

CAPÍTULO 4

Resultados

1. Resultados

1.1 Introducción

Es evidente que las obras antropogénicas planteadas como solución dentro del Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT), modificarán las condiciones de flujo en ríos y llanuras de inundación. Como resultado, es necesario evaluar a detalle las consecuencias que dichos cambios tendrán sobre la configuración de los sistemas lagunares y las desembocaduras de los ríos al mar. Más aun si se tiene en mente que la zona costera de Tabasco está constituida por zonas bajas inundables.

Las condiciones de flujo aguas arriba de la cuenca tienen una incidencia directa sobre lo que acontece hacia la desembocadura de los ríos al mar. Esta tesis tiene como objetivo principal, el estudio de las posibles inundaciones que resulten cerca de la desembocadura del río González. La compuerta del Macayo, ubicada en la bifurcación del río Samaria/río Carrizal, tiene como función principal el drenaje del agua excedente que actualmente llega a Villahermosa hacia zonas bajas inundables cerca de la desembocadura del río González y la Laguna de Mecoacán. Este desvío propone la utilización del sistema compuesto por los ríos Samaria-Dren Victoria-Río González, a fin de que el volumen de exceso sea canalizado hacia zonas de amortiguamiento.

En particular, este capítulo presenta la evaluación de las consecuencias del desvío de una avenida con periodo de retorno de 100 años hacia la desembocadura del río González. Además se proponen diferentes alternativas de solución como son dragado en los ríos, ampliación de la conexión con la laguna de Mecoacán a fin de poder incrementar la eficiencia de este sistema para canalizar la avenida extraordinaria estudiada.

Estos resultados forman parte de los estudios integrales de la sección de procesos costeros del “Plan Hídrico Integral de Tabasco”, abocada a evaluar las consecuencias de las obras propuestas en la parte baja de las cuencas.

1.2 Tránsito de la avenida con periodo de retorno de 100 años bajo condiciones actuales del cauce

En esta sección se presentan los resultados de la simulación numérica del drenaje de la avenida extrema de $Tr=100$ años (ver Figura 4.1) en la zona de estudio, bajo las condiciones actuales del cauce del río. Este caudal está referido al que proviene de la bifurcación del río Samaria hacia el río González, con un valor del gasto máximo cercano a los $6,000 \text{ m}^3/\text{s}$. De igual forma se observa que de manera continua, alrededor de 1.5 días se presenta un gasto superior a $3,000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para el tránsito de esta avenida en condiciones normales, se utiliza la malla de modelación presentada en el Capítulo 3 de esta tesis y la variación del nivel medio del mar asociado a la presencia de mareas vivas.

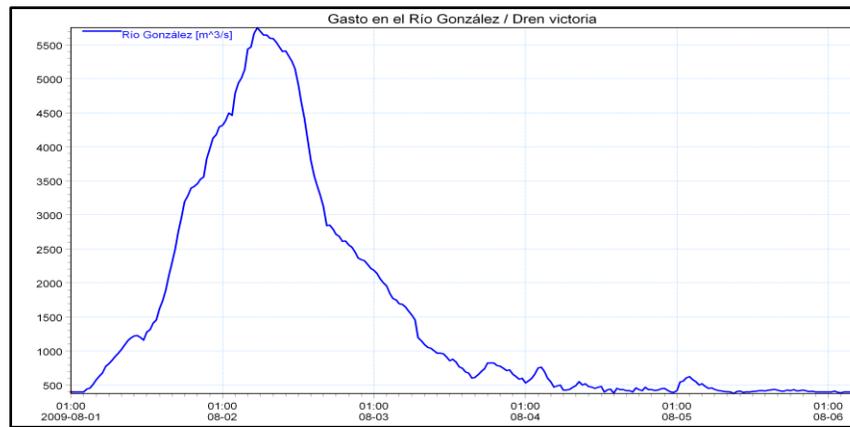


Figura 1.1 Hidrograma de entrada que se utiliza en la condición de frontera del Dren Victoria

La condición inicial del sistema se presenta en el panel superior de la Figura 4.2, donde se aprecia la configuración de los cuerpos de agua en el sistema para el tiempo cero de la ejecución. En esta figura es posible observar la desembocadura del río González, la laguna de Santa Anita al este del sistema, el conjunto de lagunas menores ubicado al centro del dominio de cálculo y el dren Victoria en la parte central baja de la zona de estudio. Por otra parte, el panel inferior presenta el contorno de la mancha de inundación y gastos después de 6 horas y 40 minutos de haber iniciado el forzamiento del sistema. En esta Figura es posible determinar que desde el inicio de la simulación numérica se observa una inundación considerable de la zona de estudio.

Por otra parte, la continuación del evento de inundación se presenta en los paneles superior izquierdo e inferiores de la Figuras 4.2, que ilustran los mapas de gasto y mancha de inundación dentro del sistema para instantes posteriores dentro de la modelación. Estos lapsos del estado del gasto y la mancha de inundación en la llanura, son mostrados para el periodo de tiempo comprendido entre el 2 y el 3 de agosto de 2009. De esta forma se puede dar seguimiento a la naturaleza del gasto y la mancha de inundación a la par con la presencia del gasto máximo en la simulación numérica. Por otra parte, la generación de estos mapas de inundación permite una evaluación a detalle del comportamiento del gasto transitado a través del dren Victoria.

Los resultados que se observan en ambas figuras, son muy reveladores en cuanto el funcionamiento hidráulico del dren Victoria y la desembocadura del río. En todos estos instantes se puede observar, que el gasto transitado genera una considerable mancha de inundación que se aprecia a lo largo de todo el periodo de tiempo simulado (que comprende al menos dos ciclos completos de marea). Esto se debe principalmente, a que el cauce actual del río González y el Dren Victoria son considerablemente superados en su capacidad hidráulica por el gasto de $Tr=100$ años transitado.

