APLICACIÓN DEL MODELO HEC-RAS PARA EL CALCULO DE LOS PERFILES HIDRAULICOS DEL SISTEMA HIDRICO DEL RIO CHAGUANA

Christian Javier Vivas González[1], David Matamoros Campusano[2]

[1]Ingeniero Civil 2004
[2]Director de Tesis, Ingeniero Civil, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1987, Maestría EEUU, Universidad New Orleans, 1993, Profeso de ESPOL desde 1995.

RESUMEN

El presente informe es un extracto de la trabajo de tesis de grado "Análisis del Modelaje Hidráulico del Sistema Hídrico del Río Chaguana, mediante el uso del Hec-Ras", de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. El sistema hídrico está compuesto por dos ríos: el Zapote y el Chaguana. El Modelaje Hidráulico consiste en el cálculo de los "Perfiles Hidráulicos" de cada uno de los tramos de los ríos analizados, a partir de datos obtenidos en campo. El Modelo también permitirá obtener los parámetros hidráulicos característicos de estos ríos.
Se presentan Datos Primarios de la cuenca hidrográfica, así como Datos Secundarios de cada uno de los ríos analizados, los mismos que fueron obtenidos a partir de Campañas de Muestreo.
Finalmente se realiza una introducción a los procedimientos de cálculo que efectúa el modelo, para poder realizar el modelaje de los ríos Zapote y Chaguana.

INTRODUCCION

En la actualidad existe un claro reconocimiento de la necesidad de desarrollar más ampliamente las capacidades técnicas en la determinación de las áreas más propensas a sufrir algún tipo de fenómeno hidrológico (inundaciones, sequías, etc.), desarrollando sistemas de predicción y advertencia, mediante la recopilación y análisis de la información hidrometeorológica existente. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos posee varios programas de computación para la administración de recursos de agua. Estos programas están siendo aplicados ampliamente a nivel internacional.
El Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros (Hydrologic Engineering Center, HEC) ha desarrollado varios programas hidráulicos de computación. Quizás el más conocido es el programa HEC-2, actualmente reemplazado por el HEC-RAS, el cual es utilizado para calcular los perfiles hidráulicos en canales.

Con la intención de aplicar el modelo HEC-RAS, para generar un modelaje del comportamiento de los Perfiles Hidráulicos de un río, y con el apoyo logístico del Proyecto 4 del Programa VLIR-ESPOL, se realizaron campañas de muestreo en diversos puntos de los ríos principales que integran la Cuenca del Río Chaguana. Estas campañas de muestreo, en conjunto con actividades de recopilación existente de la cuenca, permitieron obtener los parámetros de arranque para la utilización del modelo.

Los ríos principales que conforman el Sistema Hídrico del Río Chaguana son: El Río Zapote y el Río Chaguana. Se determinó un tramo específico para cada uno de los ríos, estableciendo 7 puntos de muestreo para cada tramo.

Obtener el modelaje del comportamiento de los Perfiles Hidráulicos, así como la obtención de Parámetros Hidráulicos propios de estos ríos (Zapote y Chaguana), servirá como punto de partida para realizar un prediseño teórico del comportamiento del río, que servirá como soporte para análisis de diseño de estructuras hidráulicas, tanto de prevención como de aprovechamiento.

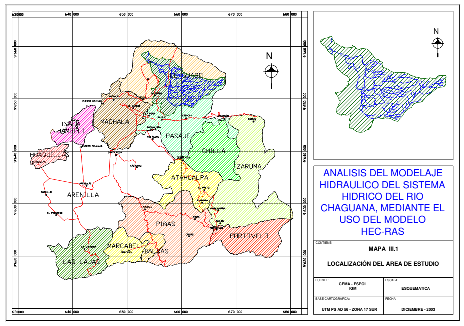
1. DATOS DE LA CUENCA DEL RÍO CHAGUANA

1.1. Obtención de Datos Primarios

1.1.1. Localización del Área de Estudio

La Cuenca del Río Chaguana se localiza en la región suroeste de la República del Ecuador, en la provincia del Oro (Ver Fig. 1). La Cuenca presenta forma irregular.

Fig. 1 - Localización del Área de Estudio

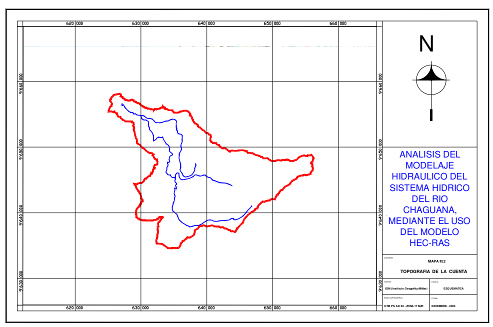


La Cuenca abarca una superficie aproximada de 323.134 Km², la misma que comprende los sectores de las ciudades de Tendales y El Guabo.

1.1.2. Topografía de la Cuenca

La Cuenca del río Chaguana posee elevaciones que varían entre una cota máxima de 3120 msnm (metros sobre el nivel del mar) en la zona montañosa de los Andes, y una elevación mínima de 1 msnm, en la desembocadura del Chaguana en el Pagua (Ver Fig. 2).

