



ANEXO 2

ANALISIS HIDROLÓGICO – HIDRÁULICO DE CRUCES DE RIOS Y QUEBRADAS DE DUCTOS QUE TRANSPORTAN HIDROCARBUROS



INDICE

| | | |
|-------|--|---|
| 1.0 | INTRODUCCION | 3 |
| A. | Análisis Hidrológico | 3 |
| B. | Análisis Hidráulico | 3 |
| 2.0 | PROCEDIMIENTO RAPIDO DE ANALISIS | 4 |
| 2.1 | ANÁLISIS HIDROLÓGICO | 4 |
| 2.1.1 | Recopilación de información básica secundaria (cartografía, datos hidrometeorológicos, otros estudios disponibles en la región) | 4 |
| 2.1.2 | Recopilación de información específica de la cuenca y del sitio de cruce (geometría y características del sitio y sus alrededores, características del lecho y márgenes, implantación del ducto, características de la cuenca y los cursos de agua, uso del suelo, cobertura vegetal, etc.) | 4 |
| 2.1.3 | Procesamiento de la información básica y estimación de crecidas para diferentes periodos de retorno | 5 |
| 2.2 | ANÁLISIS HIDRÁULICO | 5 |
| 2.2.1 | Recopilación de información específica del sitio de cruce y alrededores (secciones transversales de flujo y playas de inundación en la sección de cruce y aguas arriba y abajo del sitio, pendiente promedio del lecho principal del río o quebrada, características de los materiales del lecho, playas de inundación y márgenes, dimensiones e implantación del ducto en el cruce, etc.) | 5 |
| 2.2.2 | Modelación hidráulica de la sección de flujo y alrededores | 5 |
| 2.2.3 | Simulación de la situación hidráulica ante la ocurrencia de crecidas con diferentes periodos de retorno | 5 |
| 2.2.4 | Predicción de la ocurrencia de procesos de erosión, socavación y otros, y estimación de su magnitud. | 6 |
| 3.0 | PROCEDIMIENTO DETALLADO DE ANALISIS | 6 |
| 3.1 | ANÁLISIS HIDROLÓGICO | 6 |
| 3.1.1 | Recopilación de información básica secundaria (cartografía, imágenes satelitales, datos hidrometeorológicos, otros estudios disponibles en la región) | 6 |
| 3.1.2 | Recopilación de información específica de la cuenca y del sitio de cruce (geometría y características del sitio y sus alrededores, características del lecho y márgenes, implantación del ducto, características de la cuenca y los cursos de agua, uso del suelo, cobertura vegetal, etc.) | 6 |
| 3.1.3 | Procesamiento de la información básica y estimación de crecidas para diferentes periodos de retorno | 7 |
| 3.2 | ANÁLISIS HIDRÁULICO | 8 |
| 3.2.1 | Recopilación de información específica del sitio de cruce y alrededores (secciones transversales de flujo y playas de inundación en la sección de cruce y aguas arriba y abajo del sitio, pendiente promedio del lecho principal del río o quebrada, características de los materiales del lecho, playas de inundación y márgenes, dimensiones e implantación del ducto en el cruce o segmento paralelo, etc.) | 8 |
| 3.2.2 | Modelación hidráulica de la sección de flujo y alrededores | 8 |
| 3.2.3 | Simulación de la situación hidráulica ante la ocurrencia de crecidas con diferentes periodos de retorno | 8 |
| 3.2.4 | Predicción de la ocurrencia de procesos de erosión, socavación y otros, y estimación de su magnitud. | 9 |



1.0 INTRODUCCIÓN

Este documento presenta paso a paso el procedimiento de análisis Hidrológico – Hidráulico del comportamiento de ríos o quebradas que son cruzados por ductos que transportan hidrocarburos. Los métodos descritos pueden ser aplicados de igual manera para el análisis de segmentos o tramos de ríos o quebradas por cuyas laderas discurren segmentos de ductos, ya sea enterrado o sobre la superficie, cuya ubicación en las laderas o planos paralelos se encuentre bajo la influencia del régimen hidráulico de los ríos o quebradas.

