

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA EN LA JURISDICCIÓN DE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA - CAR



Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca– CAR
Subdirección de Administración de Recursos Naturales y Áreas Protegidas
República de Colombia

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

CONTENIDO

1	ANTECEDENTES.....	3
2	MARCO NORMATIVO	3
3	DEFINICIONES	7
3.1	SISTEMA FLUVIAL.....	7
3.2	PLANICIE DE INUNDACION	7
3.3	DEFINICIÓN DE RONDAS HÍDRICAS	8
4	METODOLOGIA	9
4.1	TOPOGRAFIA Y MODELO DIGITAL DE TERRENO.....	9
4.2	POSICIONAMIENTO GEODÉSICO.....	10
4.3	LEVANTAMIENTO TOPOBATIMÉTRICO	10
4.3.1	Con el sistema LIDAR.....	11
4.4	Modelo digital de Terreno	13
4.5	ANÁLISIS ECOSISTEMICO	14
4.6	ESTUDIO HIDROLOGICO.....	15
4.6.1	Con registros de caudal en el sitio de interés.....	16
4.6.2	Transposición de datos de caudal.....	16
4.6.3	Análisis regional de caudales máximos instantáneos anuales	17
4.6.4	Modelos lluvia escorrentía	17
4.6.5	Modelos computacionales.....	18
4.7	ESTUDIO HIDRÁULICO	19
4.7.1	Topología del modelo	19
4.7.2	Caudales	21
4.7.3	Modelo hidráulico.....	21
4.7.4	Fronteras del modelo	23
4.7.5	Modelos computacionales.....	23
4.8	ANÁLISIS BÁSICO PREDIAL	26
4.9	ZONIFICACION Y USOS RECOMENDADOS DEL SUELO	27
5	BIBLIOGRAFÍA.....	29

FIGURAS

Figura 3-1 Sección transversal típica del cauce natural de un río según CRNR.....	8
Figura 4.1 Sistema LIDAR	11
Figura 4.2 Medidas de GPS, IMU y ALS	12
Figura 4-3 Definición topológica del modelo.....	20
Figura 4-4 Sección hidráulica típica.....	21
Figura 4-5 Cauce y canal con llanura de inundación y cauce de aguas altas	22
Figura 4-6 Balance de energía en un tramo de cauce.....	22

TABLAS

Tabla 4.1 Software para modelación hidrológica.....	19
Tabla 4.2 Software para modelación hidráulica.....	24

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

1 ANTECEDENTES

Dada la gran importancia que tiene la evaluación de eventos extremos de crecidas de ríos y quebradas para el adecuado ordenamiento del territorio, y tomando en cuenta las experiencias vividas en las emergencias invernales de los años 1979, 2006 y 2010 en la Sabana de Bogotá y las cuencas de Ubaté y Suárez, la Corporación ha estructurado un equipo técnico encargado de la evaluación de dichos eventos, y la delimitación de todas aquellas zonas que son propensas a inundaciones o desbordamientos de ríos y quebradas, con el fin de aislar estas áreas y darles un uso adecuado como el de protección y recuperación, además de contar con sistemas que permitan generar alertas antes del desencadenamiento de los eventos.

2 MARCO NORMATIVO

El Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección del Medio Ambiente Decreto 2811 de 1974, establece una regulación en términos de propiedad con relación a las zonas paralelas a los cauces permanentes. En el Artículo 83, literal D, consagra que la faja paralela a las líneas de mareas máximas o al cauce permanente de ríos y lagos de hasta 30 metros es un bien inembargable e imprescriptible del Estado, excepto si existen derechos adquiridos. Asimismo, el Decreto establece las normas para la explotación y ocupación de cauces, playas y lechos; las servidumbres de riberas, la construcción y funcionamiento de obras hidráulicas; el uso, la conservación y la preservación de cauces y aguas. El Decreto consagra que para la explotación y ocupación de cauces, playas y lechos se requiere de permisos de la autoridad correspondiente. En la explotación la regulación menciona la extracción de material de arrastre (artículo 99), y la exploración y explotación de minerales (artículo 100). El artículo 101 ordena "...la suspensión provisional o definitiva de las explotaciones de que se derive peligro grave o perjuicio para las poblaciones y las obras o servicios públicos...". Con relación a la ocupación del cauce el Decreto señala las obras (artículo 102), la prestación de servicios como turismo, deporte, recreación (artículo 103); y el artículo 104 promulga que la ocupación permanente en las playas de los cauces solo se permite para la navegación, y que la transitoria requiere de autorización con excepción de la pesca de subsistencia.

En la servidumbre de riberas el Decreto consigna: "...Los dueños de predios ribereños están obligados a dejar libre de edificaciones y cultivos el espacio necesario para los usos autorizados por ministerio de la ley, o para la navegación, o la administración del respectivo curso o lago, o la pesca o actividades similares. En estos casos solo habrá lugar a indemnización por los daños que se causaren..." (artículo 118). Para la autorización de las obras hidráulicas, el Decreto 2811 de 1974 obliga la realización de estudios para captar, controlar, conducir, almacenar, o distribuir el caudal (artículo 120). Y en el uso, la conservación y la preservación de cauces y aguas el artículo 132 establece: "...Sin permiso, no se podrán alterar los cauces, ni el régimen y la calidad de las aguas, ni interferir su uso legítimo... Se negará el permiso cuando la obra implique peligro para la colectividad, o para los recursos naturales, la