Fig. 2 - Topografía de la Cuenca

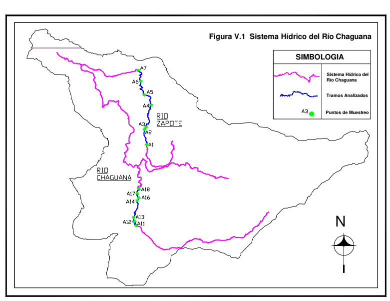


1.2. Generación de Datos Hidráulicos (Datos Secundarios)

1.2.1. Secciones Transversales

Para la obtención de las secciones transversales, se realizaron mediciones topográficas de las márgenes y fondo de los ríos Chaguana y Zapote. Estas mediciones se realizaron en puntos específicos de cada río, denominados "puntos de muestreo" (Ver Fig.3). Cada punto fue respectivamente georreferenciado, mediante la utilización de un GPS.

Fig. 3 - Sistema Hídrico del Río Chaguana



La tabla I mostrada a continuación, detalla la nomenclatura de los puntos de muestreo en los que se realizaron mediciones topográficas, así como las coordenadas geográficas de cada uno de ellos.

Tabla I Secciones Transversales del Sistema Hídrico del Río Chaguana

Río Zapote			**Río Chaguana**		
Sección	**Coordenadas**		**Sección**	**Coordenadas**	
	Norte	**Este**		**Norte**	**Este**
A1	9647576	635913	**A11**	9640175	634960
A2	9648954	635693	**A12**	9640540	634792
A3	9649795	635840	**A13**	9640909	634711
A4	9651189	636317	**A14**	9642434	635028
A5	9652118	635692	**A16**	9642705	635179
A6	9653372	635352	**A17**	9643130	635030
A7	9654367	635116	**A18**	9643553	635184

Fuente: Mediciones en sitio. Campaña de Muestreo VLIR-ESPOL (2001,2002)

1.2.2. Caudales medidos en Campo

Durante las diferentes campañas de muestreo realizadas, se obtuvieron datos de velocidad de flujo en los diferentes puntos correspondientes a cada sección transversal. Estas velocidades permitirán calcular los caudales de diseño para el presente trabajo.

La tabla II detalla los valores de los caudales medidos en campo. Las velocidades de flujo, V_1 y V_2 incluidas en esta tabla, corresponden a mediciones realizadas en la campaña de Noviembre del 2001, y Julio del 2002 respectivamente. Estos dos caudales generarán las características de diseño que se denominarán: Escenario 1 y Escenario 2, respectivamente.

Tabla II Caudales medidos en Campo

Río Zapote					
Sección	**Velocidad V (m/s)**		**Área A (m²)**	**Caudal Q (m³/s)**	
	V_1	**V_2**		**Q_1**	**Q_2**
A1	0.26	0.32	1.545	0.40	0.49
A2	0.25	0.293	2.025	0.51	0.59
A3	0.15	0.164	3.702	0.55	0.61
A4	0.20	0.226	3.342	0.67	0.76
A5	0.20	0.23	3.4406	0.69	0.79
A6	0.18	0.20	5.8300	1.05	1.166
A7	0.17	0.18	8.0219	1.36	1.44
Río Chaguana					
Sección	**Velocidad V (m/s)**		**Área A (m²)**	**Caudal Q (m³/s)**	
	V_1	**V_2**		**Q_1**	**Q_2**
A11	0.15	0.18	3.347	0.50	0.60
A12	0.19	0.222	2.72	0.52	0.60
A13	0.45	0.5	1.23	0.55	0.62
A14	0.28	0.289	3.68	1.03	1.07
A16	0.59	0.651	1.911	1.13	1.24
A17	0.4	0.455	3.029	1.21	1.38
A18	0.21	0.224	7.918	1.66	1.77

Fuente: Mediciones en sitio. Campaña de Muestreo VLIR-ESPOL (2001,2002)

1.2.3. Rugosidades de los Canales (n de Manning)

Las rugosidades mostradas a continuación, fueron obtenidas a partir de muestras de material propio del río, analizadas en ensayos de laboratorio de suelos. Además, se realizaron calibraciones a estos valores de rugosidad. Estas calibraciones obedecen a factores como irregularidad del río, vegetación, entre otros.

La Tabla III, muestra las rugosidades finales, calculadas para cada una de las secciones transversales analizadas en el presente trabajo.

Tabla III Rugosidad Final “n”

Río Zapote			Río Chaguana		
Sección	Rugosidad Final		Sección	Rugosidad Final	
	Márgenes	Fondo		Márgenes	Fondo
A1	0.021	0.030	**A11**	0.047	0.063
A2	0.022	0.029	**A12**	0.020	0.036
A3	0.023	0.030	**A13**	0.036	0.054
A4	0.039	0.044	**A14**	0.040	0.056
A5	0.046	0.047	**A16**	0.047	0.064
A6	0.043	0.042	**A17**	0.029	0.043
A7	0.032	0.032	**A18**	0.034	0.045

Fuente: Cálculo a partir de mediciones en sitio. Campaña de Muestreo VLIR-ESPOL (2002)

2. METODOLOGIA DE CALCULO DEL MODELO HEC-RAS

Para determinar la elevación de la superficie de agua en una sección transversal, se procede a calcular en forma iterativa las Ecuaciones 2.1 y 2.2. La Ecuación 2.1, es conocida como Ecuación de la Energía

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \qquad \text{(Ecuación 2.1)}$$

Donde Y_1, Y_2 es la profundidad del agua en la Sección Transversal, Z_1, Z_2 es la elevación del lecho del tramo, V_1,V_2 son las velocidades promedio (Q total / A total), α_1, α_2 son los coeficientes de velocidad, g es la aceleración de la gravedad, y h_e es la Pérdida principal de Energía.

