figura 53.** Sección transversal de la Quebrada Suarez obtenida en campo.  
Fuente: Estudiantes Hidrología UCR 2014.



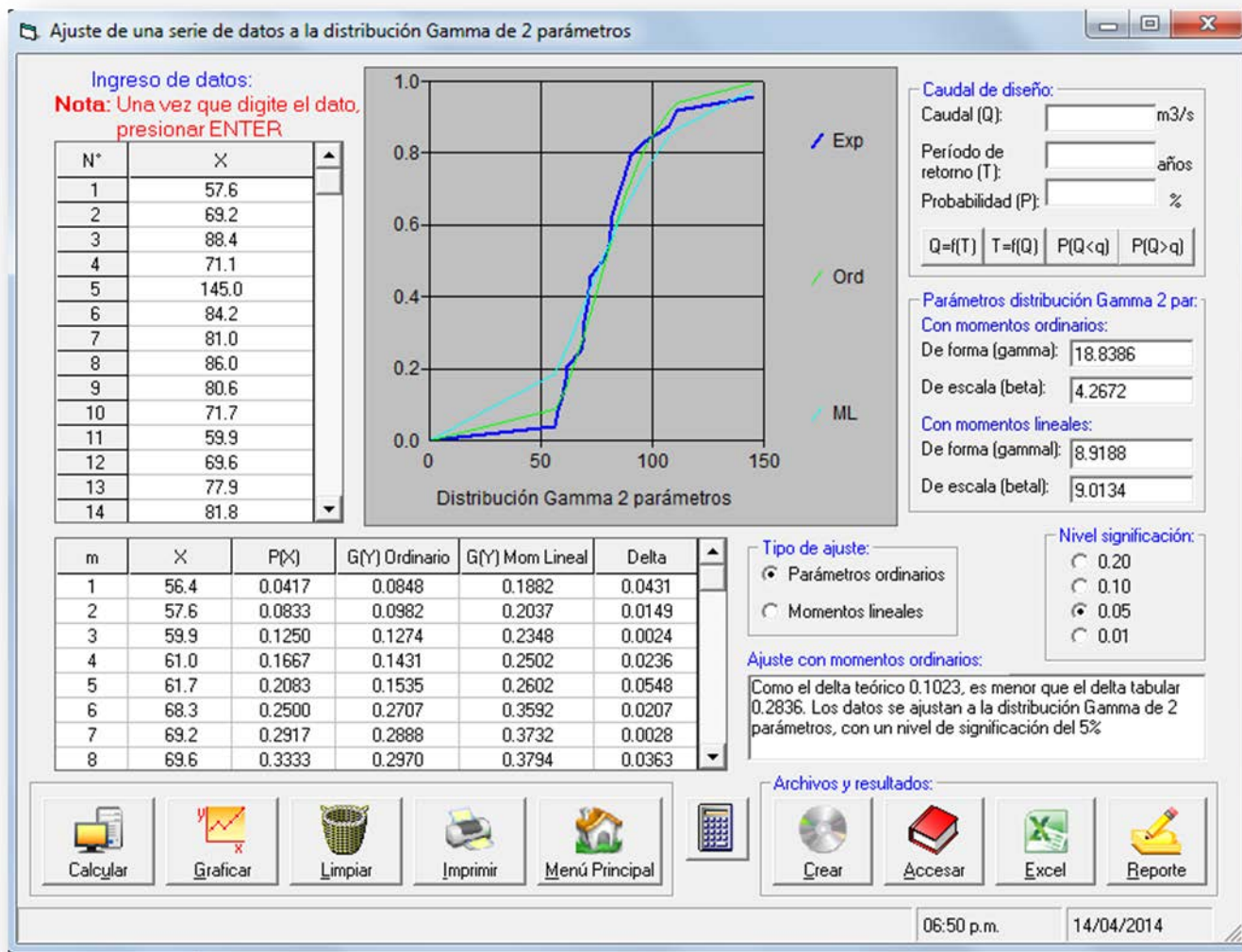
**Figura 54.** Distribución Normal de Precipitación diaria máxima anual (PDMáx) 1991 al 2013.