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

seguridad interior o exterior o la soberanía Nacional...” Asimismo, el Decreto 2811 de 1974 estipuló las áreas forestales protectoras, productoras y protectoras-productoras; así como las áreas de reserva forestal de la Ley 2 de 1959. En el artículo 204 estableció: "...Se entiende por área forestal protectora la zona que debe ser conservada permanentemente con bosques naturales o artificiales, para proteger estos mismos recursos u otros naturales renovables. En el área forestal protectora debe prevalecer el efecto protector y solo se permitirá la obtención de frutos secundarios del bosque.” Poco tiempo después de la expedición del Código de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente se firmaron varias disposiciones, entre las cuales se encuentran los Decretos 877 de 1976, 1449 de 1977, 1541 de 1978, 2857 de 1981 y 1594 de 1984. El Decreto 877 de 1976 establece que para considerar Áreas Forestales Protectoras se deben tener en cuenta varios criterios, algunos de los cuales son: áreas de influencia sobre nacimientos de agua de ríos y quebradas; áreas en las que sea necesario controlar deslizamientos, cauces torrenciales, y entre otras amenazas; y áreas con abundancia y variedad de fauna silvestre acuática y terrestre. Por su parte, el Decreto 1449 de 1977 consagra en su artículo 3 literal b, que los propietarios de predios rurales tienen la obligación de mantener cobertura boscosa en Áreas Forestales Protectoras, dentro de las cuales define como tal una faja de terreno no inferior a 30 metros de ancha paralela a las líneas máximas de marea, a los lados de los cauces y alrededor de lagos o depósitos de agua.

El Decreto 1541 de 1978 artículo 11 establece que el terreno que ocupa un cauce natural alcanza a llegar hasta los niveles máximos de las crecientes ordinarias, y que los lechos de depósito natural son hasta donde llegan los niveles ordinarios por lluvias o deshielos. En el artículo 12 plantea que: "...Playa fluvial es la superficie de terreno comprendida entre la línea de las bajas aguas de los ríos y aquellas a donde llegan éstas, ordinarias y naturalmente en su mayor incremento...". Con relación al ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas en el Código de Recursos Naturales (Título II, capítulo III) se consagra el tema de la ordenación de las cuencas hidrográficas. La reglamentación estuvo regida anteriormente por los Decretos 2857 de 1981 y 1729 de 2002, derogados actualmente por el Decreto 1640 de 2012. Esta última reglamentación determina en el artículo 19 numeral 2, que la ordenación de las cuencas se hará teniendo en cuenta las rondas hídricas. En el artículo 28 numeral 4 dice que para la armonización de los instrumentos de planificación y de los planes de manejo ambientales deben ser delimitadas las rondas hídricas. En el artículo 35 define que el ordenamiento y manejo de cuencas, durante su fase de formulación, debe identificar los cuerpos de agua priorizadas para la definición de la ronda hídrica. Y finalmente, el artículo 46 establece que las Comisiones Conjuntas tienen la función de hacer recomendaciones para el acotamiento de las rondas. La Ley 79 de 1986, que regula la conservación del agua, define en su artículo 1 como Áreas de Reserva Forestal los bosques y vegetación que se encuentran en los nacimientos de agua permanentes o no en una extensión no inferior a 200 metros a la redonda; así como los que se encuentran en una franja no inferior a 100 metros a cuerpos de agua que presten alguno de los servicios especificados en dicha Ley como son los hidroeléctricos, las acueductos, los agrícolas, etc. Conforme a la Ley, la finalidad de las Áreas de Reserva Forestal

Gestión Ambiental Responsabilidad de Todos

Bogotá D.C. Carrera 7 No. 36–45; Código Postal 110311 - Conmutador: 320 9000 Ext: 1345 www.car.gov.co

Fax: 287 1772 - Correo electrónico: sau@car.gov.co

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

es la conservación y preservación del agua. Con la Constitución Política de 1991 se instauraron derechos colectivos y del medio ambiente. El artículo 79 instituye el derecho de todas las personas de gozar de un ambiente sano; así como el deber del Estado de proteger la diversidad e integridad del ambiente y conservar las áreas de especial importancia ecológica. El artículo 80 establece como obligación del Estado la planificación, el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, conservación, restauración o sustitución. Igualmente, el artículo 82 dispone que es deber del Estado velar por la protección e integridad del espacio público y por su destinación al uso común.

En el artículo 8 de la Constitución Política de 1991 también se establece como obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación. El artículo 58 determina que es inherente a la propiedad una función ecológica. El artículo 63 consagra que los bienes públicos son inalienables, imprescriptibles e inembargables. Y finalmente el artículo 95 plantea que es un deber de las personas proteger los recursos culturales y naturales del país y velar por la conservación de un ambiente sano. En 1993, como desarrollo de la Carta Política de 1991 y compromiso del Estado Colombiano a la Declaración de Río de Janeiro sobre Medio Ambiente y Desarrollo de 1992, se aprueba la Ley 99 que organizó el Sistema Nacional Ambiental (SINA), creó el Ministerio del Medio Ambiente y reordenó el sector público para la gestión y conservación del medio ambiente. En el artículo 1 numeral 6 determinó el principio de precaución: “La formulación de las políticas ambientales tendrá en cuenta el resultado del proceso de investigación científica. No obstante, las autoridades ambientales y los particulares darán aplicación al principio de precaución conforme al cual, cuando exista peligro de daño grave e irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces para impedir la degradación del medio ambiente” También al instituir las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) en el Título VI, dentro del artículo 31, se determinan para las CAR las siguientes funciones con relación a las rondas hídricas:

- Las CAR pueden otorgar concesiones, permisos, autorizaciones y licencias para el aprovechamiento de recursos naturales o el desarrollo de actividades que puedan afectar el medio ambiente (numeral 9);
- Tienen la función de ordenar y establecer las normas y directrices para el manejo de las cuencas hidrográficas (numeral 18);
- Tienen que promover y ejecutar obras de protección de inundaciones, o hacer recuperación de tierras que sean necesarias para la protección y manejo de cuencas hidrográficas en coordinación con el ya liquidado Instituto Nacional de Adecuación de Tierras (numeral 19);
- Las CAR deben hacer actividades de prevención y control de desastres (numeral 23).

Por su parte, la Ley 388 de 1997 de ordenamiento territorial en su artículo 35 define la categoría del suelo clasificado como de protección de la siguiente manera:

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

“Constituido por las zonas y áreas de terreno localizados dentro de cualquiera de las anteriores clases, que por sus características geográficas, paisajísticas o ambientales, o por formar parte de las zonas de utilidad pública para la ubicación de infraestructuras para la provisión de servicios públicos domiciliarios o de las áreas de amenazas y riesgo no mitigable para la localización de asentamientos humanos, tiene restringida la posibilidad de urbanizarse.”