La pérdida principal de energía (h_e) entre dos secciones transversales está relacionada con pérdidas por fricción y pérdidas por contracción y expansión. La ecuación para la pérdida principal de energía se aprecia en la ecuación 2.2.

$$h_e = L \bar{\bar{S}}_f + C\left[\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right] \qquad \text{Ecuación (2.2)}$$

Donde: *L* es la Longitud del tramo, $\bar{\bar{S}}_f$ es la Pendiente de fricción entre dos secciones, y C es el Coeficiente de pérdida por expansión o contracción.

El procediendo computacional es el siguiente:

1. Se asume una elevación de superficie de agua aguas arriba de la sección transversal (o aguas debajo de la sección transversal, si se desea calcular un perfil supercrítico).
2. Basados en esta elevación asumida, se determina la capacidad de transporte total y así como la velocidad principal.
3. Con los valores obtenidos en el paso 2, se calcula la pendiente de fricción y se resuelve la Ecuación 2.2 para h_e.
4. Con los valores obtenidos en el paso 2 y 3, se resuelve la ecuación 2.1 para WS_2.
5. Se comparan los valores calculados del WS_2 con los valores asumidos en el paso 1. Se repiten los pasos des 1 hasta el 5, hasta que la diferencia entre ellos sea de 0.003 m. Esta tolerancia puede ser definida por el usuario.

El criterio utilizado para asumir las elevaciones de la superficie de agua en el proceso iterativo, varía de intento en intento. El primer intento de superficie de agua esta basado en proyectar la profundidad del agua de una sección transversal, sobre la siguiente sección transversal. Para el segundo intento, el programa vuelve a asumir la elevación de la superficie de agua, pero añadida a un 70% del error obtenido en el primer intento (Elevación calculada – Elevación asumida). En otras palabras, la Elevación nueva = Elevación asumida + 0.70 x (Elevación calculada – Elevación asumida). El tercer y subsiguiente intento es generalmente basado en un método “Secante” proyectando la relación de cambio de las diferencia entre las elevaciones calculadas y asumidas para los dos primeros intentos.
La ecuación 2.3 para el método de la secante se resume de la siguiente manera:

$$WS_1 = WS_{1\text{-}2} – Err_{1\text{-}2} \times Err\_Asum / Err\_Dif \qquad \text{Ecuación (2.3)}$$

Donde WS_1 es La nueva superficie de agua asumida, WS_{I-1} es la superficie de agua asumida en la iteración previa, WS_{I-2} es la superpie de agua asumida dos intentos atrás, Err_{1-2} es el error de dos intentos atrás (superficie de agua calculada menos la asumida en la iteración I-2), Err_Asum es la diferencia entre las superficies de agua obtenidas en los dos intentos previos, Err_Asum es igual a WS_{I-2} - WS_{I-1}, Err_Dif es la superficie de agua asumida menos la superficie de agua calculada en la iteración previa (I-1), más el error dos intentos previos (Err_{1-2}), y finalmente, Err_Diff es igual a WS_{I-1} – WS_Calc_{I-1} + Err_{I-2}.

El cambio desde un intento al siguiente, está restringido en un máximo del 50% de la profundidad asumida en el intento previo. En ocasiones, el método de la secante puede fallar si el valor de Err_Dif se torna muy pequeño. Si el Err_Dif es menor que 1.0E-2, no se deberá utilizar este método. Cuando ocurra esto, el programa calculará un nuevo valor asumido, tomando en cuenta el promedio de los valores de superficie de agua asumido y computado en las iteraciones previas.

El programa esta restringido a un número máximo de iteraciones (el número predeterminado es 20) para balancear el perfil hidráulico. Mientras el programa realiza las iteraciones, mantiene un nivel de superficie de agua tal que produce un monto mínimo de error entre los valores asumidos y calculados. Esta superficie de agua es llamada “superficie de agua con mínimo error”. Si el número máximo de iteraciones es alcanzado antes de que se produzca un balance, el programa calculará entonces una profundidad crítica (si esta no ha sido ya ingresada).

El programa verificará entonces si el error asociado con la superficie de agua con error mínimo, se encuentra entre uno los rangos de tolerancia predefinida (el programa lo asume con 0.1m). Si el error mínimo de superficie de agua tuvo un error asociado menor a la tolerancia predeterminada, y esta a su vez se encuentra en el lado correcto de la altura crítica, entonces el programa utilizará esta superficie de agua como una respuesta final, y enviará un mensaje de aviso si esto ocurriese. Si al contrario, la superficie de agua de error mínimo tuvo un error asociado mayor a la tolerancia predeterminada, o si esta se encuentra en el lado erróneo de la altura crítica, el programa utilizará a la altura crítica como resultado final para la sección transversal, enviando un mensaje de aviso si esto ocurriese. Tanto la superficie de error mínimo como la altura crítica son únicamente utilizadas en aquellas situaciones en las que se le permite al programa el continuar con la solución de los perfiles hidráulicos.