Una sección determinada de un río o quebrada (sección de control) por donde cruza un ducto que transporta hidrocarburos en general (líquidos, gases, u otros) está sujeta a peligros o riesgos (erosión, socavamiento, degradación del canal, invasión o corte, avulsión) por la crecida de las aguas a consecuencia de lluvias intensas en la cuenca de aporte, y al arrastre de sedimentos (gruesos y finos), palos y restos vegetales (palizadas). La subida del nivel de las aguas, la fuerza de la corriente, eventualmente reforzada por el arrastre de materiales, ha de afectar al medio de flujo (geometría de la sección de flujo), en función de las características de dicha sección (dimensiones y forma geométrica, características de los materiales que la componen, etc.). Del mismo modo, dicha subida de las aguas, va a tener efectos sobre el ducto que transporta hidrocarburos, en función a las características del cruce (aéreo o enterrado, ubicación de pilares de soporte, altura de descuelgue del ducto en un cruce aéreo, profundidad de entierro de un cruce enterrado, características del propio ducto, etc.).

A continuación se detallan los tipos de información y datos requeridos y los pasos principales que se deben dar para realizar el análisis de la ocurrencia de eventos de crecida de los ríos y quebradas en los sitios de cruce de los ductos (Análisis Hidrológico), y para analizar las consecuencias de dichos eventos sobre la sección de flujo y sobre el ducto que la atraviesa (Análisis Hidráulico).

A. Análisis Hidrológico

- A.1 Recopilación de información básica secundaria (cartografía, imágenes satelitales, datos hidrometeorológicos, otros estudios disponibles en la región).
- A.2 Recopilación de información específica de la cuenca y del sitio de cruce (geometría y características del sitio y sus alrededores, características del lecho y márgenes, implantación del ducto, características de la cuenca y los cursos de agua, uso del suelo, cobertura vegetal, etc.).
- A.3 Procesamiento de la información básica y estimación de crecidas para diferentes periodos de retorno.

B. Análisis Hidráulico

- B.1 Recopilación de información específica del sitio de cruce y alrededores (secciones transversales de flujo y playas de inundación en la sección de cruce y aguas arriba y abajo del sitio, pendiente promedio del lecho principal del río o quebrada, características de los materiales del lecho, playas de inundación y márgenes, dimensiones e implantación del ducto en el cruce o segmento paralelo, etc.).
- B.2 Modelación hidráulica de la sección de flujo y alrededores.
- B.3 Simulación de la situación hidráulica ante la ocurrencia de crecidas con diferentes periodos de retorno.
- B.4 Predicción de la ocurrencia de procesos de erosión, socavación y otros, y estimación de su magnitud.

Con base en los resultados de los análisis hidráulicos, se podrán establecer los potenciales efectos a que estará sujeto el sitio de cruce o segmento paralelo y el ducto frente a la ocurrencia de crecidas con diferentes periodos de retorno, lo que permitirá calificar el nivel de riesgo o probabilidad de falla en función de los periodos de retorno críticos.



El nivel de detalle y sofisticación con que se realicen los análisis hidrológicos e hidráulicos, dependen del detalle y confiabilidad de la información básica disponible y levantada para cada cuenca (y alrededores) y para cada sitio de interés (sitio de cruce y alrededores). En los siguientes capítulos de este anexo se presentan dos procedimientos de análisis, uno rápido (Capítulo 2) y otro detallado (Capítulo 3), cada uno con diferente nivel de detalle de los datos e información básica requeridos.

2.0 PROCEDIMIENTO RAPIDO DE ANÁLISIS

2.1 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

2.1.1 Recopilación de información básica secundaria (cartografía, datos hidrometeorológicos, otros estudios disponibles en la región)

El propósito es recolectar datos de la cuenca, como cartas IGM 1:50.000 o 1:250.000, que permitan delinear su superficie, forma, longitudes de los ríos principales, pendiente promedio, etc.

Entre los datos hidrometeorológicos, se requieren datos de precipitaciones máximas diarias anuales en estaciones dentro y lo más cercanas posible a la cuenca, así como datos de caudales en ríos de la cuenca o cercanos a ella. Es muy probable sin embargo, que no se encuentren datos de caudales en las zonas de estudio.