Esta Ley en su artículo 104 numeral 1 establece que quienes parcelen, construyan o urbanicen en terrenos de protección ambiental o en zonas calificadas como de riesgo, como son las rondas de cuerpos de agua, incurrirán en una infracción urbanística y por lo tanto deberán pagar una multa. Al respecto, el Decreto 1600 de 2005, artículos 58 y 67, dice que no procede reconocimiento de edificaciones o legalización de asentamiento en zonas de protección. El Decreto 1504 de 1998, que reglamenta el manejo del espacio público conforme a la Ley 388 de 1997, en el artículo 5 determina que el espacio público está conformado por elementos constitutivos naturales y complementarios. Entre los primeros elementos se encuentran las áreas para la conservación y preservación del sistema hídrico, las cuales incluyen las rondas hídricas. El Decreto 3600 de 2007, que regula sobre los determinantes para el ordenamiento del suelo rural, en su artículo 4 señala que las rondas hidráulicas hacen parte de la categoría de Áreas de Conservación y Protección Ambiental, en tanto áreas de especial importancia ecosistémica. En este sentido, el Decreto 1469 de 2010 exige que dentro de la información entregada para obtener licencia de parcelación en el suelo rural, los planos deben identificar las áreas de especial importancia ecosistémica como las rondas hídricas. El Decreto 3930 de 2010 que tiene como objeto reglamentar el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos, define los siguientes usos del agua (artículo 9): consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, recreativo, industrial, estético; pesca, maricultura y acuicultura; y navegación y transporte acuático. En cuanto a los vertimientos, el Decreto establece unas prohibiciones y actividades no permitidas (artículos 24 y 25). En las prohibiciones se destaca que no se admiten vertimientos en cabeceras de fuentes de agua, en cuerpos de agua destinados para la recreación y en cuerpos de agua protegidos; y tampoco se permite vertimientos que ocasionen riesgo o alteren las características existentes en un cuerpo de agua que lo hacen apto para todos los usos mencionados anteriormente.

A pesar de lo anterior, fue solo hasta La Ley 1450 de 2011, que expidió el Plan Nacional de Desarrollo 2010 - 2014 “Prosperidad para Todos”, que las rondas hídricas fueron reguladas de manera explícita. La Ley 1450 de 2011 instauró en su artículo 206 que corresponde a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, los grandes centros urbanos y los establecimientos públicos ambientales efectuar el acotamiento de las rondas hídricas y el área de conservación aferente, con base en estudios conforme a criterios definidos por el Gobierno Nacional. Finalmente, es importante señalar que las Leyes 1454 de 2011 y 1523 del 2012 y el Código Minero tienen incidencia en las rondas hídricas. La primera es la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial que establece las normas para la organización político-administrativa del territorio colombiano. La Ley 1523 adopta la Política Nacional de Gestión del

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

Riesgo y el Código Minero, Ley 685 de 2001, establece áreas de exclusión o restricción de la minería por tener un carácter territorial de protección, y define los límites para explorar o explotar minerales en cauces y riberas.

3 DEFINICIONES

3.1 SISTEMA FLUVIAL

El sistema fluvial está conformado por el cauce y su ribera. Cada uno de ellos tiene funciones específicas. Funciones del cauce:

- Transporta y almacena temporalmente el agua que produce la cuenca.
- Transporta y almacena temporalmente sedimentos que produce la cuenca.
- Es el hábitat de muchas especies que hacen parte de un ecosistema que involucra, el cauce en toda su extensión, las riberas, las ciénagas y las zonas frecuentemente inundables y algunas zonas aledañas necesarias para la sostenibilidad de este ecosistema.

Funciones de las riberas:

- Se conectan a través del subsuelo con el cauce y muchas especies se alimentan indirectamente del agua de la corriente.
- Son hábitat de muchas especies que hacen parte de un ecosistema que involucra, el cauce en toda su extensión, las riberas, las ciénagas y las zonas frecuentemente inundables y algunas zonas aledañas necesarias para la sostenibilidad de estos ecosistemas.

Para su funcionamiento de requiere continuidad longitudinal y conectividad con el cauce y que sea bañada de agua, de sedimentos y de nutrientes durante los eventos de crecida.

3.2 PLANICIE DE INUNDACION

Una planicie o llanura de inundación es un área usualmente seca adyacente a ríos o corrientes, la cual se inunda durante eventos de crecientes. Las causas más comunes de inundación son las crecientes de corrientes y de ríos. La planicie de inundación puede incluir el ancho total de valles angostos o áreas amplias localizadas a lo largo de ríos en valles amplios y planos. El canal y la planicie de inundación son partes integrales de la conducción natural de una corriente. La planicie de inundación mueve el caudal que excede la capacidad del canal y a medida que el caudal crece, aumenta el flujo sobre la planicie de inundación.

El primer paso en cualquier análisis de una planicie de inundación es recolectar información, incluyendo mapas topográficos, información sobre flujos de creciente si existe alguna estación de aforo en las cercanías, información de lluvia si no existe información de caudales de crecientes y secciones transversales levantadas topográficamente y estimaciones de la rugosidad del canal en un cierto número de puntos a lo largo del lecho.

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

Las intrusiones en las planicies de inundación, tales como rellenos con materiales artificiales, reducen la capacidad de transporte de las crecientes, incrementan las alturas de crecientes en los ríos e incrementan los riesgos de inundaciones en áreas más allá de dichos rellenos.