El agua se desborda desde el inicio del evento y la mancha de inundación crece con dirección hacia el sur y el este del dominio (ver Figura 4.3). Esto indica es poco probable que el caudal de Tr=100 años se drene correctamente hacia el mar bajo las condiciones actuales del cauce. Esto se confirma en los instantes reportados en la Figura 4.4, en los que se observa que el área de mayor inundación está localizada en ambas márgenes del dren Victoria. Mientras que la zona central deshabitada de la llanura de inundación, donde se ubican las lagunas menores, no presenta una inundación considerable.

Los resultados presentados en estas figuras, indican que bajo las circunstancias actuales existe un riesgo de inundación elevado para las poblaciones de Ignacio Allende, Villa Unión y Simon Sarlat.

Esto indica que se requiere el planteamiento de alternativas adicionales de solución que permitan dirigir de manera controlada el caudal.

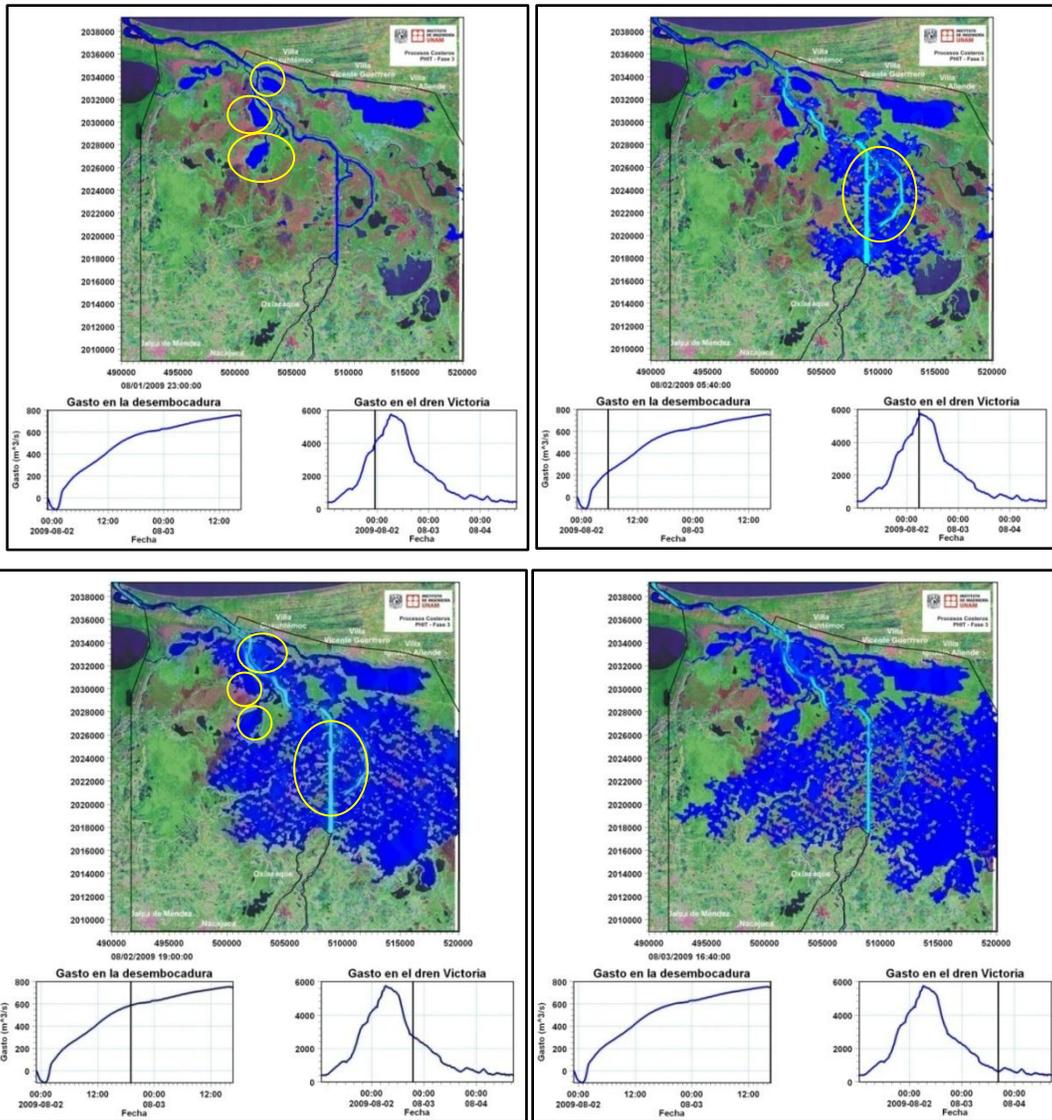


Figura 1.2 Escenarios de inundación a lo largo de la simulación numérica del drenaje de la avenida extrema asociada a un $Tr=100$ años

Los resultados que se presentan en la Figura 4.2 señalan que de no ampliarse la capacidad del dren Victoria/río González no será posible transitar el gasto extraordinario asociado a un $Tr=100$ años. En todos los instantes presentados a lo largo de esta simulación numérica se producen grandes problemas de inundación, lo que señala la importancia de generar las obras necesarias para conducir este flujo de inundación a través del cauce del río y el dren, para dirigir los flujos lejos de las zonas habitadas dentro del dominio de cálculo.

Con el propósito de evaluar posibles alternativas de alivio al problema de la capacidad hidráulica del dren Victoria y el río González, la siguiente sección presenta la simulación numérica de dos escenarios posibles en los que se consideran dragado en el dren victoria, la desembocadura del río González y la conexión con la laguna de Mecoacán.