En caso de existir estudios hidrológicos en la cuenca u otras cuencas en la zona, es recomendable recopilarlos y revisarlos.

2.1.2 Recopilación de información específica de la cuenca y del sitio de cruce (geometría y características del sitio y sus alrededores, características del lecho y márgenes, implantación del ducto, características de la cuenca y los cursos de agua, uso del suelo, cobertura vegetal, etc.)

Será necesario realizar una visita al sitio de cruce y alrededores y, en lo posible, realizar un reconocimiento de las partes accesibles de la cuenca.

La visita al sitio de cruce es necesaria para realizar un levantamiento rápido de las características del sitio y alrededores. Durante la visita se deberán documentar los hallazgos con múltiples fotografías, croquis y toma de datos geográficos de puntos relevantes con GPS. Entre otros, será necesario levantar la siguiente información por métodos sencillos:

- Forma de la sección transversal de flujo en el sitio de cruce y en secciones hacia aguas arriba y aguas abajo (dimensiones aproximadas de la sección, que se pueden medir con huinchas manuales o reglas graduadas).
- Caracterización visual de los materiales del lecho, playas de inundación y orillas (tipo y tamaño de los materiales de arrastre, sedimentos y material del basamento; presencia de vegetación, tamaño, densidad, etc.; señales de arrastre de materiales vegetales y sedimentos, marcas en las orillas, troncos de árboles o estructuras existentes; etc.).
- Estimación de la pendiente promedio del lecho principal de flujo (en dirección del flujo).
- Implantación de las obras de cruce del ducto (tipo y dimensiones de las estructuras de cruce, ubicación del ducto, etc.).

El reconocimiento de las partes accesibles de la cuenca es necesario para obtener información respecto a:

- La cobertura vegetal y uso actual del suelo.
- Presencia de cárcavas, derrumbes y signos visibles de erosión.



- Presencia de acumulaciones de restos de vegetación en orillas y cauces y signos visibles que sugieran la potencial formación de palizadas.
- Obtención de relatos orales de habitantes de la cuenca respecto de su régimen y comportamiento hidrológico – hidráulico (ocurrencia de crecidas, niveles de agua, inundaciones, arrastre de materiales, etc.).

La información obtenida puede ser volcada en fichas y mapas topográficos y/o temáticos de la cuenca (en caso de estar disponibles).

2.1.3 Procesamiento de la información básica y estimación de crecidas para diferentes periodos de retorno

En caso de existir suficiente cantidad de datos de caudales máximos instantáneos anuales en alguna estación hidrométrica de la cuenca, se deberá explorar la posibilidad de realizar un análisis de frecuencia y estimar por extrapolación estadística los caudales pico en el sitio de medición para diferentes periodos de retorno. Luego, se podría estimar los caudales pico correspondientes en los sitios de cruce mediante relaciones (empíricas) de áreas, como el conocido método del coeficiente de la raíz cuadrada de la relación de áreas, u otros sugeridos en la literatura especializada.

En caso de no existir datos de caudales de crecida, será necesario optar por realizar estimaciones indirectas basadas en el análisis estadístico de las precipitaciones, mediante la obtención de curvas Precipitación – Duración – Frecuencia, y aplicar subsecuentemente métodos corrientes de estimación de crecidas para diferentes periodos de retorno, como el método racional, y/u otros.

2.2 ANÁLISIS HIDRÁULICO

2.2.1 Recopilación de información específica del sitio de cruce y alrededores (secciones transversales de flujo y playas de inundación en la sección de cruce y aguas arriba y abajo del sitio, pendiente promedio del lecho principal del río o quebrada, características de los materiales del lecho, playas de inundación y márgenes, dimensiones e implantación del ducto en el cruce, etc.)

Para un análisis hidráulico rápido, se propone la utilización del método de la sección y pendiente, asumiendo flujo uniforme. Los datos que se requieren son básicamente la forma de la sección transversal de flujo en el sitio de cruce, con la implantación del ducto, la estimación de la pendiente promedio del lecho de flujo en el sitio y una estimación de la rugosidad promedio de la sección (n de Manning u otra). Estos datos pueden ser levantados y estimados en la sección de cruce del ducto durante la visita al sitio utilizando huinchas métricas manuales, GPS, inclinómetros, etc.