Cuando una elevación “balanceada” ha sido obtenida para una sección transversal, se realizan verificaciones para asegurar que la elevación se encuentra en el lado correcto del perfil de altura crítica (Ej.: sobre la altura crítica si se requiere un perfil subcrítico). Si la elevación balanceada se encuentra en el lado erróneo de la superficie de altura crítica, se asume la altura crítica para la sección transversal.

Para un perfil subcrítico, una verificación preliminar para un adecuado régimen de flujo, envuelve el análisis del número de Froude. El programa calcula el número de Froude de las superficies de agua “balanceadas”, tanto para el canal principal, como para la sección transversal completa. Si alguno de estos dos números de Froude son mayores que 0.94, entonces el programa verificará el régimen de flujo, mediante el cálculo de una altura crítica con mayor precisión, usando el método de la mínima energía específica. Un número de Froude de 0.94 es usado en vez de 1.0, debido a que los cálculos del número de Froude en canales irregulares no son muy precisos. De esta manera, el uso de un valor de 0.94 se considera conservador, en tanto que el programa calculará una altura crítica con mayor frecuencia de la que podría necesitar.

3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MODELO

Una vez ingresados los datos de entrada, se procede a correr el modelo hidráulico. Para en análisis de la simulación hidráulica realizada por el modelo, se asumirá Condiciones de Flujo Permanentes, es decir, que en la ecuación de la energía no serán incluidos términos que dependan del tiempo. Además, se realizarán los cálculos a partir de consideraciones de Flujo Subcrítico (N° de Froude < 1). Los resultados del modelo se presentan tanto en forma gráfica como tabular. Cabe mencionar que el modelo trabaja únicamente en lenguaje inglés, por lo que los parámetros incluidos en los resultados obedecen a abreviaturas en dicho idioma.

Como ya fue mencionado en el resumen de este informe, el presente trabajo está basado en una investigación de tesis de grado. En dicha tesis de grado se incluyen con mayor detalle todos los resultados gráficos generados por el modelo, los mismos que corresponden a cada sección transversal analizada, y a cada escenario de diseño considerado.

Dada la cantidad de gráficas que incluye el modelo, no se presentarán todos los resultados gráficos.

3.1. Resultados Gráficos del Modelo

3.1.1. Secciones Transversales

En esta sección se presentan las figuras 4 y 5 que contienen los perfiles hidráulicos calculados por el Modelo Hec-Ras, visualizados en cada una de las Secciones Transversales analizadas en el Sistema Hídrico.

Fig. 4 - Secciones Transversales del Río Zapote (Secciones A-1, A-4, A-7)

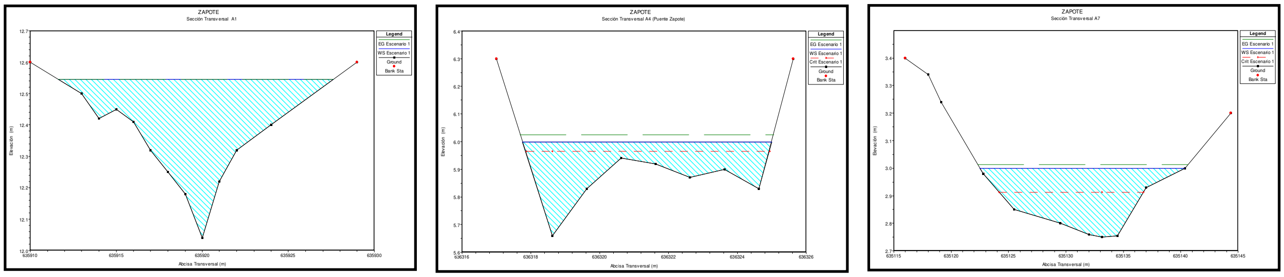
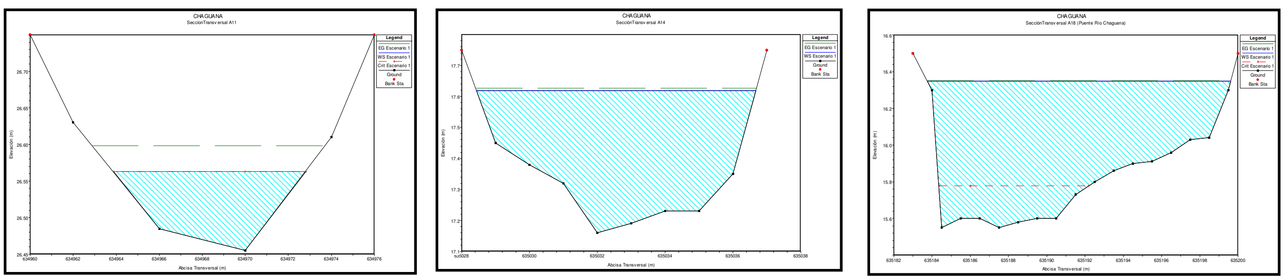


Fig. 5 - Secciones Transversales del Río Chaguana (Secciones A-11, A-14, A-18)



3.1.2. Perfiles Hidráulicos

En esta sección se presentan las figuras 6 y 7 que contienen los perfiles hidráulicos calculados por el Modelo Hec-Ras, graficados a lo largo de las longitudes de cada tramo de los ríos Zapote y Chaguana respectivamente.

