

4. HIDROLOGÍA

El estudio detallado de los efectos del proyecto sobre el régimen hídrico es vital dentro del EIA. También es imprescindible garantizar la seguridad del proyecto ante eventos hidrológicos extremos. En este apartado se describen los puntos más relevantes en relación al agua y se recomiendan metodologías para el análisis.

4.1. ASPECTOS HIDROLOGICOS

El papel del agua como elemento indispensable de vida y como componente básico del entorno es innegable y está presente en muchas de las actividades humanas ya sea de explotación como de uso de los recursos y se ha convertido en un elemento integrador en la organización del territorio desde el punto de vista de la cuenca como unidad territorial.

Toda actividad que se desarrolle sobre el agua tiene consecuencias en la parte física del elemento, pero también desde el punto de vista biológico y socioeconómico debido a su uso. Ante este escenario se hace necesario generar conocimiento sobre el recurso, su entorno y sus diferentes usos y así tener las herramientas requeridas para evaluar detalladamente las posibles afectaciones de un proyecto sobre el régimen hídrico. Pero también se hace imprescindible por ejemplo garantizar la seguridad del proyecto ante eventos hidrológicos extremos como crecidas o sequías.

El objetivo de este apartado consiste en describir los puntos más relevantes que deben considerarse en el campo hidrológico y además en recomendar metodologías para el análisis.

4.1.1. Caracterización morfológica de la cuenca

Una cuenca es un área de terreno donde el agua y los sedimentos drenan hacia un punto común. La cuenca representa un sistema dinámico. También se puede definir como el "Área territorial natural, definida por divisorias

topográficas, cuyas aguas de drenaje de escorrentía superficial, se concentran en una estación o punto de un río o lago, definido previamente por conveniencia, según propósito de uso del agua”.

Una cuenca hidrográfica puede ser dividida en sub, mini y micro-cuencas, con áreas definidas por conveniencia y relativas unas a otras.

El manejo de cuencas puede ser definido como: “La actividad ordenada y planificada que desarrolla el hombre dentro de un área física conocida como cuenca hidrográfica para aprovechar los recursos naturales, buscando una producción óptima y sostenida, que resulte en un incremento en el bienestar social y económico del hombre (calidad de vida)”.

La cuenca puede caracterizarse por su morfología a través de parámetros físicos, los cuales reflejan las características de la forma de la cuenca y su respuesta ante las precipitaciones. La caracterización también ayuda en el análisis del medio ya que define posibilidades y restricciones de uso en la unidad de análisis, por ejemplo la configuración de la red de drenaje condiciona la escorrentía, los procesos erosivos y de transporte de sedimentos

La morfología queda definida por tres tipos de parámetros como son la forma, relieve y red hidrológica. (Figura No. 4.1.)

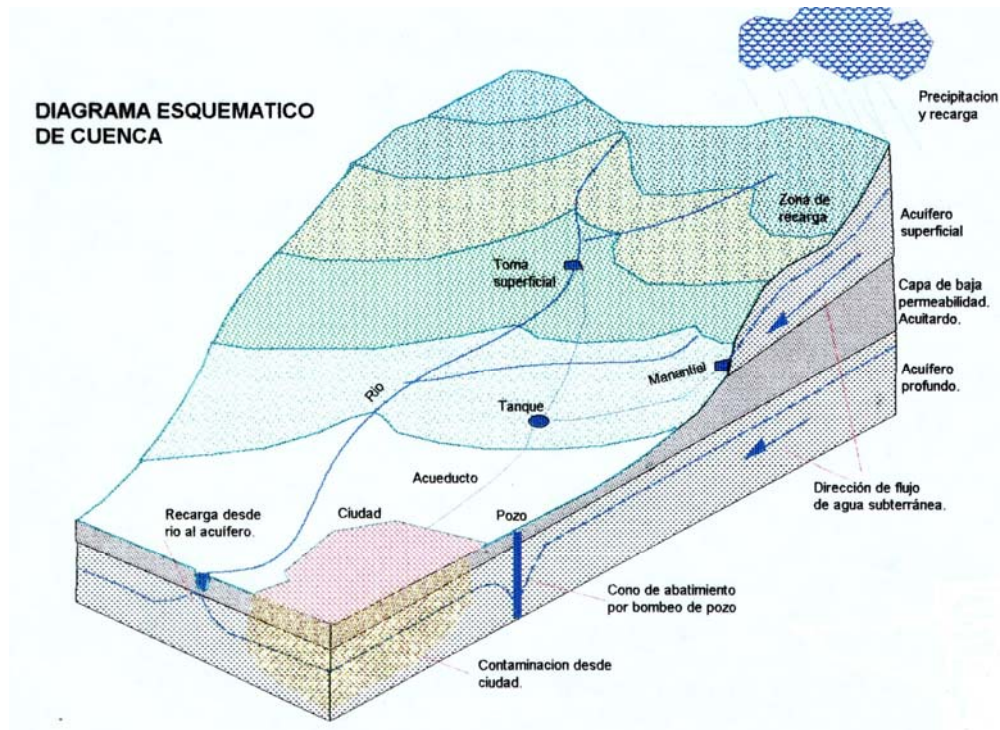


Figura 4.1. Esquema general de cuenca hidrográfica.

4.1.2. Parámetros de forma

- Índice de compacidad de Gravelius: relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de otra cuenca circular de la misma superficie y está expresada por:

$$K = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Donde: P es el perímetro de la cuenca (m), A el área de la cuenca (m^2)

4.1.3. Parámetros de relieve

- Curva hipsométrica: representa la distribución de la superficie en función de la altura. Esta curva se puede relacionar con parámetros climáticos que a su vez dependen de la elevación como por ejemplo la precipitación y la temperatura.

- Elevaciones máxima, mínima y media, definida como la altitud con frecuencia de 50% en la curva hipsométrica.
- Perfil longitudinal de los cursos de agua: perfil donde en las abscisas se da las longitudes del cauce y en las ordenadas la elevación del fondo.