Se han utilizado dos tipos de mapas de inundación, mapas de áreas propensas a inundación y mapas de riesgo de inundación. Los mapas de áreas propensas a inundación muestran las áreas que se inundarían debido a su proximidad a un río, corriente, bahía, océano, o cualquier otro cuerpo de agua como puede determinarse de información fácilmente disponible. Los mapas de riesgos de inundación, muestran la extensión de las inundaciones determinadas a través de estudios técnicos de inundaciones en un lugar dado. Los mapas de riesgo de inundaciones se utilizan comúnmente en informes sobre planicies de inundación y requieren actualizaciones cuando ocurren cambios en los canales o en las planicies de inundación y en las áreas localizadas aguas arriba. Estos cambios incluyen modificaciones estructurales o modificaciones en canales o planicies de inundación en áreas localizadas aguas arriba. La construcción de nuevas edificaciones en las planicies de inundación, obstrucciones o cualquier otro cambio en el uso del suelo pueden afectar los caudales, las elevaciones de la superficie de agua y las velocidades de flujo, cambiando por consiguiente la elevación del perfil que define la planicie de inundación.

3.3 DEFINICIÓN DE RONDAS HÍDRICAS

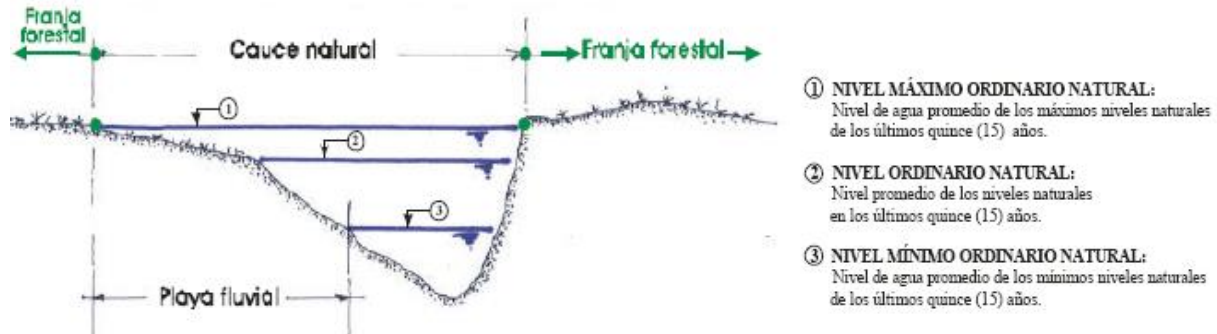
El Decreto 1449 que establece o regula en Cobertura Boscosa dentro del predio, las Áreas Forestales Protectoras, en una faja no inferior a 30 metros de ancho, paralela a las líneas de mareas máximas, a cada lado de los cauces de los ríos, quebradas y arroyos, sean permanentes o no y alrededor de lagos o depósitos de agua.”

El artículo 11 del Decreto 1541 de 1978 aclara que se entiende por Cauce Natural la faja de terreno natural que ocupan las aguas de una corriente al alcanzar sus niveles máximos por efectos de las crecientes ordinarias; y por lecho de los depósitos naturales de aguas, el suelo que ocupan hasta donde llegan los niveles ordinarios por efectos de lluvias o deshielo.

En el artículo 13 del mismo decreto se indica que “para los efectos de aplicación del artículo anterior se entiende por la línea o niveles ordinarios las cotas promedios naturales de los últimos quince (15) años, tanto para las más altas como para las más bajas. Para determinar estos promedios se tendrá en cuenta los datos que suministren las entidades que dispongan de ellos y en los casos en que la información sea mínima o inexistente, se acudirá a la que puedan dar los particulares.” (Ver Figura 3-1).

Figura 3-1 Sección transversal típica del cauce natural de un río según CRNR

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA



4 METODOLOGIA

A continuación se describe la metodología general para cada uno de los capítulos incluidos en el estudio de definición de ronda.

4.1 TOPOGRAFIA Y MODELO DIGITAL DE TERRENO

Se efectúa un levantamiento topográfico y batimétrico por vadeo a lo largo de la zona de estudio, para obtener los planos de planta que se utilizaran para la elaboración del Shape de los puntos, el TIN y el modelo digital de terreno.

La topografía consiste en el levantamiento y posicionamiento de un tramo del río o quebrada usando estación total y GPS de alta precisión. El trabajo topográfico, en su ejecución, se materializa con el fin de poder determinar las características generales del cauce y pendientes del río en el tramo de interés.

El proceso a seguir en campo es el siguiente:

- Hacer posicionamiento GPS del punto de inicio o punto A de la poligonal.
- Hacer posicionamiento GPS en un punto X el cual se utilizara como norte arbitrario de coordenadas conocidas.
- Armar el equipo de topografía en el punto A, hacer ceros en el norte arbitrario y visualizar el punto B el cual corresponde al siguiente vértice de la poligonal, con este procedimiento encontramos el ángulo horizontal existente entre N-A-B y la distancia A-B para calcular las coordenadas del punto B.
- Armar en el punto B y hacer ceros atrás en el punto A y visualizar el punto C como se especificó en el ítem anterior. Este procedimiento se realizara tantas veces como sea necesarios vértices para llegar al punto final de la poligonal.
- Es imperativo hacer claridad que en cada uno de los vértices se llevara a cabo una radiación simple que capture todos los detalles necesarios para el levantamiento,

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

haciendo lectura del ángulo horizontal y distancia de cada uno de ellos para calcular las coordenadas de estos detalles.

- En el tramo de río o quebrada se realizan tantas estaciones como sean necesarias a lo largo del cauce, el cual es definido por los especialistas de la SARP.

Por otra parte en oficina se descargan los datos crudos del levantamiento y del GPS, para hacer el post-proceso de los datos y generar así las carteras de cálculos y coordenadas del levantamiento topográfico.

4.2 POSICIONAMIENTO GEODÉSICO

Todo levantamiento Geodésico, topográfico y/o Batimétrico debe ser enlazado a la Red Geodésica Nacional, cuya precisión debe ser igual o mayor al orden B, de acuerdo a los parámetros de precisión para Geodesia Satelital utilizados por el IGAC, ente rector de la cartografía nacional.

En el posicionamiento de las estaciones se emplea el método estático, utilizando como referencia un GPS fijo en el punto base, con un total de 120 épocas por estación la cual equivale a 10 minutos.