**Figura 55.** Distribución log-Normal de 2 parámetros de Precipitación diaria máxima anual (PDMáx) 1991 al 2013.

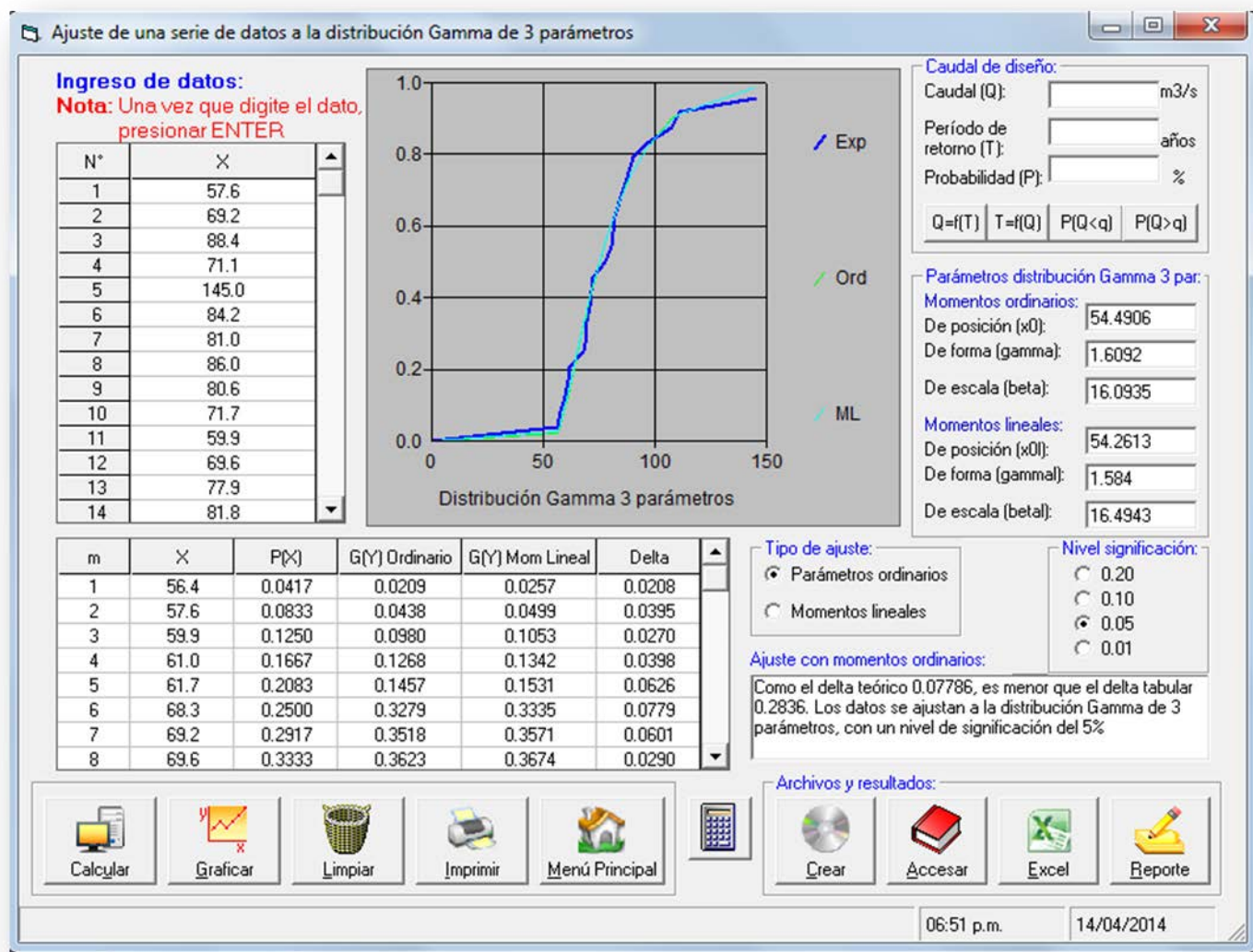


**Figura 56.** Distribución log-Normal de 3 parámetros de Precipitación diaria máxima anual (PDMáx) 1991 al 2013.

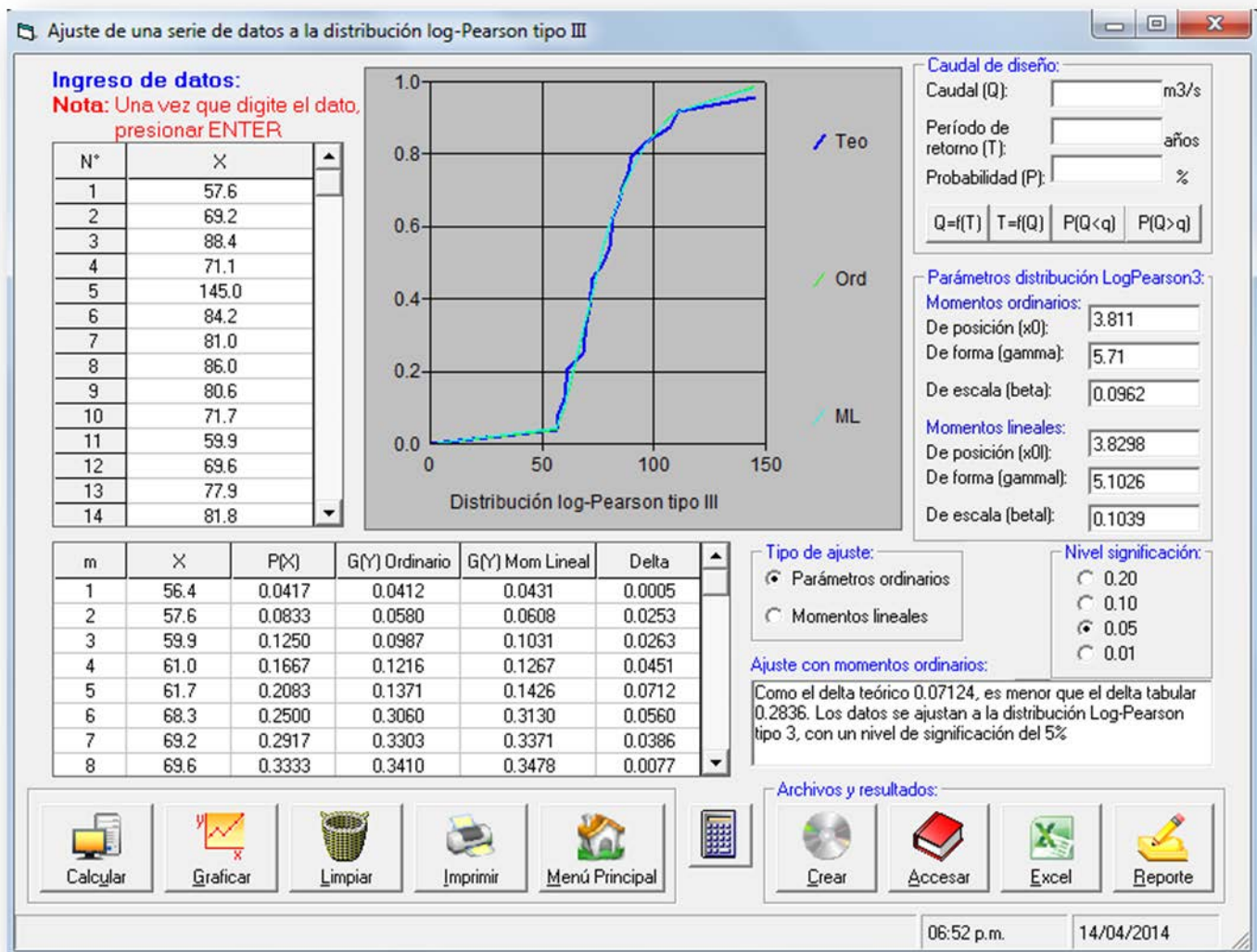


**Figura 57.** Distribución Gamma de 2 parámetros de Precipitación diaria máxima anual (PDMáx) 1991 al 2013.

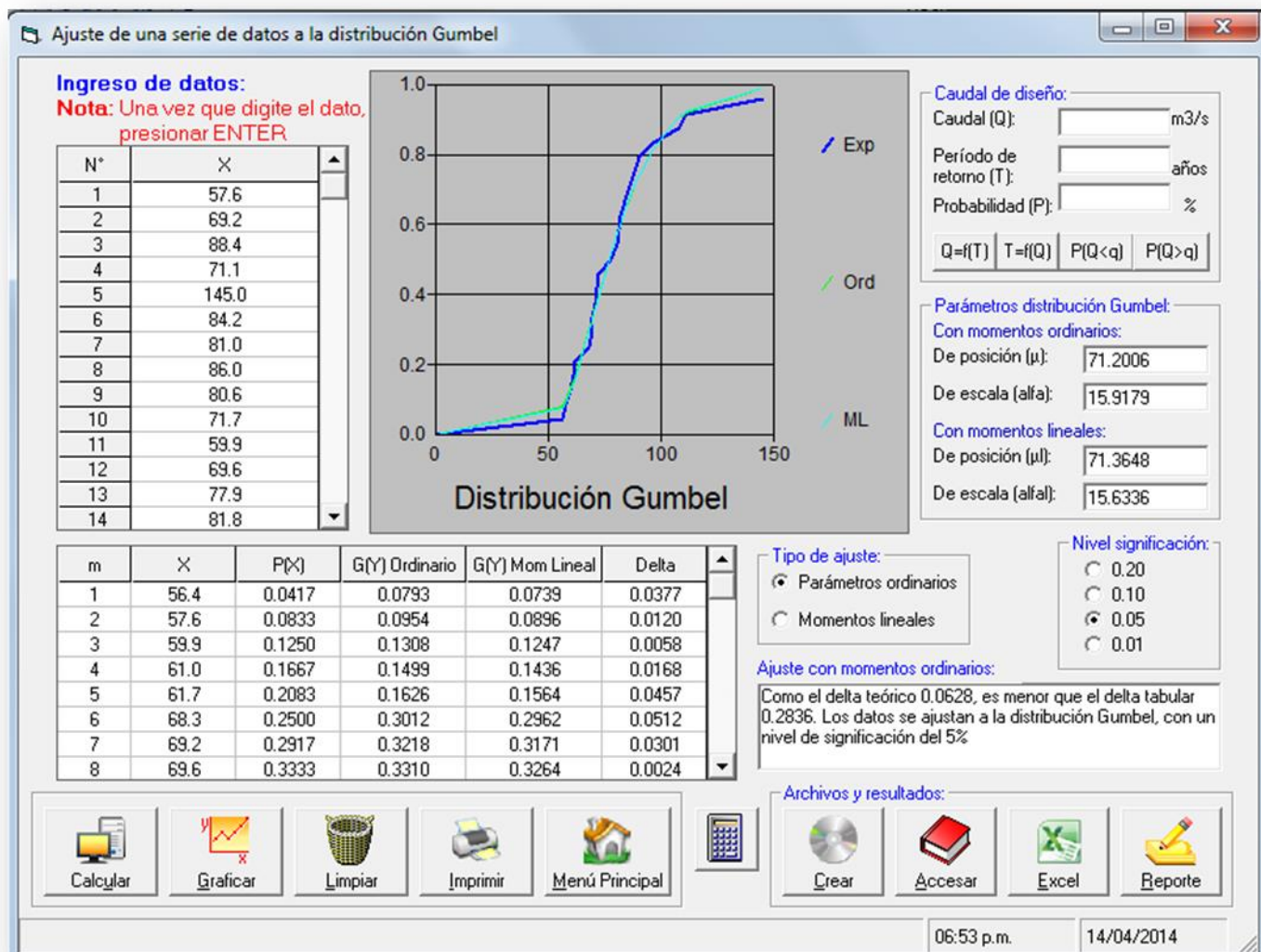