4.1.4. Parámetros de la red hídrica

- Número de orden: uno de los primeros elementos es el orden de la cuenca y para esto se cuenta con dos clasificaciones reconocidas como son las de Strahler y Horton, las cuales miden el grado de bifurcación de las corrientes de agua. El método se basa en la numeración y conteo de las corrientes de agua para obtener así una jerarquización de la red de drenaje.
- Densidad de drenaje: es otra propiedad esencial de la cuenca que fue definida por Horton y es un indicador de la eficiencia del drenaje del estado erosivo. La relación establece que a mayor densidad de drenaje más rápida la respuesta ante la precipitación evacuándose el agua en menor tiempo. Está definida de la forma siguiente:

$$D = \frac{\sum L_i}{A}$$

Donde: L_i es la longitud de los cursos de agua, A es el área de la cuenca.

- Pendiente media

$$f = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \times 100$$

Donde: H_{\max} : elevación máxima(m), H_{\min} la elevación mínima(m), L es la longitud del cauce principal(m).

- Tiempo de concentración(t_c): se define como el tiempo que tarda en llegar a la sección de salida la gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca. Para determinarlo se usan fórmulas experimentales como la de Kirpich, la cual ha sido reseñada por varios autores entre ellos Maidment(1992) y Chow(1992)

4.1.5. Estimación del caudal

La determinación de la cantidad del agua en un determinado sitio puede hacerse de forma directa por medio de aforos o bien a partir de los registros de caudal de estaciones hidrológicas. Para cualquier estudio es necesario contar con registros extensos que permitan analizar las variaciones temporales del caudal tanto a nivel medio como de caudales extremos y que le den representatividad a las condiciones de la zona estudiada. En el país la única red hidrológica es la que ha desarrollado el ICE y cuenta con registros de hasta 50 años.

4.1.5.1. Balance Hídrico

Un principio que debe regir todo estudio hidrológico es el balance hídrico, que no es más que la contabilidad de los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico como la precipitación, evapotranspiración, escorrentía, infiltración, los almacenamientos subterráneos y cambios en la humedad del suelo.

Si bien en Costa Rica no se cuenta con información detallada de todos los procesos indicados anteriormente, se cuenta con la información de precipitación, evaporación(en algunas zonas) y caudal, a partir de la cual se pueden obtener coeficientes de escorrentía para determinar la relación entre estos dos componentes del ciclo hidrológico.

4.1.5.2. Caudal generado por una cuenca

La determinación del caudal para un sitio dado puede hacerse a partir de diferentes métodos y dependerá del objetivo que se busque, ya sea un análisis de caudales promedio o bien de extremos. Los métodos se pueden clasificar en empíricos, estadísticos, hidrológicos y modelos matemáticos. Es necesario recalcar que en la hidrología se requiere de años para lograr registros representativos en la zona de estudio por lo que, de contarse con estaciones hidrológicas cercanas, es preferible usar sus registros en lugar de aforos puntuales.

4.1.5.3. Métodos empíricos

Estos modelos están orientados principalmente a la obtención de caudales máximos y son de aplicación muy simple. Las fórmulas están relacionadas principalmente con parámetros morfológicos como el área, la pendiente y el tiempo de concentración. Un ejemplo es la fórmula de Creager, muy utilizada por su sencillez, la cual utiliza únicamente el valor del área de la cuenca:

$$Q = 1.303C_c (0.386A)^{\frac{0.936}{0.048}}$$

Q es el caudal pico (m³/s), **C_c** es el coeficiente de Creager y **A** es el área de la cuenca. La fórmula de Creager se usa frecuentemente para el traslado de caudales desde una cuenca cercana, suponiendo que el coeficiente es el mismo en ambas cuencas.

Jiménez y Chacón (1998) hicieron un análisis de una gran cantidad de estaciones hidrológicas y obtuvieron el coeficiente de Creager en función del período de retorno. Esta referencia puede ser muy útil en cuencas sin información.

4.1.5.4. Métodos estadísticos

Se aplican generalmente cuando se cuenta con un registro largo y se usan en los análisis de frecuencia tanto de caudales máximos como mínimos. En estos se aplican diferentes distribuciones para obtener los diferentes periodos de retorno. Como referencia, el departamento de Hidrología del ICE ha determinado que las distribuciones que mejor se han ajustado a las series de caudales son: la General de Extremos directa e indirecta y la Pareto. Otras que podrían aplicarse son la Log Pearson y la Pearson III. Además, una distribución como la Gumbel no se recomienda en el caso de máximos. En los casos de uso de distribuciones siempre es requerido que se presente un gráfico con la distribución y las series observadas para evaluar la bondad de ajuste.

4.1.5.5. Métodos hidrológicos

Se usan cuando no se cuenta con series de caudales y se trata de establecer relaciones entre la precipitación y la esorrentía.

Uno de los métodos más conocidos es el método racional el cual se aplica en cuencas pequeñas donde la distribución espacial y temporal de lluvia sea uniforme. En términos generales la ecuación está dada por:

$$Q = \frac{CiA}{3.6}$$

Donde: **Q** es el caudal pico (m³/s), **C** es el coeficiente de esorrentía que depende de las características del suelo y su uso principalmente, **i** es la intensidad de la precipitación para una duración y periodo de retorno dados (mm/h), **A** área de la cuenca (km²)

En este caso, la información de intensidades puede generarse a partir de los registros instantáneos de precipitación en caso que se tengan o bien podría

recurrirse a curvas de intensidad duración y frecuencia como las generadas por Vharson et al.(1992) para las principales ciudades del país:

Alajuela:

$$209.844 - 38.7305 \ln(T) + (42.614 - 24.6041 \ln \ln(T)) \ln(Tr)$$

Liberia:

$$200.556 - 35.9234 \ln(T) + (44.1334 - 7.499721 \ln(T)) \ln(Tr)$$

Limón:

$$155.052 - 25.8865 \ln(T) + (21.7857 - 3.13747 \ln(T)) \ln(Tr)$$

San José:

$$166.097 - 29.6018 \ln(T) + (20.3018 - 2.79158 \ln(T)) \ln(Tr)$$

Cartago:

$$156.892 - 28.4612 \ln(T) + (42.2027 - 8.0731 \ln(T)) \ln(Tr)$$

Puntarenas:

$$175.645 - 29.5811 \ln(T) + (34.0524 - 5.321261 \ln(T)) \ln(Tr)$$

Otro método es el de área-precipitación, que se usa para traslado de caudales, que establece que el caudal hasta un sitio de interés está dado por la relación entre el área-precipitación de un sitio conocido y el área-precipitación hasta el sitio de estudio. Este método puede aplicarse siempre que se cuente con el registro de una estación base para el traslado y que se cumplan semejanzas entre cuencas a nivel del régimen de lluvias y factores morfológicos. El método es recomendable para el traslado de caudales medio y no de caudales instantáneos.