4.3 LEVANTAMIENTO TOPOBATIMÉTRICO

El método de posicionamiento para el levantamiento topográfico es el de poligonal abierta el cual consiste en la lectura de ángulos y distancias, para la determinación de la altura se leyó el ángulo vertical, para finalmente calcular la diferencia de altura que con las correcciones correspondientes se obtiene el valor de la altura de la posición medida. Para el desarrollo de los levantamientos topográficos se utilizó una Estación Total. Como se sabe una Estación Total es análogo a un teodolito electrónico, que permite el almacenamiento de la información así como su procesamiento en el software interno del equipo. El método de trabajo fue radial, (medida de ángulos y distancias), del cálculo de las coordenadas planas y la altura correspondiente se encarga el software del equipo.

Partiendo de los puntos geodésicos posicionados mediante el sistema de posicionamiento global GPS, en tiempo real se efectúa un levantamiento topográfico del cauce del Río o la quebrada con la finalidad de abarcar toda el área de trabajo. La información almacenada es transferida al computador para su proceso correspondiente del programa ARCGIS, el cual nos permite trabajar adecuadamente toda la información recolectada.

El levantamiento batimétrico debido a las condiciones de las Quebradas y ríos y debido a que no cuenta con grandes profundidades se realiza por vadeo con la Estación Total.

4.3.1 Con el sistema LIDAR¹

LIDAR: Acrónimo de “Light Detection and Ranging”. Su traducción literal sería “detección y medición de la luz”, y se trata de un sistema láser de medición a distancia que se utiliza a menudo en los campos de ciencia e industria para la toma de medidas precisas en objetos lejanos e inaccesibles. Recientemente esta técnica se está introduciendo en el campo de la cartografía puesto que permite la modelación rápida del terreno en zonas con accesos difíciles. Este sistema es el equivalente óptico del sistema radar de microondas por lo que a menudo se le llama “radar láser” en la literatura anglosajona.

El sistema LIDAR es un sistema complejo, compuesto por un emisor/receptor y un escáner láser muy potente, un receptor GPS que proporciona la posición y la altura del avión en cada momento, y un sistema inercial (IMU) que informa de los giros del avión y de su trayectoria.

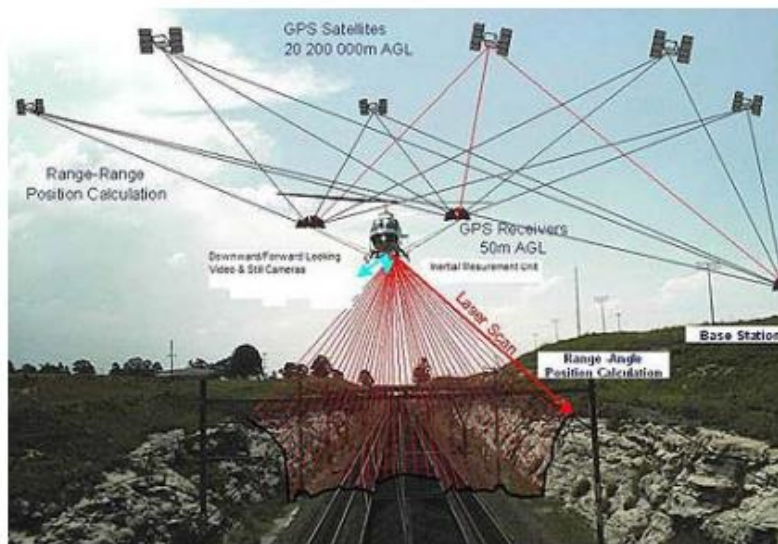


Figura 4.1 Sistema LIDAR

El elemento principal de un sistema LIDAR es el escáner láser, que va aerotransportado y emite pulsos de luz infrarroja que servirán para determinar la distancia entre el sensor y los puntos del terreno. A partir del tiempo que ha tardado cada rayo en ir y venir y de la velocidad de la luz, se deduce con facilidad la distancia a la que está el objeto estudiado.

La toma de datos puede hacerse desde un avión o desde un helicóptero, dependiendo del tipo de trabajo. En el primer caso prima la productividad, se vuela más alto y se abarca una zona

¹ OBTENCIÓN DE DTM Y DSM MEDIANTE TECNOLOGÍA LIDAR. APLICACIÓN AL RÍO EBRO. GÓMEZ, Alfonso (1); DELGADO, Jorge (2); PÉREZ, NÚRIA (3).

1. Universidad Politécnica de Madrid. Dpto. de Ingeniería Cartográfica - Geodesia - Fotogrametría - Expresión Gráfica.
2. Universidad de Jaén Dpto. de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría.
3. Universidad de Jaén. Alumna Ing. En Geodesia y Cartografía.

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

mayor, mientras que si se vuela la zona con un helicóptero, se puede volar más lento, a menos altura, y se obtiene mayor densidad de puntos.

La altura máxima a la que puede volar un avión/helicóptero con un sistema LIDAR debería estar condicionada por la frecuencia de emisión del sistema láser, aunque en la práctica este intervalo de tiempo es suficientemente pequeño como para no ser el elemento determinante. El parámetro que establecerá el límite en la distancia será la pérdida de energía de la señal, que a partir de una cierta altura de vuelo no retornará al escáner láser.

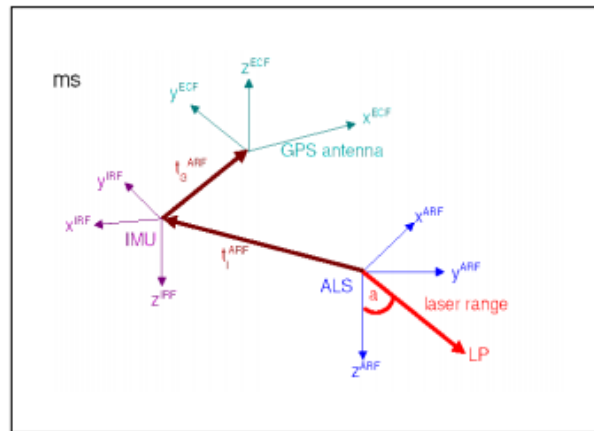


Figura 4.2 Medidas de GPS, IMU y ALS

Durante el vuelo, se toman medidas en los tres subsistemas de los que dispone el LIDAR: GPS, IMU y ALS (Airborne Láser Scanning) de forma independiente pero con una etiqueta de tiempos acorde con el tiempo GPS. Estas etiquetas serán las que permitan sincronizar todas las medidas en postproceso.