**Figura 58.** Distribución Gamma de 3 parámetros de Precipitación diaria máxima anual (PDMáx) 1991 al 2013.



**Figura 59.** Distribución log-Pearson tipo III de Precipitación diaria máxima anual (PDMáx) 1991 al 2013.



**Figura 60.** Distribución Gumbel de Precipitación diaria máxima anual (PDMáx) 1991 al 2013.





**Figura 61.** Cauce de la Quebrada Suárez Estación 1042,59



**Figura 62.** Puente sobre la Quebrada Suárez Estación 1133,61.

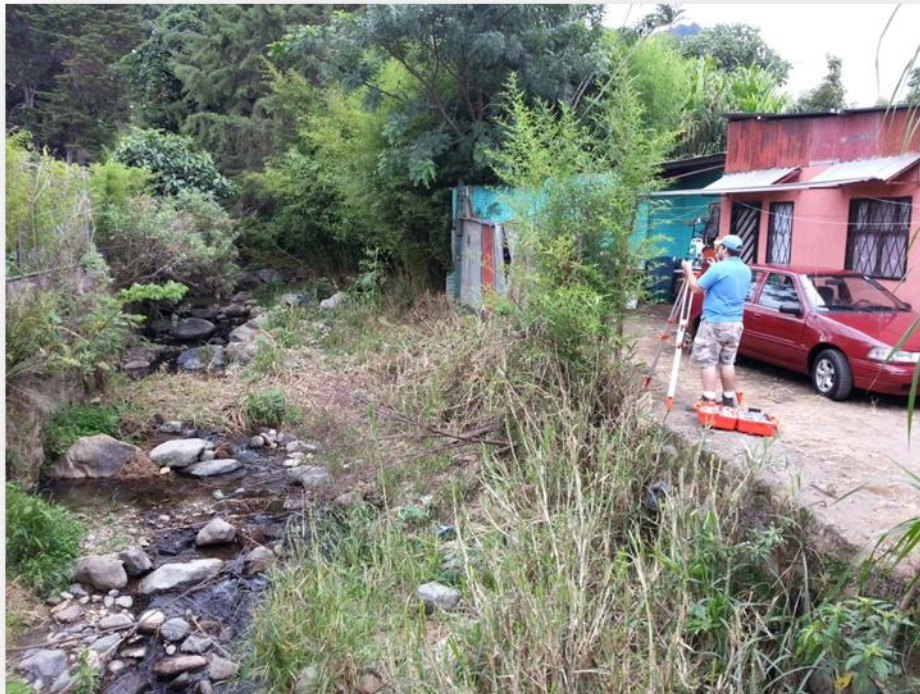


**Figura 63.** Cauce de la Quebrada Suárez Estación 406,74.





**Figura 64.** Puente sobre la Quebrada Suárez Estación 406,74.



**Figura 65.** Cauce de la Quebrada Suárez Estación 156,42.



**Figura 66.** Puente sobre la Quebrada Suárez Estación 141,35.



**Figura 67.** Cauce de la Quebrada Suárez. Estación 1561,29. Fuente: Estudiantes Hidrología UCR 2014.