1.3 Propuestas de alternativas de alivio en la llanura de inundación

Dadas las condiciones de afectación observadas en la Figura 4.2, se requiere plantear alternativas de alivio a dicho escenario de inundación. En años recientes, la filosofía mundial del diseño de alternativas de alivio a inundaciones no involucra la desaparición completa de la inundación, sino su control a través del diseño con los procesos físicos presentes en el río. Para el sistema en estudio, el drenaje de este excedente de agua hacia esta zona tiene como propósito el aprovechamiento de la laguna de Mecoacán como zona de amortiguamiento de la inundación. Así entonces, se requiere incrementar la capacidad hidráulica de la conexión entre el río González y este cuerpo lagunar.

La superficie de la laguna Mecoacán es suficiente para confinar un volumen importante de agua la forma de laguna es irregular y alargada, su longitud máxima es de 12 km y en su parte más ancha mide 5.5 km, abarcando un área alrededor de 62 km². Del mismo modo, su drenaje es hacia el Golfo de México, con la diferencia de que la laguna Mecoacán lo hace a través de la barra de Dos Bocas (tiene un anchura de 300 m.) y el río González por la barra de Chiltepec.

Tal y como se reportó en el capítulo 2 el arroyo Hondo, conexión entre el río González y la laguna Mecoacán, presenta una baja eficiencia hidráulica conduciendo un gasto del orden de 60 m³/s. Este caudal está limitado por las dimensiones del arroyo con una anchura de 40 m y con profundidades menores de 1.5 m. Por tal motivo, dentro de las alternativas de solución, es imprescindible considerar la ampliación de este cuerpo de agua.

Por otro lado, la modelación numérica indica que de no ampliarse la capacidad del dren Victoria no es posible transitar el gasto extraordinario asociado a un $Tr=100$ años. En todos los instantes presentados a lo largo de esta simulación numérica se producen grandes problemas de inundación, lo que señala la importancia de generar las obras necesarias para conducir este flujo de

inundación a través del cauce del río y el dren, para dirigir los flujos lejos de las zonas habitadas dentro del dominio de cálculo.

Así entonces, las alternativas que se proponen en esta tesis son variaciones de ampliación/dragado del dren Victoria/río González. Considerando una ampliación/dragado del arroyo Hondo que consiste en ampliar la anchura a 120m y un dragado a la cota -4.5m para este cuerpo de agua. Estas alternativas se proponen con el objetivo de incrementar la capacidad hidráulica de ambos, el río y su conexión, con lo que se espera lograr una mejor conducción de la avenida extraordinaria hacia el mar.

Para tal efecto se propone la modelación del incremento de diferentes anchuras en el Dren Victoria: 240 m, 300 m, 380 m, y 600 m. Con el objetivo de ampliar considerablemente la capacidad hidráulica del dren, se consideran de forma simultánea bajo todos estos escenarios de ampliación, un dragado del dren/río a la cota de -9 m.

Adicionalmente, con la finalidad tener la mayor información posible respecto a una mejor alternativa de solución, se realizaron una segunda ronda de modelaciones en las que se considera un dragado a una cota de -7.5m para los anchuras de 240 y 365m. La Figura 4.3 presenta un diagrama con las alternativas de alivio simuladas.

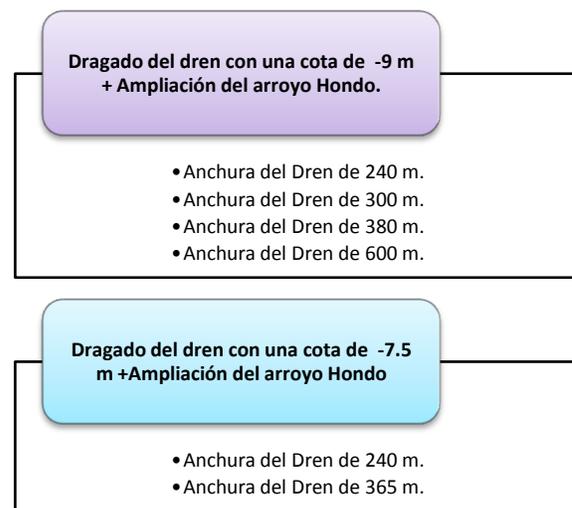


Figura 1.3 Diagrama de las alternativas en la llanura de inundación

Como parte del análisis de los resultados obtenidos bajo todos estos escenarios, en las siguientes Figuras se presentan los resultados finales del forzamiento de la avenida de diseño ($Tr=100$ años) bajo todas las alternativas propuestas en la Figura 4.3.

La Figura 4.4 introduce los resultados correspondientes a la ampliación del Dren Victoria hasta 240 m y su dragado a una cota de -9 m. En esta Figura es posible apreciar que la mancha de inundación disminuye en comparación con la

obtenida en la condición original del cauce en la que el dren Victoria tiene una cota de -4 m y una anchura de 100 m.

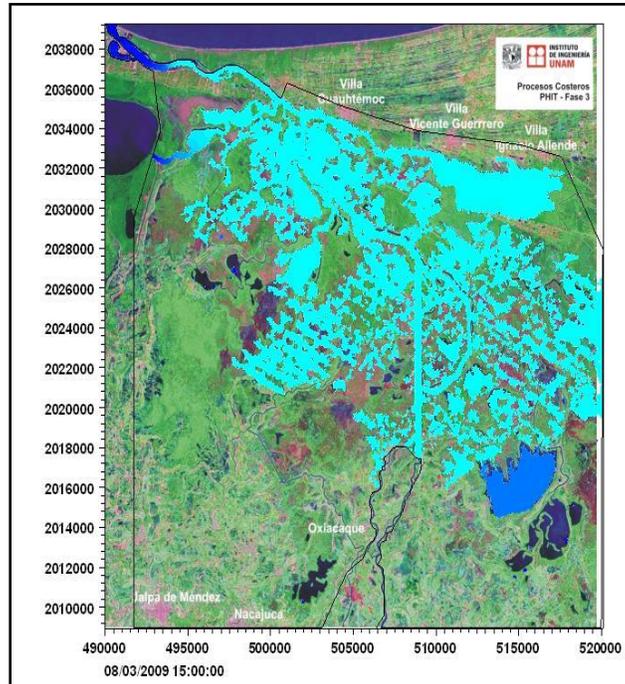


Figura 1.4 Condición final de la alteración con ampliación de la anchura del Dren Victoria a 240 m. y una profundidad de 9 m.