4.1.5.6. Modelos matemáticos

Consisten en la modelación y simulación de caudales, en los cuales se incorporan rutinas matemáticas para describir los procesos y relaciones precipitación-escorrentía básicamente. Entre los modelos más utilizados se encuentra el HEC HMS por su simpleza, que no es un modelo continuo, se utiliza para definir caudales y volúmenes de crecientes. El método se basa en establecer la respuesta de una cuenca ante un evento de precipitación y obtener el caudal por medio de tres parámetros básicos como las pérdidas iniciales, el número de curva y tiempo al pico de la creciente.

En el país se han usado otros modelos como el HBV que es continuo y permite simular el caudal para varios años. En todos los casos se requiere de información básica de las cuencas y registros de lluvia y caudal como mínimo hasta otros parámetros como evaporación y flujos subterráneos.

4.1.6. Caudal de diseño

En una zona tropical como la nuestra se presentan eventos climatológicos repentinos que producen lluvias torrenciales extraordinarias. Dichos eventos se traducen en avenidas que inundan o dañan estructuras o áreas de cultivo. La magnitud de esos eventos varía con el tiempo.

En el diseño de obras de protección o en la revisión de vulnerabilidad se requiere de la adopción de un caudal. Normalmente ese caudal estará asociado a un período de retorno. No se puede construir una obra para resistir la avenida máxima posible porque dicha avenida es difícilmente pronosticable y además encarecería significativamente el proyecto. El procedimiento normal es asumir un riesgo de falla que dependerá de la importancia de la obra.

En Costa Rica no existe ninguna normalización al respecto, aunque diferentes instituciones solicitan el diseño de obras para períodos de retorno

determinados. En el diseño se debe adoptar caudales conservadores ya que hay una gran incertidumbre en la información disponible.

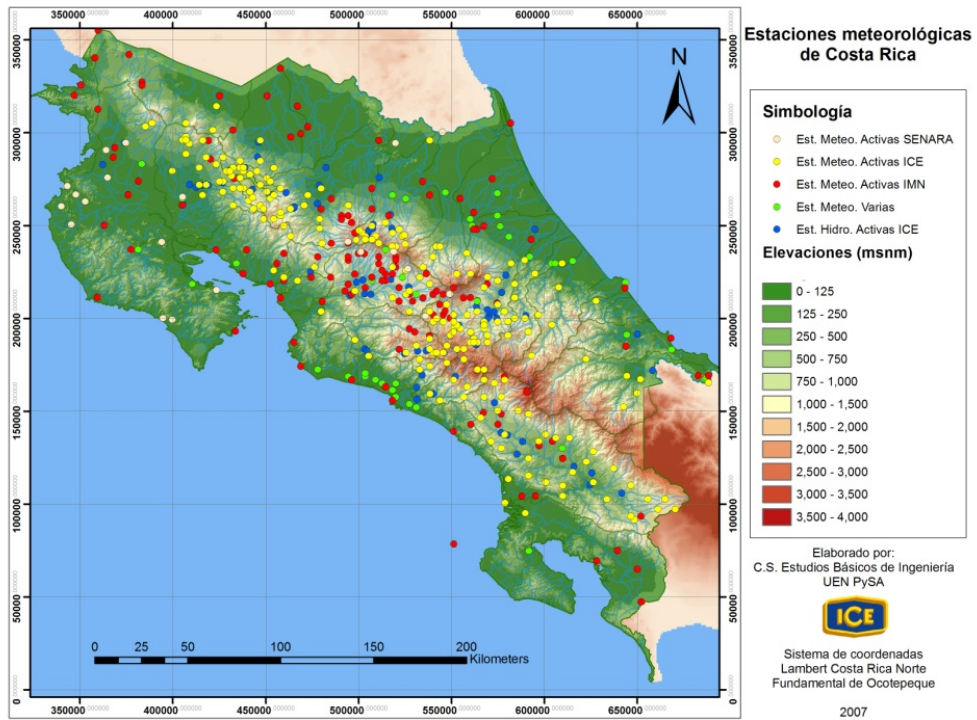
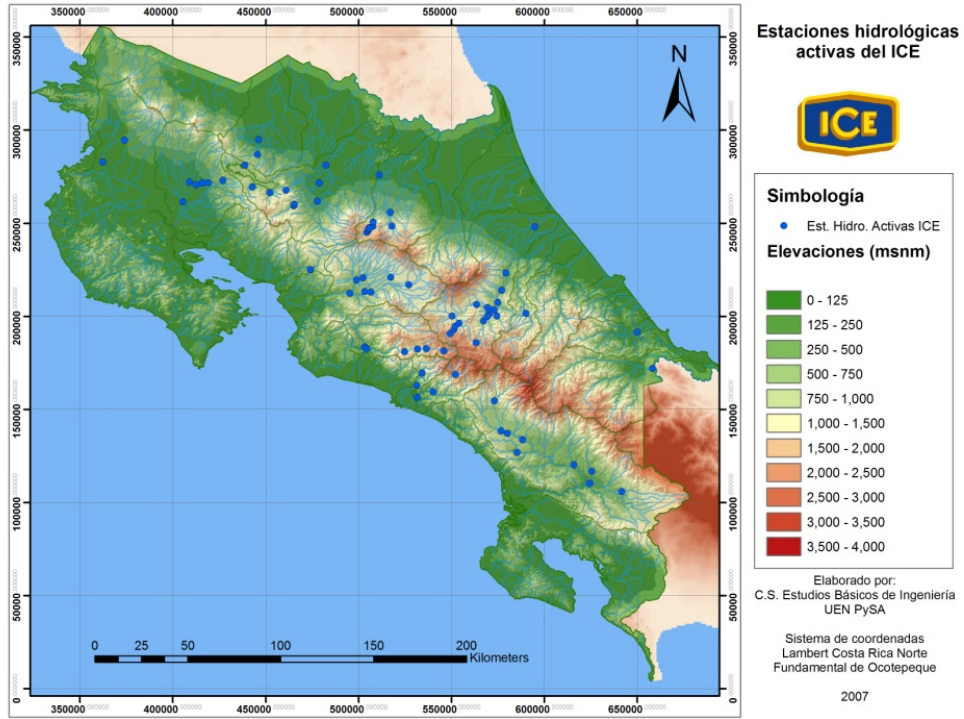
Se recomienda que en el estudio del proyecto se tomen en cuenta caudales con períodos de retorno de 1, 2, 5, 10, 25, 50 y 100.