Fig. 6 - Perfil Hidráulico Río Zapote

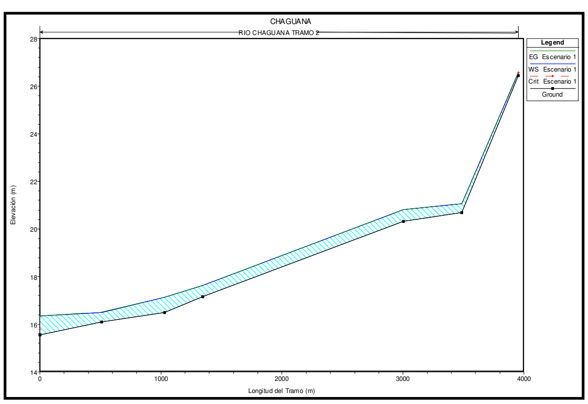
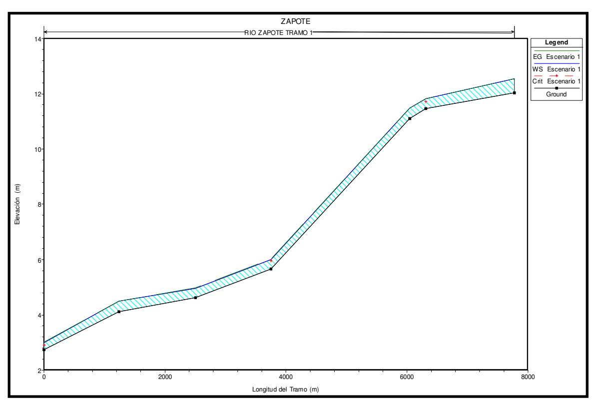


Fig. 7 - Perfil Hidráulico Río Chaguana



3.1.3. Curvas de Gastos (Rating Curves)

Las Curvas de Gastos, son gráficos que representan la descarga de un río o canal, en función de la elevación del agua en un punto dado. El Modelo Hec-Ras, realiza los cálculos de la Curva de Gasto, para cada una de las Secciones Transversales que intervienen en el Sistema Hídrico del Río Chaguana. Se presentan las figuras 8 y 9, las cuales contienen las cuervas de gastos para las secciones de los ríos Zapote y Chaguana respectivamente.

Fig. 8 - Curvas de Gasto del Río Zapote (Secciones A-1, A-4, A-7)

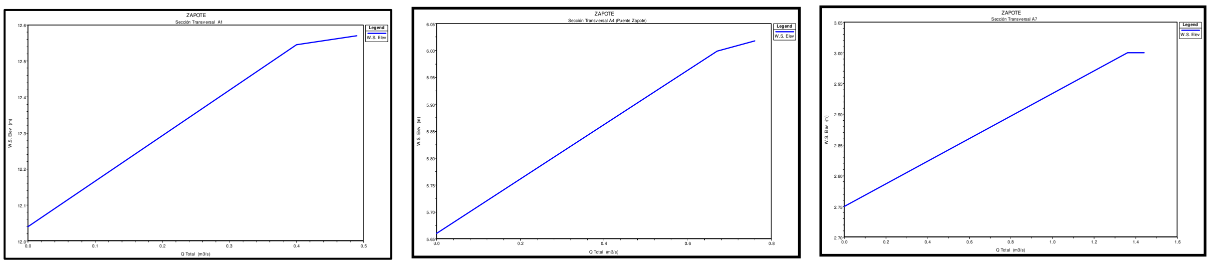
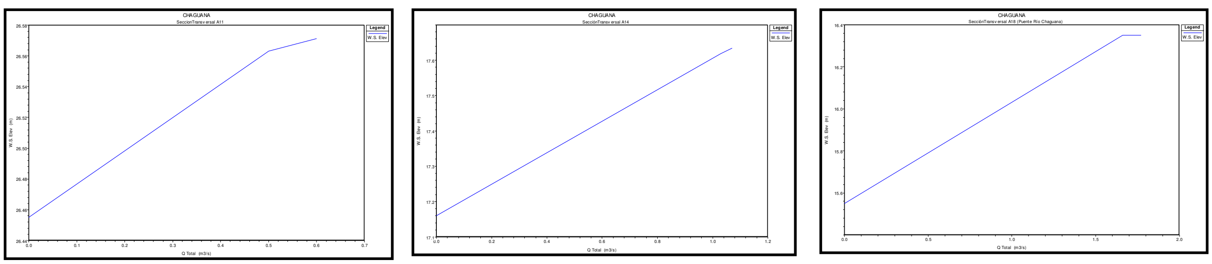


Fig. 9 - Curvas de Gasto del Río Chaguana (Secciones A-11, A-14, A-18)



El disponer de curvas de Gastos o de Descarga, resulta de gran utilidad en el análisis de un río, ya que permite inferir el caudal o gasto conociendo sólo la elevación de la superficie de agua. Debe entenderse que las consideraciones hidráulicas asumidas por el modelo son de régimen permanente Cuando el régimen no sea permanente, y se desee deducir el caudal o gasto a partir de las curvas de descarga, se le deben hacer correcciones dependiendo de las causas que provoquen que el régimen no sea permanente.