Por otra parte, la ampliación del dren Victoria a una anchura de 300 m y un dragado a la cota -9m se presenta en la Figura 4.5. En este caso, el resultado del estado final del sistema bajo esta condición luce bastante similar al presentado en la Figura 4.4. La zona de afectación en uno y otro caso parecen ser las mismas. Esto indica que no hay un incremento considerable en la eficiencia hidráulica del cauce.

La Figura 4.6 presenta los resultados obtenidos bajo las condiciones definidas en la tercera alternativa. Es decir, considerando una anchura del dren Victoria de 380 m y un dragado a la cota -9m. Este resultado señala una reducción considerable en el área de inundación obtenida. Específicamente se nota un alivio en la zona central del dren, cerca de su inicio.

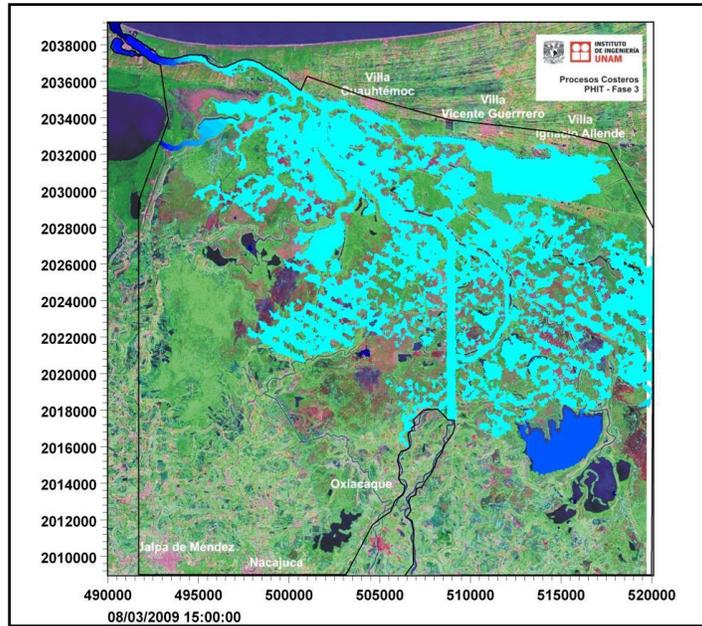


Figura 1.5 Condición final de la alternativa con ampliación de la anchura del Dren Victoria a 300 m. y una profundidad de 9 m.

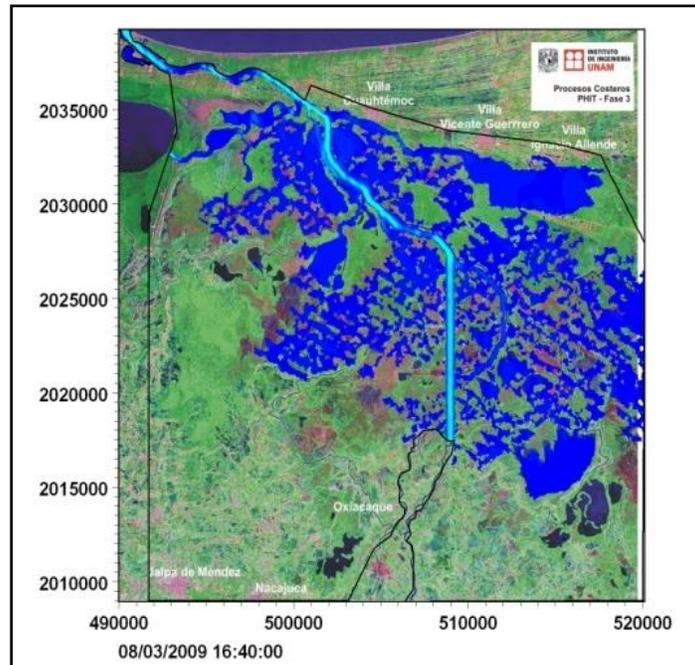


Figura 1.6 Condición final de la alternativa con ampliación de la anchura del Dren Victoria a 380 m. y una profundidad de 9 m.

Por último, la anchura de 600 m es la condición más amplia simulada en este trabajo. Los resultados asociados a la modelación del tránsito de la avenida extraordinaria en un cauce de esta anchura se presentan en la Figura 4.7.

Si bien el construir un dren con las dimensiones propuestas en esta condición representa un costo muy elevado de las obras hidráulicas, se determinó simular esta condición con el propósito de reportar que tanto se alivia la condición final del área inundada. Tal y como se aprecia en la Figura 4.7 la inundación es efectivamente reducida por el canal propuesto ya que se mitigan las inundaciones observadas en los cuerpos lagunares centrales reportadas en las figuras anteriores.

Notablemente, a pesar del ensanchamiento propuesto en esta condición de alivio la inundación no es posible evadir un evento de inundación. Esto indica que el gasto transitado bajo estas condiciones de modelado representa un volumen de agua extraordinario, que es muy difícil conducir con éxito hasta la desembocadura del río González. Sin embargo, el escenario de inundación que se reporta es bastante menor al presentado en el capítulo 3 de esta tesis.