2.2.2 Modelación hidráulica de la sección de flujo y alrededores

La modelación hidráulica es sencilla y consiste simplemente en la aplicación de la ecuación de Manning, Manning-Strickler u otra de uso común para flujo uniforme. Actualmente existe una diversidad de paquetes computacionales que permiten además la representación gráfica de la sección y el cálculo de algunos parámetros hidráulicos como el Número de Froude, velocidad de flujo, tirante, etc.

2.2.3 Simulación de la situación hidráulica ante la ocurrencia de crecidas con diferentes periodos de retorno

Utilizando los caudales pico de crecida para diferentes periodos de retorno determinados de acuerdo a lo descrito en la sección 2.1.3, y aplicando los métodos descritos en la sección 2.2.2, se pueden derivar los tirantes hidráulicos y otros parámetros (velocidad de flujo, fuerza del agua contra estructuras, etc.) correspondientes a cada caudal de crecida, y establecer de este modo la situación del segmento de ducto que cruza el curso de agua o del segmento de ducto paralelo.



2.2.4 Predicción de la ocurrencia de procesos de erosión, socavación y otros, y estimación de su magnitud.

Una vez realizadas las simulaciones de la situación hidráulica ante la ocurrencia de crecidas descritas en el punto anterior, para caudales pico críticos de crecida identificados, utilizando los parámetros hidráulicos derivados (velocidades de flujo, tirante de agua, pendiente del río, etc.) y las características de los materiales del lecho y playas de inundación, es posible realizar estimaciones iniciales de posibles procesos de erosión, socavación y otros, a consecuencia de la acción del agua. Dichas estimaciones se pueden realizar aplicando fórmulas empíricas derivadas para este tipo de procesos disponibles en la bibliografía. Diversos paquetes computacionales como el HEC-RAS, ofrecen también la posibilidad de realizar este tipo de análisis aplicados.

3.0 PROCEDIMIENTO DETALLADO DE ANÁLISIS

3.1 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

3.1.1 Recopilación de información básica secundaria (cartografía, imágenes satelitales, datos hidrometeorológicos, otros estudios disponibles en la región)

El propósito es recolectar datos de la cuenca, como cartas 1:50.000 o 1:250.000, que permitan delinear su superficie, forma, longitudes de los ríos principales, pendiente promedio, etc. Del mismo modo, si se dispone de imágenes satelitales, será importante obtener los formatos fuente para su procesamiento y apoyo en la obtención de mapas temáticos, como ser: cobertura vegetal y uso del suelo, tipo de suelo, mapa geológico y geomorfológico, modelo digital del terreno y mapa de pendientes, mapa de riesgos de erosión, y otros.

Entre los datos hidrometeorológicos, se requieren datos de precipitaciones máximas diarias anuales en estaciones dentro y lo más cercanas posible a la cuenca y datos de niveles y caudales en ríos de la cuenca o cercanos a ella. Es muy probable sin embargo, que no se encuentren datos de caudales en las zonas de estudio.

En caso de existir estaciones con registros continuos de lluvia (pluviógrafos), es recomendable obtener datos para duraciones menores que 1 día. Lo más recomendable es obtener los datos fuente (originales), como ser bandas pluviográficas, o registros digitales originales, para su procesamiento con el propósito de intentar obtener curvas Precipitación – Duración – Frecuencia características. Del mismo modo, es recomendable recopilar datos de temperatura, evaporación, humedad relativa, etc.

En caso de existir estudios hidrológicos en la cuenca u otras cuencas en la zona, es recomendable recopilarlos y revisarlos.

3.1.2 Recopilación de información específica de la cuenca y del sitio de cruce (geometría y características del sitio y sus alrededores, características del lecho y márgenes, implantación del ducto, características de la cuenca y los cursos de agua, uso del suelo, cobertura vegetal, etc.)