3.1.4. Curvas Generales del Sistema Hídrico

Por último, el Modelo interpreta gráficamente la variación de varios factores hidráulicos de los ríos, en función de sus longitudes totales. Las Figuras 10 y 11 muestran las gráficas de los principales factores hidráulicos de cada río analizado.

Fig. 10 - Curvas Generales del Sistema Hídrico del Río Zapote

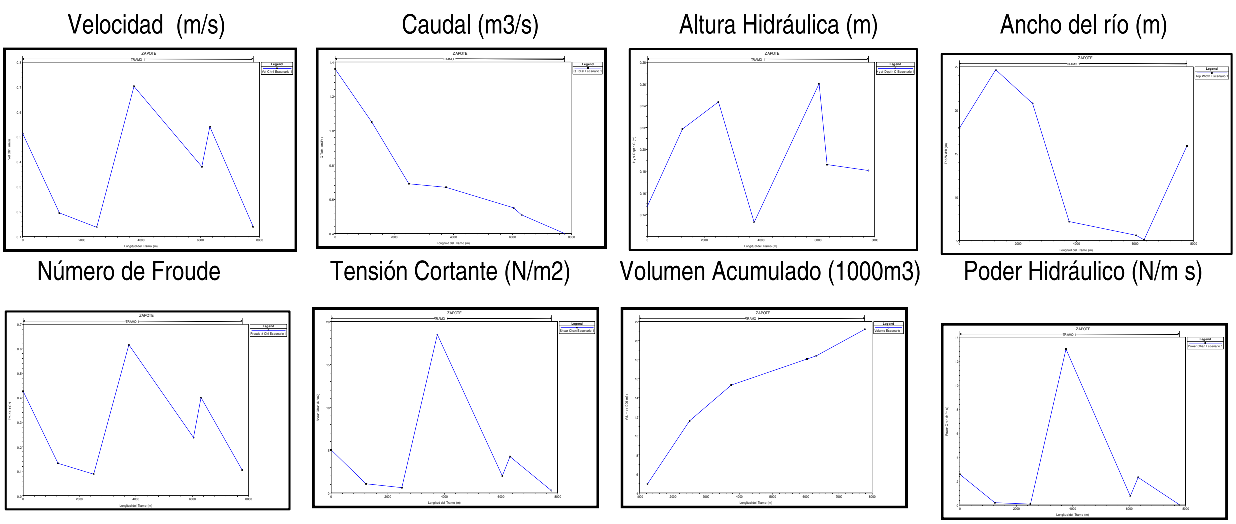
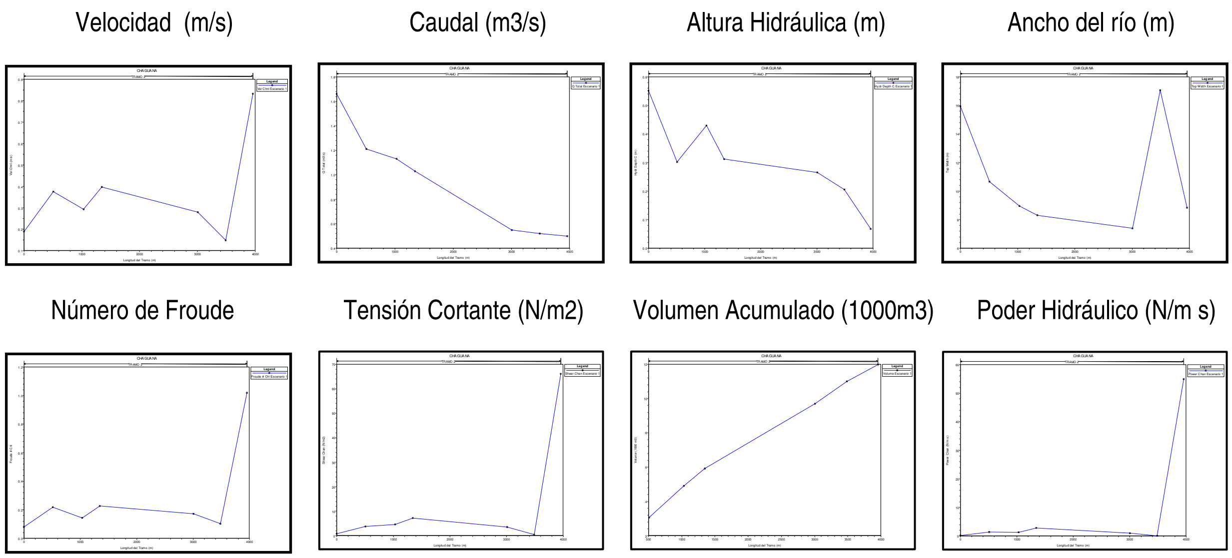