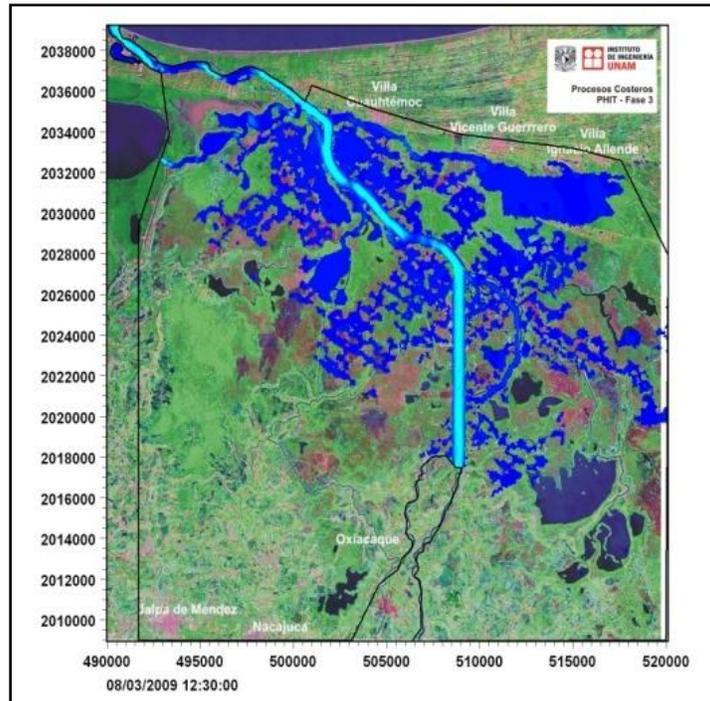


Figura 1.7 Condición final de la alternativa con ampliación de la anchura del Dren Victoria a 600 m. y una profundidad de 9 m.

A fin de estudiar posibles consecuencias en la reducción del costo de las obras de alivio propuesta en los escenarios hasta ahora mostrados, se presentan además dos modelaciones extra para condiciones de dragado a una profundidad de 7.5m.

La Figura 4.8 presenta los resultados bajo una alternativa que considera una anchura del dren Victoria de 240m y una profundidad de dragado de 7.5m. Tal y como se aprecia, el estado final del sistema es muy parecido al obtenido bajo una condición de dragado de 9m de profundidad. En la sección posterior, se presenta el cálculo exacto de las áreas de inundación a fin de proveer información cuantitativa respecto a la inundación generada bajo cada condición simulada.

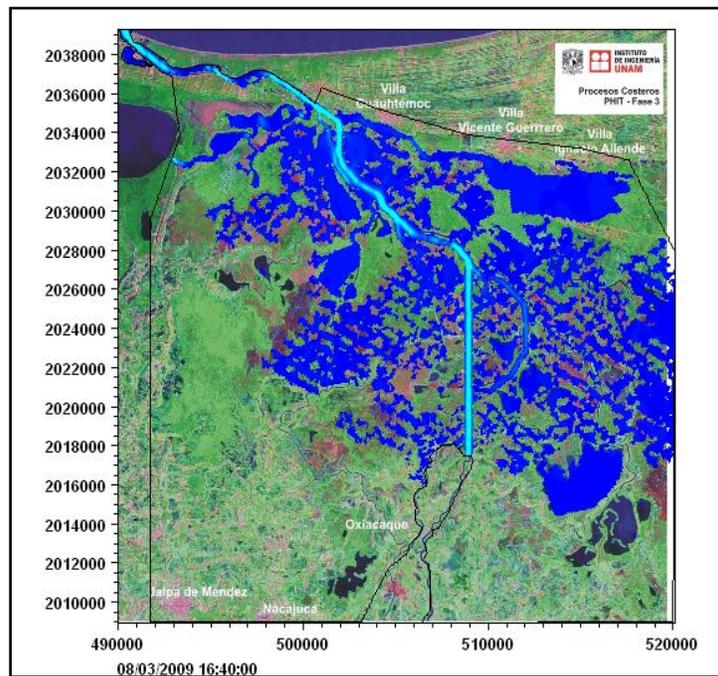


Figura 1.8 Condición final de la alternativa con la ampliación de la anchura del Dren Victoria a 240 m. y una profundidad de 7.5 m.

Por último, la Figura 4.9 ilustra los resultados obtenidos del tránsito de la avenida en un dren de anchura de 365m y profundidad de dragado de 7.5 m. El estado final del sistema indica una reducción considerable del área de inundación.

De todos los resultados obtenidos bajo las condiciones simuladas, se puede establecer que en la zona baja del río González, es muy difícil evitar al 100% la inundación generada por una avenida extraordinaria ($Tr=100$ años). En el caso de desviar una avenida con estas características a esta zona, es evidente que se puede afectar a los poblados en esta zona. Sin embargo de realizarse obras de ampliación en la capacidad hidráulica del cauce del río, es posible mitigar la

inundación en zonas pobladas sin que esta se evite por completo. De hecho, la mayor parte de los casos de alivio simulados indicaron que la zona inundada corresponde a zonas deshabitadas compuestas por llanuras y pantanos.

Estos resultados indican la necesidad de incrementar la capacidad hidráulica del dren Victoria, río González y su conexión con la laguna de Mecocacán a fin de evitar la afectación de zonas pobladas en esta región.