Además de las medidas realizadas con el láser, es necesario conocer las coordenadas de la antena GPS y la posición del ALS respecto a esta antena para poder dotar de coordenadas a los puntos del terreno.

Las coordenadas de la antena en cada instante se conocerán después de hacer el postproceso en la oficina y la distancia entre ambos sistemas se habrá medido previamente con una estación total o con un distanciómetro de precisión. Finalmente, la orientación entre la antena GPS y el centro del ALS vendrá dada por los sistemas inerciales.

Después del vuelo los datos GPS y los datos IMU se integran mediante un filtro Kalman para determinar la trayectoria del vuelo y los giros en cada instante. Estos elementos más el ángulo de salida que ha formado el pulso láser con respecto a la vertical, se combinan para determinar la línea imaginaria que ha descrito el pulso láser en el espacio.

Finalmente la longitud del camino descrito por el rayo, los giros definidos por los sistemas inerciales, y la posición del escáner láser obtenida a partir de las medidas GPS, se utilizarán para determinar las coordenadas de los puntos medidos.

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

Para asegurar una correcta transformación entre sistemas de coordenadas, se calibrarán los diferentes subsistemas de forma individual y conjunta, tanto en el laboratorio como en el terreno antes del vuelo. Para el escáner deberán calibrarse tanto los elementos geométricos como radiométricos del láser y muy especialmente la posición relativa respecto al sistema inercial.

Hay que destacar que un sistema LIDAR, puede discriminar entre múltiples respuestas recibidas de un mismo pulso (hasta 5) permitiendo determinar las superficies intermedias, como líneas de tensión o coberturas vegetales. En la actualidad, hay escáneres de varios tipos: los que reconocen hasta 7 ecos, los que solo reconocen el primer pulso, los que solo reconocen el último, los que reconocen el primero y el último, etc. Dependerá el tipo de trabajo que desee realizarse para trabajar con un escáner u otro.

Gracias a la recepción de los múltiples ecos y a la aplicación de filtros adecuados, se podrá analizar la información recibida, discriminando entre los diferentes pulsos e identificando el tipo de superficie objeto de la medición.

A partir de la gran cantidad de pulsos recibidos (se emiten unos 80000 pulsos por segundo y se recibe el 95 % de los pulsos emitidos más sus ecos), se genera un modelo digital de elevaciones de altísima densidad. Como mínimo un DTM LIDAR es tres veces más denso que un DTM fotogramétrico. Se obtendrá una nube de puntos superabundante que permitirá modelar el terreno con el máximo detalle. Esta nube de puntos tendrá un ratio de “puntos medidos / espacio” mayor que con cualquier otra técnica existente.

4.4 Modelo digital de Terreno

Los modelos digitales de terreno son la representación estadística de una superficie del terreno mediante un conjunto de puntos cuyos valores en X, Y y Z son conocidos y están definidos en un sistema de coordenadas definido. La superficie de la tierra es continua y por esto se pueden utilizar diferentes métodos de interpolación que nos permiten obtener estimaciones de “Z” para aquellos sitios en los cuales no se posee información. La interpolación permite estimar, a partir de una muestra de puntos con coordenadas X, Y y Z, los valores de Z para un punto o un conjunto de puntos con coordenadas (X, Y).

Una de las fuentes de datos para elaborar modelos digitales de elevación son puntos de coordenadas (X, Y) con sus respectivos valores de elevación. A partir de estos valores medidos la interpolación crea una superficie en la cual cada punto tiene un valor estimado. Independientemente del método de interpolación y el software utilizado la calidad del MDE dependerá del número de datos de la muestra y de la distribución espacial que tengan estos puntos en el área de muestreo. Cuanto mayor sea el número de puntos y mejor distribuidos se encuentren, mejores serán los resultados.

Los insumos para elaborar un MDE pueden obtenerse a través de levantamientos de campo, métodos fotogramétricos y captura de información con sensores remotos como en la tecnología

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

de LIDAR. El trabajo de campo es el método más costoso pero también el que genera los datos de mejor calidad.

Los puntos pueden ser muestreados aleatoriamente o utilizando un patrón sistemático empleando cualquiera de los siguientes métodos de muestreo:

- Perfiles.
- Puntos equidistantes (Rejilla).
- Muestreo selectivo: Objetos de indican cambios bruscos en el terreno.
- Puntos aleatorios con alturas conocidas.
- Muestreo progresivo: depende de la complejidad del terreno.
- Curvas de nivel.
- Muestreo compuesto: combina el selectivo y el progresivo.

Al contar con los datos fuente para el proceso de interpolación es necesario que un conocedor en el manejo de datos espaciales seleccione el mejor método de interpolación y la forma de representación de los resultados ya que como alternativa del modelo raster puede ser utilizada la red de triángulos irregulares TIN (por sus siglas en inglés) del modelo de datos vectorial.

Como no es posible afirmar en forma categórica que siempre un método dará mejores resultados que otro es necesario evaluar los resultados de varios métodos de interpolación, documentar el grado de error y decidir si la calidad es apropiada para las necesidades del proyecto o aplicación. Para algunos investigadores el método de interpolación basado en el modelo TIN es superior al raster; sin embargo esto no puede tomarse como una afirmación absoluta.

4.5 ANALISIS ECOSISTEMICO

El análisis del componente ecosistémico debe atender a la funcionalidad de los corredores biológicos, dado que éstos pueden medirse en función de la altura de los árboles dominantes de una asociación climática determinada, la cual varía y se hace más compleja a medida que aumentan la temperatura y la humedad disponible en el ecosistema, dado que la altura de los árboles dominantes es un referente genuino de la complejidad y la biomasa que permite al sistema las condiciones climáticas.