Será necesario realizar una visita al sitio de cruce y alrededores y, en lo posible, realizar un reconocimiento de las partes accesibles de la cuenca.

La visita al sitio de cruce es necesaria para realizar un levantamiento detallado de las características del sitio y alrededores. Durante la visita se deberán documentar los hallazgos con múltiples fotografías, croquis y toma de datos geográficos de puntos relevantes con GPS. Entre otros, será necesario levantar la siguiente información:

- Levantamiento topográfico mediante nivelación de secciones transversales de flujo en el sitio de cruce y en secciones hacia aguas arriba y aguas abajo (la cantidad de secciones y la distancia entre ellas se deberá definir en función a las características de cada cruce). Este levantamiento



se deberá realizar utilizando una referencia local o un mojón del IGM con coordenadas x, y, z conocidas (coordenadas locales u oficiales del IGM).

- Caracterización visual de los materiales del lecho, playas de inundación y orillas (tipo y tamaño de los materiales de arrastre, sedimentos y material del basamento; presencia de vegetación, tamaño, densidad, etc.; señales de arrastre de materiales vegetales y sedimentos, marcas en las orillas, troncos de árboles o estructuras existentes; etc.).
- Toma de muestras de materiales característicos del lecho (sedimentos) y del agua con contenido de material en suspensión en caso de ser posible, para obtener datos de la distribución granulométrica de los materiales arrastrados.
- Implantación de las obras de cruce y de los segmentos paralelos del ducto (dimensiones de las estructuras de cruce, ubicación del ducto, eventual profundidad de entierro, etc.)

El reconocimiento de las partes accesibles de la cuenca es necesario para obtener información respecto a:

- La cobertura vegetal y uso actual del suelo.
- Tipo de suelo, espesor de la capa arable y del suelo erosionable.
- Presencia de cárcavas, derrumbes y signos visibles de erosión.
- Presencia de acumulaciones de restos de vegetación en orillas y cauces y signos visibles que sugieran la potencial formación de palizadas.
- Obtención de relatos orales de habitantes de la cuenca respecto de su régimen y comportamiento hidrológico – hidráulico (ocurrencia de crecidas, niveles de agua, inundaciones, arrastre de materiales, etc.).

3.1.3 Procesamiento de la información básica y estimación de crecidas para diferentes periodos de retorno

El propósito de esta tarea, es generar caudales pico de crecida para diferentes periodos de retorno, según criterio a definir con YPFB Transporte S.A. (podría abarcar el rango entre 5 y 100 años), en todos los sitios de cruce y secciones típicas o críticas de segmentos de paralelos del ducto.

En primera instancia, se deberá controlar la consistencia y confiabilidad de los datos disponibles. En caso necesario, se deberán corregir y rellenar datos faltantes utilizando técnicas corrientes (dobles masas acumuladas, regresión lineal, etc.).

En caso de que los datos disponibles en la zona de cada sitio de interés lo permitan, se ajustarán modelos Precipitación – Caudal a partir de los cuáles se podrá derivar hidrogramas unitarios (por ejemplo del tipo SCS, Clark, Snyder, u otros). Luego, con los datos de precipitación diaria o de mayor resolución disponibles, se elaborarán tormentas hipotéticas para los periodos de retorno mencionados, en base al análisis de frecuencia de las precipitaciones máximas diarias anuales y aplicando métodos de desagregación y ajuste de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, y se podrán determinar los hidrogramas de crecida correspondientes utilizando por ejemplo el paquete HEC – HMS del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.

Cuando no se disponga de registros de caudales que permitan la ejecución de los análisis descritos en el párrafo anterior, la magnitud de los caudales pico podrá ser estimada utilizando también el paquete HEC – HMS, pero en base a las mejores estimaciones posibles de parámetros hidrológicos empíricos, o basados en referencias de otros estudios. Complementariamente, se podrá realizar la estimación de caudales pico aplicando métodos sencillos como el Método Racional, así como indicadores regionales de crecidas medidas o calculadas en otros estudios para cuencas similares en la región.