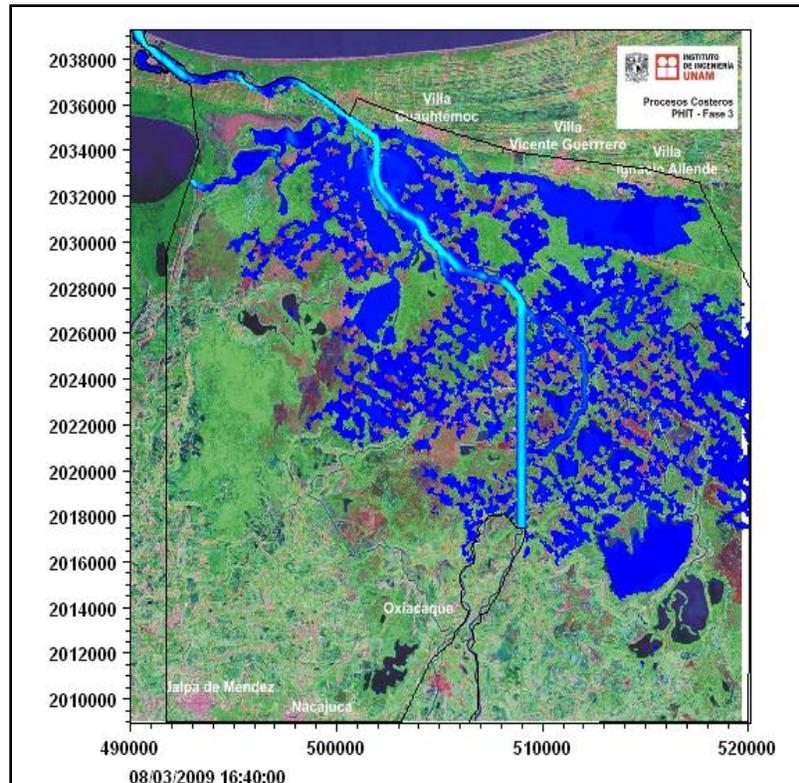


Figura 1.9 Condición final de la alternativa con ampliación de la anchura del Dren Victoria a 365 m. y profundidad de 7.5 m.

1.4 Análisis de las alternativas de alivio en la llanura de inundación

Con el objetivo de complementar el análisis de los resultados presentados en la sección anterior, se presenta la cuantificación de las áreas de inundación obtenidas bajo cada escenario modelado numéricamente. Esto con el fin de establecer una relación de costo/beneficio que señale, aunque sea de forma indicativa, la mejor solución posible de las estudiadas en este trabajo de investigación.

El análisis de las alternativas consiste en lo siguiente:

- Calcular las áreas de inundación para cada alternativa, en su condición final.
- Obtener volúmenes de dragado de acuerdo a la profundidad y anchura utilizadas en la simulación.
- Determinar el costo de dragado para cada alternativa (para ello se utiliza un costo nominal de \$60.00 pesos/m³).
- Comparar resultados de costo y áreas obtenidas para cada alternativa de solución a fin de establecer cuál es la más conveniente.

1.4.1 Cálculo de áreas de inundación

El cálculo de áreas de inundación se realizó para el estado final del sistema, bajo todos los escenarios estudiados. Para ello se utilizó el programa de cómputo AutoCAD, por medio de la escala del dominio de cálculo se trazaron polígonos de inundación para calcular el área inundada indicada en cada resultado de simulación. Los resultados obtenidos de este procedimiento se presentan en la Tabla 4.1, donde se aprecia que no hay un incremento considerable en el área de inundación si se reduce el volumen de dragado. Este resultado es significativo, ya que indica el posible ahorro en este tipo de obra.

Anchura del dren/ cota de dragado	240	300	380	600
7.5m	130.6450	-	123.8763	-
9 m	124.84	122.00	118.06	65.61

Tabla 1.1 Áreas de inundación para cada escenario de alivio simulado en km²

1.4.2 Obtención de volúmenes y costo del dragado

A fin de cuantificar el volumen y costo del dragado propuesto en los escenarios simulados, se determinó de forma indicativa una sección tipo para la ampliación del Dren Victoria.

La Figura 4.10 presenta los perfiles estudiados para la sección transversal del cauce. En color naranja se indica la condición actual del dren con una anchura de 100 m y una profundidad de 5 m. En color rojo se presenta la opción que considera una anchura de 240 m y una profundidad de 9 m; por otra parte, en color amarillo se ilustra la sección correspondiente a un dren de 300 m de anchura y 9 m de profundidad. Por último, en colores marrón y rosa se señalan las secciones para un dren con anchuras de 380 y 600 m respectivamente.

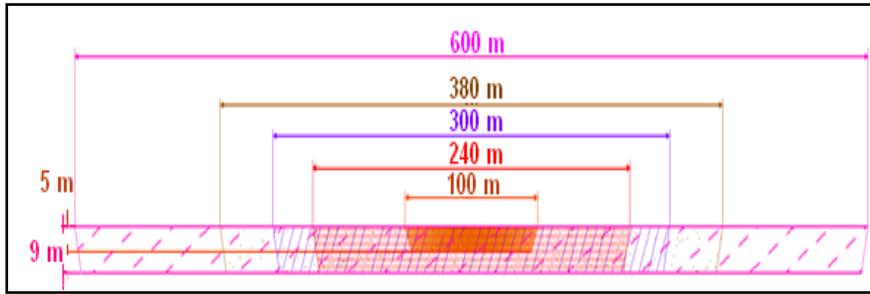


Figura 1.10 Secciones del dren Victoria con diferentes anchuras, con una profundidad de 9 m.

Así mismo, para las condiciones de dragado a una profundidad de 7.5m se calcularon las secciones transversales del dren Victoria. Estas se presentan en la Figura 4.11, en la que en verde se presenta la sección para el dren con anchura de 240 m y en color turquesa se presenta la sección de anchura 365 m.