Fig. 11 - Curvas Generales del Sistema Hídrico del Río Chaguana



3.1.5. Análisis de las Curvas Generales del Modelo

Velocidades del río: Analizando las curvas de velocidades del río Zapote, las velocidades máximas registradas en este tramo, se dan en la Sección A-4. Esto se debe a que la pendiente del tramo A-3 – A-4, cuyo valor se aproxima a 0.13%, es la mayor del río. Luego, la velocidad decrece considerablemente en la sección A-5, debido principalmente a las obras de represamiento realizadas en el sector (enrocado luego del puente del río Zapote). Finalmente, la velocidad se incrementa hasta llegar al extremo final aguas abajo, en la sección A-7.
Con respecto a las curvas de velocidades del río Chaguana, los valores calculados para la Sección A-11, no se consideraran válidos. Bajo esta consideración, partiendo de la Sección A-12, la velocidad aumenta gradualmente hacia aguas abajo. La velocidad máxima entonces se registraría en la Sección A-14, debido a que el tramo A-13 – A-14 es el de mayor pendiente en el río. A la altura de la Sección A-16, la velocidad disminuye. Esto se debe a la presencia de obstáculos (dique de roca) colocados en el río. Luego, se registra un aumento de velocidad hasta llegar a la Sección A-17, debido básicamente a consideraciones de gravitatorias. Finalmente, se observa una considerable disminución de velocidad hasta legar a la Sección A-18. Se atribuye esta disminución al aumento considerable de las dimensiones del canal en este punto.

Caudales del río: Analizando la curva de caudales para el río Zapote, se puede apreciar un incremento equitativo de los caudales correspondientes a las Secciones A-1, A-2, A-3, A-4 y A-5, debido a efectos gravitacionales. Luego, se registra un considerable aumento de caudal desde en la Sección A-5, para finalmente llegar a su máximo valor en la Sección A-7.
Con respecto al análisis de caudales del río Chaguana, se registra un incremento equitativo de caudales hasta llegar a la Sección A-13. En este punto, y debido principalmente al aumento de la pendiente, se registra una mayor variación en el aumento del caudal hasta llegar a la Sección A-16. Cabe recordar que en la Sección A-16 se colocaron diques transversales de roca para disminuir la velocidad del río. Este fenómeno ocasiona que se registre un menor aumento del caudal desde la Sección A-6 hasta la Sección A-17. Finalmente, se registra el caudal máximo en la Sección A-18, considerándose como factor preponderante para este aumento, el aumento de las dimensiones del canal a la altura de este punto.

Anchos del río: son los anchos de las secciones transversales, tomando como referencia la superficie de agua calculada. La distribución de los anchos de un río guarda relación con la distribución de caudales y áreas de flujo. Observando la curva de anchos del río Zapote, tendremos que existe una reducción de los anchos del canal entre la Sección A-1 y A-2. Luego, se produce un aumento gradual hasta llegar a la Sección A-4 (Puente sobre el Zapote). En este punto (A-4), se registra un considerable aumento en el ancho del canal, llegando a la Sección A-6 con casi 4 veces el ancho registrado en el punto A-4.
Analizando la distribución de los anchos del río Chaguana, se observa una reducción del ancho entre la Sección A-12 hasta la Sección A-13. Luego, se registra un aumento gradual hasta llegar al punto A-17. Finalmente se produce un incremento del ancho del río, hasta llegar a la Sección A-18 (Puente sobre el Chaguana).

Número de Froude: Es la relación existente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales de un río o canal. Dado que el Número de Froude es directamente proporcional a las velocidades del río, se puede apreciar cierta similitud entre las curvas de distribución de ambos parámetros hidráulicos. Los valores calculados para la Sección A-11, son aproximadamente iguales a 1.00. Esto se debe a que para poder calibrar la ecuación de la energía, el modelo asume la altura crítica (No. Froude = 1) como altura de superficie de agua, por lo que no deberá tomarse este valor como válido.

Altura Hidráulica: La Altura Hidráulica es la relación que existe entre el área de una sección transversal y el ancho de la sección. Analizando la curva de distribución de alturas hidráulicas del río Zapote, el máximo valor se registra en la Sección A-3, y el mínimo valor se registra en la Sección A-4. Cabe recalcar el tramo comprendido entre estas dos secciones (A-3 y A-4), posee la mayor longitud y la mayor pendiente del tramo del rió Zapote analizado. Luego, se produce una disminución considerable de la pendiente hasta llegar a la Sección A-5, lo que genera un fenómeno de remanso, produciendo así un aumento considerable de la altura hidráulica. Finalmente, se produce una reducción gradual de este parámetro hasta llegar al final del tramo en la Sección A-7.
Con respecto a la distribución de la Altura Hidráulica del río Chaguana, se aprecia un aumento gradual entre los valores registrados entre las Secciones A-12 y A-14. Luego, se produce un incremento considerable entre las secciones A-14 y A-16. Esto se debe a que como ya se mencionó, entre estas dos secciones existen enrocados destinados a disminuir la velocidad del río, lo que a producido que se presente un fenómeno de represamiento entre estos dos puntos. Finalmente, se alcanza los valores máximos de altura hidráulica en la Sección A-18 (Puente del río Chaguana).