Los períodos de retorno de 1 y 2 años son útiles para caracterizar el río. Caudales de 5 a 10 años se aplican en el diseño de obras pequeñas como alcantarillas o desvíos temporales. Los períodos de retorno mayores se usan en obras mayores como diques, puentes o cálculo de niveles de inundación, en los que se debe disminuir el riesgo de falla.

4.1.7. Redes de medición

La medición de los diferentes componentes del recurso hídrico se lleva a cabo por medio de redes establecidas por diferentes instituciones del país. Actualmente se cuenta con dos redes principales: una hidrometeorológica operada por el ICE y otra meteorológica operada por el IMN. La primera cuenta con 100 estaciones hidrológicas y 250 meteorológicas. Por su lado, el IMN tiene 200 estaciones en activas.

La distribución de las estaciones hidrológicas se presenta en la figura 1- y la de las estaciones meteorológicas se presenta en la figura 1- donde se han incluido las estaciones de otras instituciones como SENARA.



4.1.8. Caudales de compensación

Cuando los caudales son regulados para un fin específico como riego o generación hidroeléctrica, se requiere de un caudal que sea capaz de mantener los ecosistemas y los diferentes usos del agua.

Existe una gran variedad de métodos para determinar el caudal que recibe diferentes denominaciones: mínimos aceptables, óptimos, de mantenimiento, entre otros, esto de acuerdo con el método utilizado para su cálculo. Sin embargo, se debe destacar que la metodología seleccionada debe analizar al menos tres componentes: el régimen de caudal durante el estiaje, análisis de frecuencia de caudales mínimos y variaciones estacionales; el hábitat con los caudales actuales lo cual permitirá determinar los requerimientos de las diferentes especies y finalmente, se debe considerar los usos que se hacen del agua. Por lo tanto la metodología deberá ligar la disponibilidad del recurso con los diferentes requerimientos tanto biológicos como de uso.

4.1.9. Análisis de Sedimentos

Los sedimentos transportados por una corriente representan una variable morfológica muy importante. Se han identificado 2 tipos de transporte de sedimentos: transporte en suspensión y transporte de por el fondo. En la práctica es importante diferenciar entre estos dos tipos de transporte ya que tienen características y papeles diferentes en la morfolología de un cauce.

En el transporte en suspensión las partículas se desplazan en toda la profundidad del flujo. El tamaño de sedimento en suspensión depende de la energía del flujo pero normalmente se limita a arenas. Sedimentos finos como los limos y las arcillas viajan siempre en suspensión y se les llama sedimento de lavado y que su origen está en la erosión laminar del suelo. El sedimento en suspensión tiene un papel fundamental en la formación de planicies de inundación.

El transporte de fondo consiste en el arrastre de partículas gruesas como gravas, cantos rodados y bolones. También puede haber presencia de arena. El volumen de sedimento grueso transportado depende de la producción que haya en la cuenca.

Cuando el flujo tiene energía suficiente se dan los dos tipos de transporte al mismo tiempo e incluso partículas que viajaban por el fondo pueden ser movidas en suspensión.

4.1.9.1. Sedimento en suspensión

El sedimento viaja en suspensión cuando la energía del flujo es suficiente como para levantar las partículas del fondo y distribuir las a lo largo del tirante. La suspensión de las partículas inicia cuando la velocidad de cortante es mayor o igual a la velocidad de caída. La velocidad de cortante es un parámetro que se obtiene al sacar raíz cuadrada a la división del esfuerzo cortante entre la densidad del agua. El nombre de este parámetro se debe a que las unidades resultantes son de velocidad (m/s) y representa la intensidad de la turbulencia.

$$v^* = \sqrt{ghS}$$

v^* es la velocidad de cortante (m/s), g es la aceleración de la gravedad, h la profundidad del flujo y S la pendiente de la línea de energía.

La velocidad de caída es la velocidad con la que precipita el sedimento en agua sin movimiento. La velocidad de caída depende de la forma y el diámetro de las partículas. Este parámetro se puede calcular o tomar de gráficos existentes (Rijn, 1993).

La forma más confiable de cuantificar el transporte en suspensión es mediante el análisis del registro de mediciones. La medición se hace tomando muestras en la sección donde se puede aforar el caudal o existe una curva de caudales. A las muestras se le mide la concentración de sedimentos y se asocian al

caudal líquido. En las estaciones hidrológicas del ICE se hacen mediciones de sedimento que pueden ser solicitadas y usadas en el estudio del proyecto.

A partir de las mediciones se encuentra una relación entre caudal y concentración de sedimento en suspensión. Esta relación se aplica a la curva de duración de caudal líquido para obtener el volumen anual de sedimento en suspensión. Entre menor sea el período de integración del caudal mayor será la precisión del cálculo, se ha encontrado que usando caudales horarios el resultado puede hasta un 30% mayor al obtenido con caudales diarios. La razón está en que en el caudal diario se promedian avenidas instantáneas que pueden transportar altas concentraciones de sedimentos.

Nótese que en la medición del sedimento en suspensión se incluye el sedimento fino o de lavado. La proporción de sedimento de lavado en una muestra de sedimento en suspensión puede variar entre 50 y 90%.

Cuando no existen mediciones y el lecho del río es de arena, normalmente en el tramo aluvial, se puede hacer uso de ecuaciones empíricas para calcular el sedimento en suspensión. (Se recomienda Rijn, 1993).

4.1.9.2. Sedimento de fondo

El sedimento de fondo es fundamental en la estimación de la estabilidad de un cauce ya que este puede provocar el abandono o la migración lateral del alineamiento actual.