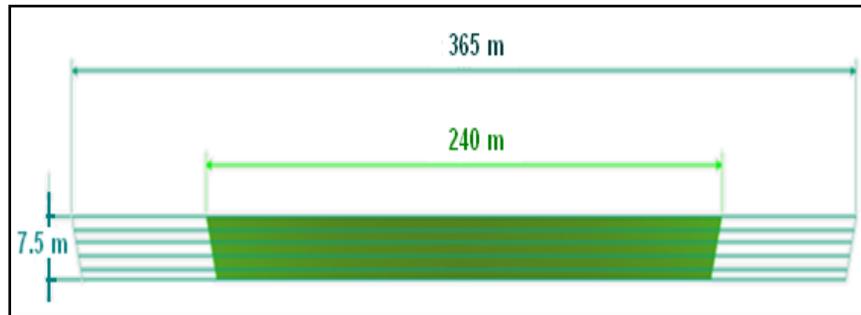


Figura 1.11 Secciones del dren Victoria con diferentes anchuras, con una profundidad de 7.5 m.

Así, el área transversal de dragado se obtuvo por medio del cálculo de las áreas de las secciones del dren menos el área de la sección del dren actual, dada por una anchura de 100 m y profundidad de 5 metros.

Para determinar el volumen de dragado, se multiplicó el área transversal de dragado obtenida por la longitud de dragado propuesta que para todos los casos es idéntica (~20.572 km). Se entiende por dragado a la operación de remoción de sedimentos en ríos, lagos, canales y puertos; con la finalidad de que al aumentar la profundidad, se incremente la capacidad hidráulica. La Tabla 4.2 presenta los resultados derivados para el área de dragado.

Anchura del dren	Área de la Sección (h _{dragado} =9m)	Área por Dragar (h _{dragado} =9m)	Área de la Sección (h _{dragado} =7.5m)	Área por Dragar (h _{dragado} =7.5m)
------------------	---	--	---	--

m	m²	m²	m²	m²
100*	475.00		-	-
240	2,115.00	1,640.00	1,762.50	1,287.50
300	2,655.00	2,180.00	-	-
380	3,375.00	2,900.00	123.8763	123,876,300.00
600	5,355.00	4,880.00	-	-

Tabla 1.2 Áreas de dragado para los diferentes escenarios de alivio propuestos, el renglón correspondiente a 100 m. de anchura representa la condición actual

Para determinar el costo aproximado de la obra propuesta, se utilizó un costo de dragado por metro cúbico de \$60.00 pesos/m³.

La Tablas 4.3 y 4.4 presentan los resultados obtenidos de costo aproximado para cada dren estudiado en este capítulo. Por claridad en la comparación, la Tabla 4.3 incluye el resultado de área de inundación para la condición actual del cauce.

Anchura del dren (m)	Área de inundación Km²	Volumen dragado m³	Costo en millones de \$
100*	229.2596		\$0.00
240	124.8443	33,738,244.00	\$2,024.29
300	122.0015	44,847,178.00	\$2,690.83
380	118.0600	59,659,090.00	\$3,579.55
600	65.6142	100,391,848.00	\$6,023.51

Tabla 1.3 Los valores del área de inundación, el volumen de dragado y el costo para una profundidad de 9 m.

Anchura del dren m	Área de inundación Km²	Volumen dragado m³	Costo en millones de \$
240	130.6450	26,486,578.75	\$1,589.19
365	123.8763	45,772,922.50	\$2,746.38

Tabla 1.4 Los valores del área de inundación, el volumen dragado y el costo para una profundidad de 7.5 m

Con el objetivo de comparar cuantitativamente, el costo, área de inundación y volumen de dragado para cada escenario de alivio simulado, esta sección introduce comparaciones entre estas variables. Esto permitirá determinar cuál de estos escenarios representa el mejor de todos, desde un punto de vista económico y de consecuencias esperadas.

La Figura 4.12 representa la relación entre el área de inundación y la anchura de dragado (para ambas profundidades de dragado estudiadas). La línea discontinua representa los resultados para drenes con profundidades de 9 m, mientras que la línea continua representa los resultados para drenes con profundidad de dragado de 7.5 m. Los resultados presentados indican que para ambas profundidades de dragado, las consecuencias en términos del área de inundación son bastante similares para drenes con anchuras de 240, 300 y 380 m. A pesar de que las áreas de inundación son mayores para drenes con una profundidad de 7.5 metros, la diferencia no es sustancial en términos del área de inundación obtenida. Con lo cual se anticipa una posible reducción en el costo del dren final.

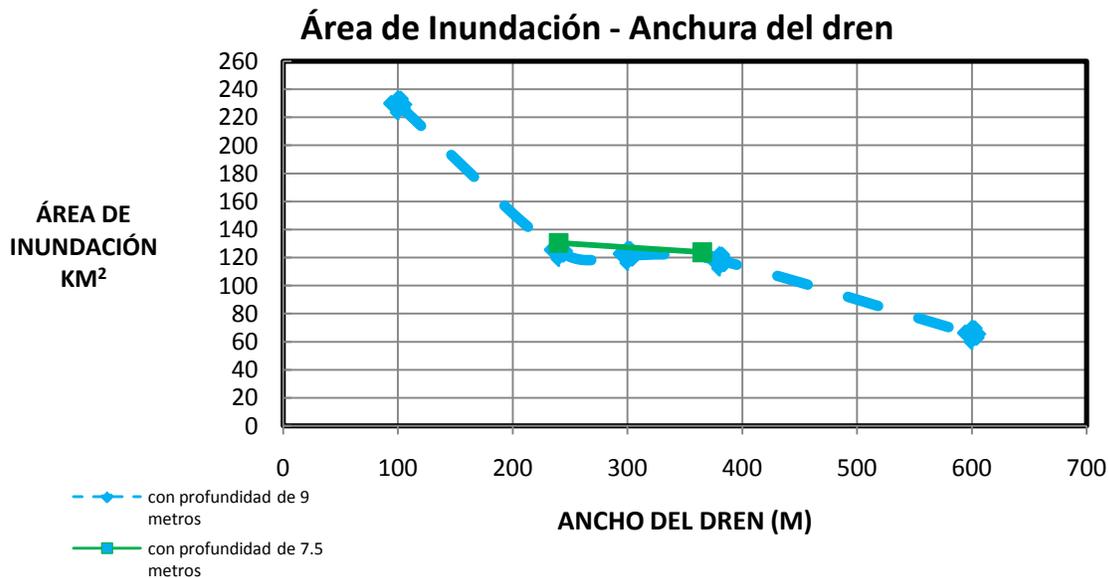


Figura 1.12 Relación entre el área de inundación y la anchura del dren para los escenarios simulados