La medición de la franja que representa el componente ecosistémico se hará desde el cauce principal de la corriente.

Cuando al cuerpo de agua que se le va a determinar la zona o faja de terreno correspondiente al componente ecosistémico tenga dentro de sus coberturas ecosistemas boscosos propios de la zona de vida; o se presenten ecosistemas que ofrezcan servicios ambientales importantes para las comunidades asentadas en la zona; o sean determinantes ambientales declarados.

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

Cuando no se presenta dentro del área un fragmento de cobertura vegetal que se aproxime a un estado boscoso ideal, pero exista en un relicto de bosque en un territorio aledaño que tenga similitud (altitud, latitud, climatología, suelo y topografía) con el territorio objeto de estudio y que presente fragmentos de cobertura con las características requeridas.

En estos casos se procederá conforme se describe a continuación:

1. Se identificará la cobertura vegetal, preferiblemente boscosa o en el mayor grado de desarrollo sucesional, asociada a la zona de vida del área de estudio, entendiéndose como Zona de Vida una unidad natural en la cual la vegetación, la actividad humana, el clima, la fisiografía, las formación geológica y el suelo, están todos interrelacionados con una combinación reconocida y única (Holdridge, 1987).

2. Una vez identificada la vegetación arbórea que caracteriza la zona de vida, se calculará la altura total promedio del dosel (H) de los árboles que representan la comunidad vegetación.

El componente ecosistémico corresponderá al área definida por la distancia H medida a partir del límite del cauce permanente para cada comunidad de vegetación definida.

Cuando no se disponga de cobertura vegetal representativa los ecosistemas estratégicos de la zona de vida, se procederá con base en la fórmula desarrollada por Holdridge (1971). Basado en la hipótesis de que el valor de la transpiración potencial es único en cualquier isoterma de la superficie terrestre, y que los movimientos del agua en la atmósfera siguen un patrón regular en áreas de clima y suelos zonales, Holdridge encontró gran similitud entre los porcentajes de transpiración real de una asociación climática y las relaciones entre alturas de los árboles dominantes de las mismas asociaciones climáticas.

4.6 ESTUDIO HIDROLOGICO

Para la delimitación de la faja de protección se requiere una determinación del caudal de creciente para el período de retorno deseado, para lo cual se puede hacer uso de determinados análisis hidrológicos en función de la calidad y cantidad de información existente para el sitio de interés.

Si existen registros de caudal en el sitio de interés, puede llevarse a cabo un análisis de frecuencia de caudales máximos.

Si no hay registros de caudal disponibles, se debe llevar a cabo un análisis de transformación de lluvia en escorrentía con el fin de determinar el caudal para el período de retorno deseado.

Cuando al punto de interés confluye una cuenca compuesta por varias subcuencas representativas se determina el hietograma de lluvia para el período de retorno deseado, se encuentra un hidrograma unitario sintético de cada subárea de la cuenca y se calcula el hidrograma de escorrentía directa de cada subcuenca. Dichos hidrogramas se transitan aguas abajo y se suman para determinar el hidrograma de escorrentía directa total en la parte más

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

baja de la cuenca de drenaje. El caudal pico del hidrograma del punto localizado en el extremo aguas abajo se utiliza como el caudal de la creciente de diseño.

4.6.1 Con registros de caudal en el sitio de interés

En el caso de contar con una estación limnimétrica o limnigráfica en el sitio de interés con datos históricos de caudal máximo instantáneo, se toman sus valores máximos instantáneos anuales, se ajustan a distribuciones probabilísticas conocidas, y se hacen inferencias estadísticas.

Se debe tener en cuenta que los caudales máximo instantáneos son los valores de caudal máximo que cruzan por una sección hidrométrica en una corriente, y son registrados en estaciones limnigráficas o limnimétricas a través de datos de lecturas de miras máximas instantáneas, integradas con la respectiva curva de calibración de caudales líquidos.

Se debe tener en cuenta que las estaciones limnimétricas solamente se pueden calcular valores puntuales de caudal en las horas del día en las cuales se leen las lecturas de mira de las mismas.

4.6.2 Transposición de datos de caudal

Cuando la estación limnimétrica o limnigráfica se encuentre en la misma cuenca hidrográfica pero no en el sitio de interés se pueden transferir caudales máximos instantáneos anuales de diferentes periodos de retorno de esta estación hasta el sitio de proyecto, mediante relaciones de áreas de drenaje, así:

$$Q_{SP} = Q_{EH} \times (A_{SP}/A_{EH})^x$$

Dónde:

Q_{SP}: Caudal en el sitio de proyecto, en metros cúbicos por segundo (m³/s).

Q_{EH}: Caudal en la estación limnimétrica o limnigráfica, en metros cúbicos por segundo (m³/s).

A_{SP}: Área de la cuenca hidrográfica hasta el sitio de proyecto, en kilómetros cuadrados (km²).

A_{EH}: Área de la cuenca hidrográfica hasta la estación limnimétrica o limnigráfica, en kilómetros cuadrados (km²).

El exponente *x* es un valor que fluctúa usualmente entre 0.5 y 0.75. A falta de datos de investigación, se acostumbra tomar un valor igual a 0.5.

Para la aplicación de esta metodología la diferencia entre las áreas de drenaje no podrá ser mayor o menor al 50 % del valor original del área de drenaje. Adicionalmente esta metodología se puede aplicar para cuencas hidrográficas que sean hidrológica y climatológicamente homogéneas.

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

4.6.3 Análisis regional de caudales máximos instantáneos anuales

Cuando se cuenta con varias estaciones hidrométricas con datos de caudales máximos instantáneos anuales históricos en una región de cierta magnitud e hidrológicamente homogénea, se puede aplicar el método del análisis regional de frecuencias de esta variable hidrológica.