Es necesario obtener la granulometría del sedimento de fondo para establecer la resistencia al flujo y estimar la capacidad de transporte. Estos dos aspectos podrían implicar dos muestras diferentes de sedimentos, la primera del lecho activo y la segunda del sedimento transportado.

En ríos con material granular entre arenas y gravas se puede obtener la curva granulométrica a través del método volumétrico. Para tamaños mayores es

recomendable adoptar el método sugerido por Wolman o alguna variante de muestreo superficial. Teóricamente ambas metodologías son comparables.

El método de Wolman consiste en la medición de 100 partículas dentro del lecho. Estas partículas se levantan a cada paso, de la punta del pie, y se mide su diámetro medio. La curva granulométrica se construye dibujando el diámetro contra el porcentaje de la frecuencia por rangos. Bray(2000) sugiere usar diámetros estandarizados para facilitar la comparación de casos. Estos diámetros son coincidentes con los de las cuadrículas usadas para el muestreo volumétrico convencional: 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512 y 1023 mm.

Existen variantes del método de Wolman que se aplican en ríos donde no es seguro entrar al cauce o cuando lo que se busca es sedimento recientemente transportado, sin acorazamiento.

Cuando el tamaño mayor del sedimento en el área de muestreo es menor a 0.25 m se puede aplicar el método fotográfico. Usando una escala de tamaño, se traza una cuadrícula en la fotografía y se miden las partículas en los puntos de la misma. Si el tamaño máximo es mayor a 0.25 m se puede extender una cinta métrica en el sitio y se mide una piedra por ejemplo cada metro.

Si el lecho del río está compuesto por arenas el tamaño de las partículas es uniforme y normalmente el flujo puede satisfacer la capacidad de arrastre. Cuando el lecho está compuesto por sedimento mixto o hay una graduación amplia del sedimento se forma una capa o coraza superficial que limita el transporte para caudales bajos. El mismo proceso de transporte se diferencia en los dos tipos de lecho.

Dependiendo de la distribución de tamaños se puede presentar el fenómeno de acorazamiento del lecho. El acorazamiento del lecho consiste en un entramamiento de las partículas en la capa superficial; causado por el arrastre selectivo de partículas finas. Este proceso se produce cuando la desviación estándar geométrica del sedimento es superior a 2. El transporte de fondo se producirá solo cuando el caudal pueda romper dicha capa y por ello se deberá

aplicar ecuaciones de cálculo que tomen en cuenta este aspecto. Si se usa una fórmula que no incluya el efecto de acorazamiento se obtendrá una sobre estimación del sedimento transportado por el fondo.

No es posible calcular en forma exacta el volumen transportado por el fondo ya que este depende del tamaño, la disponibilidad y del caudal. Sin embargo, se puede hacer una estimación de la capacidad de arrastre a través de fórmulas empíricas. Existe una gran cantidad de ecuaciones para la estimación del arrastre de fondo y se recomienda usar al menos 3 de ellas para hacer la comparación de los resultados. Se debe tener cuidado con los resultados ya que algunas fórmulas funcionan muy bien bajo unas circunstancias pero dan resultados inaceptables en otras.

Para el caso de ríos con lechos de arena, en la parte aluvial, se sugiere el uso de la fórmula de Meyer-Peter-Muller y la de Engelund-Hansen. La primera es representativa del transporte por el fondo mientras que la segunda fue obtenida a partir de situaciones donde se produce tanto el transporte en suspensión como por el fondo y se recomienda para evaluar el transporte total.

Si el lecho está compuesto por gravas o material más grueso se debe usar ecuaciones derivadas para esa situación y que tomen en cuenta la posibilidad del arrastre selectivo y el acorazamiento. La ecuación de Schoklitsch ha mostrado buenos resultados en diferentes investigaciones y es muy fácil de aplicar. Bathurst et al. (1987) modificó adoptó la aproximación de Schoklitsch y usando datos de laboratorio obtuvo la siguiente expresión para el inicio del movimiento:

$$q_c = 0.15g^{0.5}D_{50}^{1.5}S^{-1.12}$$

Donde q_c es el caudal por unidad de ancho requerido para iniciar el movimiento de las partículas del fondo, g es la aceleración de la gravedad, D_{50} es el diámetro para el cual el 50% del sedimento es menor y S es la pendiente de la línea de energía.

La capacidad de transporte de fondo se estima con la expresión original de Schoklitch:

$$q_{sb} = \frac{2.5}{s} S^{1.5} (q - q_c)$$

Donde q_{sb} es el caudal sólido unitario ($m^3/s/m$), s es la densidad específica del sedimento, q es el caudal líquido por unidad de ancho y q_c el caudal unitario crítico. En este método se está suponiendo que el tamaño del sedimento es uniforme y que se puede representar con el D_{50} . Sin embargo, se debe tener presente que dicha suposición implica el movimiento de todas las partículas al mismo tiempo y puede producir una sobre estimación del transporte. Esto se puede mejorar calculando el caudal crítico en cada rango de tamaños en la curva granulométrica y calculando el aporte individual.

4.2. ASPECTOS HIDRAULICOS

En ese punto se aplican los resultados del estudio hidrológico para analizar los parámetros hidráulicos de una corriente como: velocidad media, tirante hidráulico, esfuerzo cortante, ancho superficial. De los resultados se puede caracterizar la corriente y establecer su grado de estabilidad.

4.2.1. Niveles de inundación y parámetros hidráulicos

En el caso de que el proyecto esté cerca de un cauce se debe garantizar que este no se vea afectado por avenidas extremas. Para el caudal de diseño se debe calcular el perfil del agua en el tramo de estudio. El primer paso en esta etapa es revisar los mapas de amenazas naturales generados por la CNE. En esos mapas se incluye información muy valiosa para el estudio del proyecto.

El cálculo de la superficie del agua se puede hacer tanto para condiciones permanentes (caudal fijo) o no permanentes (hidrograma). Para la revisión del

nivel de inundación es más conveniente el cálculo de uso de caudal permanente porque es más fácil y requiere de menor información. Sin embargo, en casos como el diseño de estanques de amortiguamiento en proyectos urbanísticos se debe obtener un hidrograma sintético o medido que permita dimensionar la obra de retención.