1.4.3 Relación entre la anchura del dren y el costo de dragado

Por otra parte, es posible relacionar la anchura y profundidad del dren propuesto respecto al costo de dragado que implicaría la generación de una obra de este tipo.

La Figura 4.13 presenta la comparación de los resultados para todas las simulaciones presentadas en esta tesis. Naturalmente, se verifica que a mayor anchura y profundidad del dren propuesto menor inundación pero mayor costo en la obra. Cabe resaltar que se aprecia una relación lineal entre el costo de dragado y las dimensiones del dren, ya que para 600m de anchura se tiene un costo aproximado de \$6,000 MDP. La línea punteada corresponde a la relación obtenida para un dren con profundidad de dragado de 9m, mientras que la línea continua representa la relación obtenida para una profundidad de 7.5m. Como era de esperarse, el costo de un dren de 7.5m es menor al de uno de 9m. Si la

Figura 4.13 se analiza a la luz de los resultados que se presentan en la Figura 4.14, se verifica que para drenes con la misma anchura y distinta profundidad, esta última variable no es determinante en el área de inundación resultante. Esto indica que probablemente es más conveniente construir un dren de menor profundidad a 9m inicialmente propuestos.

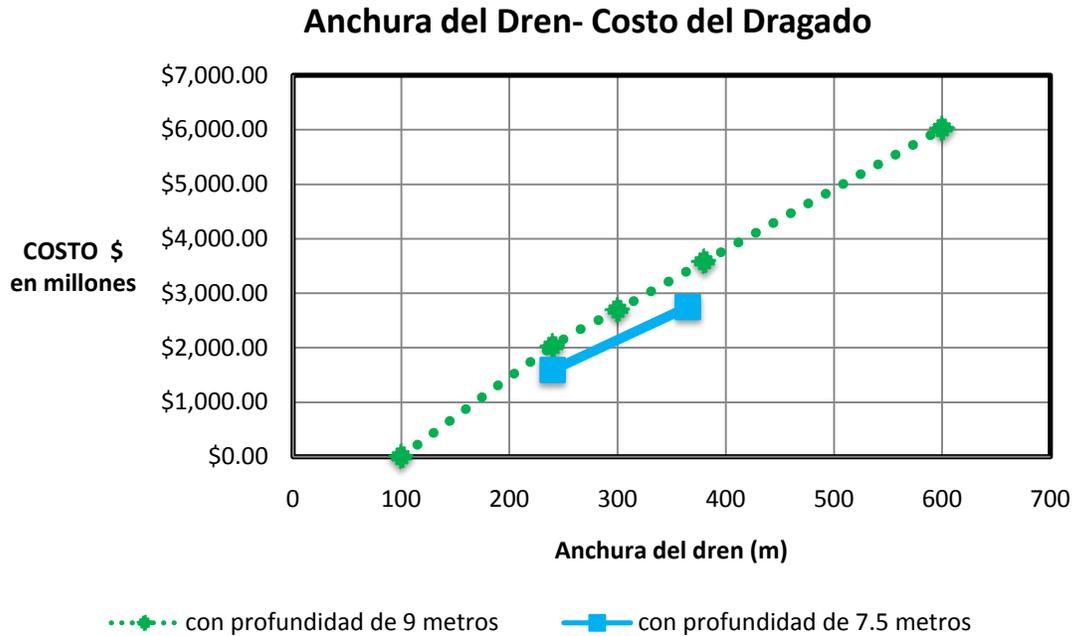


Figura 1.13 Relación entre la anchura del dren y el costo de dragado para los escenarios simulados

1.4.4 Relación del área de inundación y el costo

Por último, una relación que es importante establecer para la determinación de la solución de alivio óptima, es la que corresponde a la dependencia el área de inundación y el costo del dragado.

La Figura 4.14 presenta los resultados asociados a todas las opciones de alivio simuladas dentro de este trabajo de investigación. La línea punteada representa los resultados obtenidos para drenes con profundidad de dragado de 9m, mientras que la línea continua representa los resultados obtenidos para un profundidad de 7.5m. De acuerdo con la comparación de los resultados respecto a costo vs área afectada, se puede concluir que no hay mucha diferencia en el costo entre el dren de 240 m y el de 300 m. Más aún, el dren con una anchura de 240 m y profundidad de 7.5 m, representa la mejor alternativa de todas las estudiadas en este capítulo.

Para drenes de la misma anchura 240m, el área de inundación estimada para un dren con profundidad de 9 m es de 124.84 km², mientras que para uno con una profundidad de 7.5 m, resulta una superficie de inundada de 130.645 km². La

diferencia entre ambas áreas de inundación es de 5.8 km². Sin embargo, la diferencia respecto a los costos calculados es significativa dado que un dren con profundidad de 9 m tendría un costo de \$2,024.29 millones, mientras que uno con profundidad de 7.5 m cuesta \$1,589.19 millones. Ubicando la diferencia entre ambas inversiones en \$435 millones.



Figura 1.14 Relación entre el área del dren y el costo del dragado para los escenarios simulados