Tensión Cortante: Es la tensión desarrollada por la fuerza cortante del agua, distribuida en el área mojada del canal, la cual actúa en dirección del flujo. La importancia del conocimiento de los valores de este parámetro hidráulico, radica en que si esta Tensión Cortante, supera el valor de la Tensión Crítica del material que compone la solera del río, se producirá un fenómeno de erosión. La fuerza cortante máxima del tramo del río Zapote se registra en la Sección A-4, y la mínima se registra en la Sección A-5. Cabe mencionar que el valor calculado para la Sección A-11, no guarda relación con el comportamiento del resto de la curva. Este dato no deberá ser tomado como válido, y se lo atribuye a las anomalías de cálculo registradas por el modelo en este punto (Ver Sección V.3 -Matriz de Valoración de los Resultados del Modelo).

4. CONCLUSIONES

El Modelo Hidráulico HEC-RAS, representa una herramienta de considerable valor, que mediante procesos iterativos aplicados a formulas tradicionales de la Hidráulica, permite calcular los perfiles hidráulicos de un río o canal. Esto permite al diseñador entender el comportamiento del rió, consiguiendo así obtener las pautas para un prediseño teórico de obras hidráulicas, tanto preventivas como de mejoramiento o de aprovechamiento de las condiciones hidrológicas de un canal.

Los gastos monetarios que representan la obtención de los parámetros básicos para poder desarrollar el modelaje del comportamiento de un río, son elevados. Actividades como cubrir una cuenca hidrográfica con estaciones hidrometeorológicas que permitan obtener datos históricos de parámetros como caudales, temperaturas, elevaciones de agua, lluvias, etc.; realizar campañas topográficas que determine las características orográficas de una cuenca; o cubrir toda la extensión de un sistema hídrico con campañas batimétricas para obtener los perfiles transversales del mismo, son tan costosas, que generalmente son realizadas por entidades gubernamentales, por lo que realizar un trabajo de tesis de grado relacionado a este tema no resulta factible, a menos que se disponga del apoyo de terceros.

Durante los procesos de cálculo del modelo se suscitaron ciertas anomalías con respecto a los cálculos en la capacidad de transporte de los ríos, y con respecto las pérdidas de energía entre varias secciones transversales. Estas anomalías se deben a que el espaciamiento entre una sección transversal y otra es muy grande.

Si analizamos la forma original del los ríos (Chaguana y Zapote), nos daremos cuenta de que se trata de un sistema hídrico considerablemente meándrico. Al realizar los cálculos, el modelo HEC-RAS asume un tramo recto entre cada una de las secciones transversales, interpolando la forma física, y los parámetros hidráulicos de un tramo de río, según la forma física y los parámetros hidráulicos de cada una de las dos secciones transversales que conforman dicho tramo. Esto provoca que el gran espaciamiento entre ambas secciones transversales genere anomalías con respecto a los procesos de cálculo del modelo.

5. RECOMENDACONES

La medida de calibración recomendada, para reducir el margen de error de los datos obtenidos, consiste en la generación de un mayor número de puntos de muestreo, disminuyendo el espaciamiento entre uno y otro punto, obteniendo así mayores datos relacionados a secciones transversales (topografía, velocidades de flujo, caudales, rugosidad).

Realizar una nueva campaña de muestreo única y exclusivamente para obtener más perfiles transversales (junto con los datos hidráulicos de cada perfil), demandaría tiempo y dinero que lamentablemente se escapó del presupuesto de la tesis, sin contar las dificultades relacionadas al acceso a los sitios de muestreo, que en su mayoría correspondían a sitios localizados en bananeras privadas, por lo que no se pudo realizar.

No obstante, aunque los datos obtenidos en este trabajo hubiesen podido ser mejorados mediante una última campaña de muestreo, quedan los conocimientos adquiridos en el desarrollo del modelaje hidráulico, así como la experiencia ganada con respecto a procesos de muestro.

Personalmente, los beneficios de utilizar herramientas computacionales para la resolución de problemas de ingeniería son muchos, pero el mayor de los beneficios, es el hecho de aprender nuevas técnicas y aplicarlas al desarrollo de la comunidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. BONINI J. y GUZMAN E., "Estimación de Caudales y Sedimentos en la Cuenca Hidrográfica del Río Chaguana, empleando el Modelo Matemático AVSWAT", 2003
2. CHOW, V, T, "Hidrologia aplicada", Edición Mc Grill Hill, 2000
3. CUERPO DE INGENIEROS DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMERICA (USACE), "Evaluación de los Recursos de Agua del Ecuador", 1998
4. CUERPO DE INGENIEROS DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMERICA (USACE), Hydrologic Engineering Center – River Analysis System, "Theorical Basis of One-Dimensional Flow Calculation", Capítulo 2, 2002
5. DEPARTAMENTO DE EXPLORACION GEOLOGICA DE LOS ESTADOS UNIDOS (USGS), "Guía para la Selección de los Coeficientes de Rugosidad de Manning para Canales Naturales y Llanuras de Inundación", Publicación 2339, 1996
6. HEC 20, "Stream Stability at Highway Structures", 2nd Edición – Versión Métrica, 1995
7. INAMHI, Anuarios hidrológicos, meteorológicos
8. SILVA GUSTAVO, "Notas de Ingeniería Hidráulica", 2002
9. SIMONS DARYL B. PH.D.,P.E, SENTURK FUAT, PH.D., "Sediment Transport Technology – Water and Sediment Dynamics", 1992