Los caudales instantáneos a revisar se sugirieron en el apartado de Hidrología.

Existen varios métodos y programas para el cálculo del perfil del agua pero se debe revisar que el que se elija este representando correctamente la situación en estudio.

Para el cálculo del perfil del agua se recomienda modelar un tramo de cauce que abarque como mínimo una longitud de 4 veces el ancho del cauce principal o en su defecto la longitud de cauce dentro del área de proyecto. Las condiciones de frontera deben escogerse en forma tal que no afecten sensiblemente el nivel de agua estimado. En ausencia de condiciones de frontera adecuadas se deberá elegir la que produzca la condición más conservadora.

Para representar la geometría del canal se debe levantar secciones topográficas transversales al cauce, que tengan incluido el lecho activo y abarquen la planicie de inundación o que alcancen el nivel de avenidas extraordinarias pasadas. El espaciamiento entre secciones debe variar de acuerdo a las características del sitio pero se aconseja usar al menos un ancho de cauce como separación.

La resistencia al flujo debe ser cuantificada para calcular el tirante de agua en una sección. La resistencia se divide en dos tipos: resistencia de grano y resistencia de forma. La resistencia de grano es causada por la rugosidad del lecho mientras que la resistencia de forma se produce localmente por obstrucción.

En condiciones normales la resistencia es gobernada por la rugosidad del cauce y esta debe ser estimada con cuidado. Normalmente en nuestro país se usa el coeficiente de Manning para este objetivo y se pueden encontrar muchas referencias para su estimación. Sin embargo, se puede presentar el caso en que la resistencia de forma es mayor a la de grano. La resistencia de forma es causada por el proceso de transporte de fondo y se manifiesta en perturbaciones del lecho como dunas, rizos y antidunas en lechos arenosos o barras laterales o centrales en ríos con sedimento grueso. Esta última es difícil de estimar en forma global dentro del tramo de estudio.

Del cálculo de los perfiles de inundación se obtienen los parámetros hidráulicos suficientes para hacer la caracterización morfológica siguiente. Estos parámetros son: velocidad media, tirante hidráulico, esfuerzo cortante, ancho superficial y área.

Si el proyecto implica un cambio en la escorrentía del área deben revisarse los niveles de inundación con el aumento del caudal correspondiente y comparar los parámetros hidráulicos en las dos situaciones.

4.2.2. Variables morfológicas actuales (sin proyecto) y futuras (con proyecto) del cauce receptor

En el EIA es necesario conocer la situación actual de los cauces cercanos al proyecto. Los objetivos son evaluar la vulnerabilidad del proyecto y monitorear los cambios generados en el futuro. Un río es un sistema continuo y los efectos de un proyecto mal concebido pueden presentarse a varios kilómetros de las obras.

Las características de un canal natural van cambiando desde su nacimiento hasta su desembocadura. La longitud total se puede dividir en tramos para facilitar el análisis. La división se puede hacer con base en la pendiente y/o la longitud entre afluentes significativos. A nivel macro se puede dividir un río en tres tramos: superior o de montaña, medio o transición e inferior o aluvial

(llanura). En nuestro país los tramos son cortos debido a la cercanía entre la cordillera y la costa.

El tramo de estudio directo será aquel dentro del cual se localiza el proyecto. Dependiendo del tipo de proyecto puede ser necesario el análisis de los tramos aguas arriba y aguas abajo. Por ejemplo, la construcción de un dique elimina el amortiguamiento natural de la avenida en la llanura de inundación y aumenta el caudal hacia aguas abajo; una presa aumenta la deposición de sedimentos y el nivel del agua hacia aguas arriba y erosión hacia aguas abajo.

4.2.2.1. Caracterización morfológica

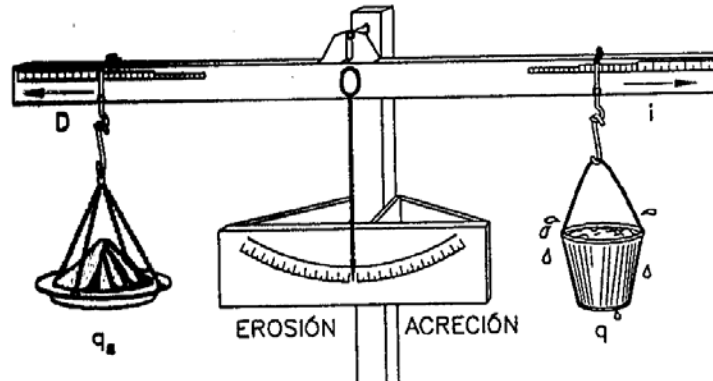
Un río tiene en principio 5 variables morfológicas: caudal, sedimento transportado, sección transversal, perfil longitudinal (pendiente) y forma en planta. Dentro del sedimento transportado se encuentran el volumen y el diámetro característico del mismo. Algunos investigadores consideran las variables morfológicas como grados de libertad.

De las variables indicadas el caudal y el sedimento corresponden a variables independientes y las demás son variables dependientes. Esto es, ante cualquier perturbación artificial o natural habrá un ajuste en las variables dependientes. Las variables independientes son propias de la cuenca. En algunos casos la geología puede restringir el cambio o adaptación de las variables dependientes.

El balance de Lane de 1955 es una forma muy simple de ver la interrelación entre las variables. Matemáticamente se escribe como una relación del producto del volumen anual de sedimentos, el tamaño del sedimento y el ancho y el producto del caudal y la pendiente:

$$V_s DB \Leftrightarrow QS$$

En forma gráfica se muestra como una balanza donde un cambio en una de las variables provoca la inclinación y por lo tanto la reacción en las variables del otro extremo.



En la figura podemos observar que si se extrae sedimento la balanza se inclina hacia la derecha y para compensar el desbalance debe reducirse la pendiente a través de un proceso de erosión.

Una forma de convertir el balance cualitativo de Lane en cuantitativo es suponiendo el equilibrio del sistema y resolviendo simultáneamente las ecuaciones que intervienen. Klassen(1995) resolvió las ecuaciones de continuidad, resistencia al flujo, transporte de sedimento y obtuvo los coeficientes del balance de Lane. Julien (2002) siguió un procedimiento similar y encontró relaciones para calcular el cambio en las variables dependientes.