3.2 ANÁLISIS HIDRÁULICO

3.2.1 Recopilación de información específica del sitio de cruce y alrededores (secciones transversales de flujo y playas de inundación en la sección de cruce y aguas arriba y abajo del sitio, pendiente promedio del lecho principal del río o quebrada, características de los materiales del lecho, playas de inundación y márgenes, dimensiones e implantación del ducto en el cruce o segmento paralelo, etc.)

La información específica a ser recolectada fue detallada en la sección 3.1.2.

3.2.2 Modelación hidráulica de la sección de flujo y alrededores

Para complementar el estudio de la magnitud de los caudales de crecida en los diferentes sitios de interés, se realizará la modelación hidráulica de la geometría y condiciones de flujo, que permite estimar los caudales de crecida para diferentes periodos de retorno, a partir de características geométricas de segmentos o Tramos del cauce de ríos o quebradas, combinadas con características hidráulicas asociadas a dicha geometría (coeficientes de contracción/expansión y rugosidad, y condiciones de borde).

Para este propósito, el procedimiento a seguir para la modelación hidráulica es el siguiente:

- Con base en el levantamiento topográfico a lo largo del cauce, contará con secciones transversales, perpendiculares al eje del lecho del Río o Quebrada.
- En las secciones transversales de cada Tramo considerado, se establecerán las coordenadas del eje, y se medirán e identificarán las alturas de las marcas dejadas por las aguas a consecuencia de crecidas pasadas (marcas en los bordes y, principalmente, ramas secas que quedan colgando en los árboles y arbustos en los márgenes).
- Luego, los datos de cada Tramo, serán introducidos (por ejemplo) al paquete de simulación hidráulico HEC-RAS del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, el cual permite simular los perfiles de agua o curvas de remanso en condiciones de flujo permanente.
- El paquete HEC-RAS está disponible vía Internet, de manera gratuita, cuenta con manuales de uso y Referencias Técnicas con ejemplos de aplicaciones, y es muy amigable para su uso interactivo.
- Por otro lado, este paquete permite modelar situaciones especiales de la geometría y características hidráulicas, como angostamientos, implantación de obras, flujo a través de alcantarillas, puentes, etc.

3.2.3 Simulación de la situación hidráulica ante la ocurrencia de crecidas con diferentes periodos de retorno

Luego de la modelación descrita en la sección anterior, se pueden simular las características de flujo en los tramos de interés, utilizando el paquete HEC-RAS. Este paquete permite simular los perfiles de agua o curvas de remanso para caudales dados, en condiciones de flujo permanente.

El modelo HEC-RAS es una adaptación para WINDOWS del modelo HEC II del Hydrologic Center del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de Norte América. El modelo utiliza la ecuación de balance de energía para determinar los tirantes de agua, en tanto que las pérdidas de carga debido a fricción son calculadas utilizando la fórmula de Manning.

El paquete HEC-RAS es ampliamente utilizado para la simulación de flujo en cauces naturales, además el software permite calcular el escurrimiento incorporando una serie de estructuras en o sobre el río, que modifican las condiciones de flujo.



Para cada caudal de crecida con un periodo de retorno dado en cada sitio o segmento paralelo, se pueden simular las condiciones de flujo y obtener diversos resultados, entre ellos, los tirantes de agua, la distribución de velocidades de flujo, el tipo de flujo, la energía y fuerza del agua, etc.

3.2.4 Predicción de la ocurrencia de procesos de erosión, socavación y otros, y estimación de su magnitud.

Utilizando el paquete HEC-RAS o algún otro paquete disponible, y con base en los resultados de las simulaciones del flujo descritas en la sección anterior, se pueden predecir (estimar) los procesos de erosión, socavación, avulsión y otros, en los tramos o segmentos de ríos y/o quebradas estudiados. Para el efecto, es necesario introducir a los modelos las características del terreno (tipo de suelo, granulometría, espesor o potencia de la cubierta, coeficientes de probabilidad y velocidad límite de arrastre, etc.). De esta manera, es posible establecer los caudales en cada segmento de interés, que ocasionarán problemas inaceptables.

Una gran facilidad de los paquetes como el HEC-RAS, es que se pueden también simular las consecuencias de intervenciones para prevenir y controlar la ocurrencia de dichos procesos.