Cada variable se debe evaluar tanto cualitativa como cuantitativamente para poder caracterizar el río:

Caudal Formativo: El caudal es muy variable en el tiempo y por ello se usa el concepto de caudal formativo o caudal dominante que es un caudal conceptual que se asocia a la forma y tamaño de la sección transversal del río. Algunos investigadores recomiendan usar el caudal que llena el cauce como caudal formativo que coincide muchas veces con el caudal con período de retorno entre 1.5 y 5 años. Otros recomiendan usar el caudal efectivo que es el caudal que transporta la mayor cantidad de sedimento durante el año. Cuando la

sección lo permite se recomienda usar el caudal a cauce lleno, antes de que el río se desborde, como caudal formativo; si la sección no presenta planicies de inundación (río de montaña) se puede suponer el caudal de 2 años de periodo de retorno.

Sedimento Transportado: El sedimento puede ser transportado por lecho del cauce o en suspensión dependiendo de la capacidad de arrastre o la energía del flujo. La capacidad de transporte se estima usando ecuaciones empíricas o a través de mediciones directas. Desde el punto de vista morfológico el sedimento en suspensión solo es importante en la parte aluvial del río, en la formación de planicies de inundación, pero tiene poca relevancia en la formación del cauce. En la estimación del transporte de sedimento se debe contar con la granulometría representativa del sedimento disponible.

Sección Transversal: La geometría de la sección está representada por la profundidad y el ancho superficial. Estos dos parámetros se obtienen de las secciones transversales levantadas en el tramo de estudio para el caudal formativo.

Forma en Planta: La forma en planta se refiere al alineamiento horizontal del río. Este puede ser de meandros o trezado y/o ramificado cuando tiene varios canales. Fallas geológicas o afloramientos rocosos influyen la forma en planta. Existen varias ecuaciones para determinar la forma en planta con base en la pendiente, de estas la más usada es la de Lepold y Wolman:

$$S = 0.013Q_b^{-0.44}$$

S es la pendiente del fondo y **Q_b** es el caudal a cauce lleno (m³/s). Si la pendiente actual del tramo es mayor a la obtenida de la ecuación el río debería tener forma en planta trezada y si es menor seguirá un patrón de meandros. La forma en planta se evalúa a partir de mapas y fotografías aéreas.

Perfil Longitudinal: El perfil longitudinal indica el cambio en la pendiente del cauce que está asociado la energía del flujo. Afloramientos rocosos

representan controles verticales que limitan la variación del perfil. Los cambios bruscos en la pendiente se asocian a controles geológicos o a sitios de erosión activa. El perfil se puede obtener a partir del levantamiento topográfico o de mapas con curvas de nivel.

4.2.2.2. Estabilidad del cauce

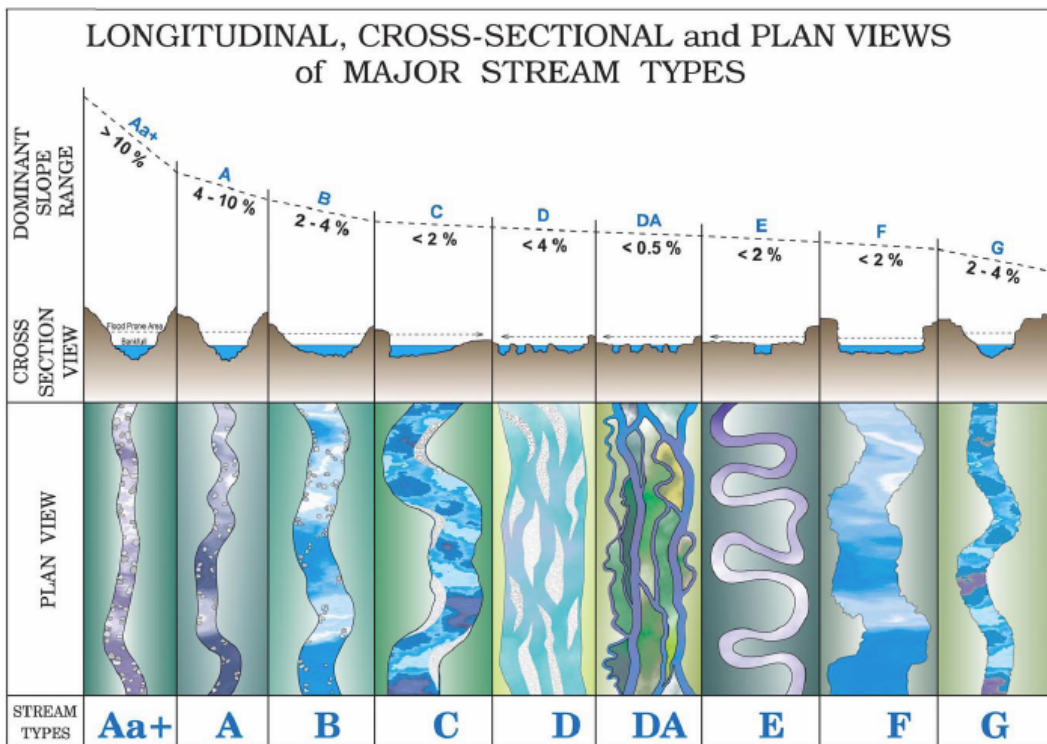
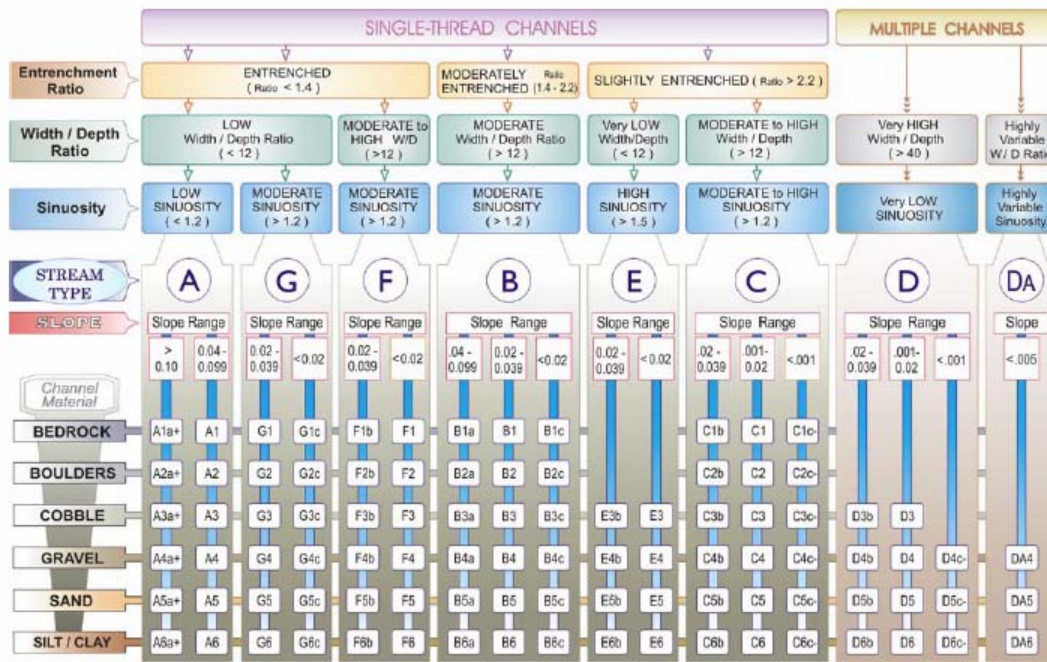
Un aspecto importante es interpretar el proceso predominante en el tramo en estudio. En un tramo estable hay un equilibrio entre la capacidad de transporte y la cantidad de sedimento producido. Cuando el proceso de transporte es mayor a la producción de sedimento o a la cantidad disponible se tendrá erosión. En el caso contrario habría acreción. El proyecto puede ser afectado por alguno de estos procesos o acelerar negativamente los mismos.

La observación en sitio de las características morfológicas del cauce ayuda a establecer la situación del tramo. Es común el uso de fórmulas de régimen para analizar la estabilidad de un tramo. Estas fórmulas se encuentran en la literatura y son el resultado del análisis estadístico de las características morfológicas en ríos con tramos estables que se consideran estables. Igual que con otros procedimientos se debe tener cuidado de analizar si las condiciones del tramo en estudio están dentro del rango de aplicación de las fórmulas. El autor a utilizado las fórmulas de régimen de Hey-Thorne (1986) con resultados satisfactorios en ríos con sedimento mixto y pendientes entre 0.1 a 5%.

En tramos aluviales se recomiendan las ecuaciones de Lacey que han sido muy difundidas en textos de la especialidad.

Otro método para determinar el grado de estabilidad de un tramo es la aplicación de un método de clasificación. Estos métodos son basados en la observación de ríos y la mayoría de las veces son aplicables a nuestros ríos. Actualmente la clasificación más popular es la propuesta por Rosguen en 1996. En dicha clasificación se obtiene el grado de estabilidad del tramo y hasta una

idea de la tendencia a largo plazo usando como datos de entrada la pendiente y la relación del ancho a la profundidad. En las figuras siguientes se muestra el esquema de clasificación de Rosgen.



4.3. Referencias

Aparicio, F. (1993). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. LIMUSA, México.

Bathurst, J. C., Graf, W. H. and Cao, H.H. (1987). "Bed load discharge equations for steep mountain rivers". In *Sediment Transport in Gravel Bed Rivers*, (Thorne, Bathurst and Hey, eds.), Chap. 15, John Wiley and Sons, U. K.

Bray, D. I. (1982). "Regime equations for gravel bed rivers". *Gravel Bed Rivers* (eds. R. Hey, J. Bathurst, C. Thorne), Chap. 19, John Willey and Sons Ltd., U. K.

Chin, C., Melville, B. and Raudkivi, A. (1994). "Streambed Armouring". *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 120, No. 8.

Chow, V.T., Maidment, D., y Mays, L., (1988), "Applied Hidrology", McGraw-Hill Publishing Co.

Cunge, J., Holly, F. and Verwey, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. PITMAN, London.

Hey, R. (1987). "River dynamics, flow regime and sediment transport". In *Sediment Transport in Gravel Bed Rivers*, (Thorne, Bathurst and Hey, eds.), Chap. 2, John Wiley and Sons, U. K.

Hey, R. and Thorne, C. (1986). "Stable channels with mobile gravel beds". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 8, Aug.

Leopold, B., Wolman, M. and Miller, J.(1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. Dover Publications, New York.

Kellerhals, R. (1982). "River regulation and channel stability". In *Gravel Bed Rivers* (eds. R. Hey, J. Bathurst, C. Thorne), Chap. 25, John Willey and Sons Ltd., U. K.

Klassen, G. R. (1995). *River Dynamics, Lecture Notes*. IHE, Delft, The Netherlands.

Parker, G. (1990). "Surface based bed load transport relation for gravel rives". *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 28, No. 4.

Remenieras, G. *Tratado de Hidrología Aplicada*. Editores Técnicos Asociados. 1971 Barcelona.

Rijn, L. C. van (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, Coastal Seas and Oceans*. Aqua Publications, Amsterdam.

Simons, D. B. and Li, R. (1982). "Bank Erosion on Regulated Rivers". In *Gravel Bed Rivers*. (R. D. Hey, J. C. Bathurst and C. R. Thorne, eds.). Chap. 26 John Wiley and Sons. U.K.

Thorne, C., Hey, R. and Newson, M.(1997). *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley & Sons. UK.

USACE (1970). *Hydraulic Design of Flood Control Channels*. Washington.

Vide, J. (2003). *Ingeniería de Ríos*. Alfaomega, México.

White, W.R. and Day, T.J. (1982). "Transport of graded gravel bed material". In *Gravel Bed Rivers*. (R. D. Hey, J. C. Bathurst and C. R. Thorne, eds.). Chap. 8 John Wiley and Sons. U.K.

WEB

AJDesignsoftware.http://www.ajdesigner.com/phptimeconcentration/izzard_equation_time_concentration.php.

Instituto Meteorológico Nacional: <http://www.imn.ac.cr>

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Prevención Emergencias:
<http://www.cne.go.cr>