Para ello, se sigue la siguiente metodología:

a) Se calculan los valores de caudal para diferentes periodos de retorno en cada una de las estaciones hidrométricas.

b) Se calcula la relación generalizada para la región, entre el caudal con periodo de retorno de 2.33 años $Q_{2.33}$ (caudal promedio en la distribución Gumbel) y el área de drenaje A, con base en los datos de cada una de las estaciones hidrométricas.

$$Q_{2.33} = f(A)$$

c) Para cada estación, se calcula la relación entre el caudal para cada periodo de retorno T definido (dando valores de periodos de retorno iguales a 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años) y el caudal con periodo de retorno de 2.33 años $QT/Q_{2.33}$.

d) Se debe realizar un ensayo de homogeneidad estadístico, con el fin de asegurar que los datos obtenidos correspondan a una región hidrológicamente homogénea. Si el resultado de una de las estaciones queda por fuera de la franja de confianza del referido ensayo, se debe eliminar tal valor. La pregunta de si los datos en un grupo de estaciones son homogéneos, se puede contestar en un sentido estadístico determinando si ellos difieren de uno a otro por cantidades que no pueden ser explicadas al azar. Por otro lado, donde esas diferencias no son más que debidas a la casualidad, se puede concluir que los datos representan aspectos diferentes de la misma entidad y, por consiguiente, pueden ser tenidos como homogéneos.

e) Se calcula el valor promedio o el valor mediano de la relación $QT/Q_{2.33}$ para la región para los diferentes periodos de retorno considerados, con base en los valores individuales para cada estación.

f) Para una estación no aforada en la región con un área de drenaje A, el valor del caudal con un periodo de retorno determinado QT se calcula estableciendo, en primer lugar, el valor del $Q_{2.33}$ con la relación generalizada $Q_{2.33} = f(A)$ para la región y, luego, utilizando la relación generalizada $QT/Q_{2.33}$ para la referida región.

Aunque esta metodología es relativamente antigua, aún hoy en día conserva su validez por su respaldo académico y sencillez.

4.6.4 Modelos lluvia escurrentía

Los modelos de transformación lluvia en escurrentía son utilizados cuando no existe la posibilidad de obtener medidas directas de caudales de drenaje en las cuencas hidrográficas.

Gestión Ambiental Responsabilidad de Todos

Bogotá D.C. Carrera 7 No. 36–45; Código Postal 110311 - Conmutador: 320 9000 Ext: 1345 www.car.gov.co

Fax: 287 1772 - Correo electrónico: sau@car.gov.co

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

Dichos modelos calculan la escorrentía superficial a partir de datos históricos de lluvias de corta duración existentes en la cuenca de interés y representativas de ella, en función de sus características geométricas, de suelos, vegetación y usos del suelo.

Se pueden utilizar metodologías tales como, el método racional, método del hidrograma de escorrentía superficial o modelos computacionales como el HEC-HMS.

4.6.4.1 Método racional

Este método sólo puede ser aplicado en un área de drenaje máxima igual a 2.5 km².

El método racional parte de la definición del coeficiente de escorrentía C, valor adimensional, el cual se puede definir como la relación entre el volumen de escorrentía superficial, VE, y el volumen de precipitación total, Vp, ambos expresados en m³, es decir, es un coeficiente que expresa qué porcentaje de la precipitación se convierte en escorrentía superficial directa.

Entonces, puede establecerse que el caudal calculado por el método racional corresponde a un caudal pico QP, ya que es generado por una lluvia de intensidad i sobre un área de drenaje A, en donde dicha lluvia dura como mínimo un tiempo tal que toda el área de drenaje contribuya a la escorrentía superficial.

4.6.4.2 Método del hidrograma de escorrentía superficial.

Este método es utilizado para áreas de drenaje mayores a 2.5 km². Sherman, el autor de la metodología, lo propuso para áreas de drenaje de hasta 20 km², pero es usual utilizarlo en hidrología para valores mayores.

Este método está definido como el hidrograma de escorrentía superficial total resultante de un volumen unitario de lluvia neta, uniformemente distribuido en espacio y tiempo. La altura de la lluvia neta o efectiva corresponde con la altura de escorrentía superficial total del hidrograma unitario.

Para problemas de drenaje superficial se supone, por seguridad, que antes del evento de la precipitación de diseño ha llovido en la cuenca y que, por lo tanto, la interceptación y la detención superficial ya han sido copadas; por lo que la lluvia o precipitación efectiva o neta es igual a la precipitación total menos la interceptación menos la detención superficial menos la infiltración.

De nuevo, las lluvias netas se suponen de distribución uniforme y de intensidad constante en toda el área de drenaje de la cuenca.

4.6.5 Modelos computacionales

Cuando las áreas de drenaje en una cuenca son mayores a 20 km², se aconseja subdividirla en subcuencas y aplicar modelos computacionales para tener en cuenta el hidrograma de creciente producido por cada una de las subcuencas y su tránsito a través del canal principal de la misma y así obtener el hidrograma resultante en el punto de interés, del cual se extrae el

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

caudal pico para determinado período de retorno. Por tanto el hidrograma total resultante es la suma de las ordenadas de los diversos hidrogramas para cada valor constante de tiempo.

A continuación se presentan algunos programas y sus respectivas características para modelación hidrológica.

Tabla 4.1 Software para modelación hidrológica

NOMBRE	AUTOR	CARACTERISTICAS
U.S. Geological Survey (USGS) Model	Dawdy et al. (1970, 1978)	Orientado a procesos. Procesos continuos. Modelación eventos lluvia escorrenia
Storm Water Management Model (SWMM)	Metcalf y Eddy et al (1971)	Modelo semidistribuido. Modelos de flujo de tormenta continuo
	Huber y Dickinson (1955)	
	Huber (1005)	
Physically Based Runoff Production Model (TOPMODEL)	Beven y Kirby (1976-1979)	Físicamente basado. Distribuido. Modelo continuo de simulación hidrológica.
	Beven (1995)	
Generalized River Modeling Package -Systeme Hydroloque Europeen (Mike SHE)	Refsgard y Storm (1995)	Físicamente Basado. Distribuido. Modelo continuo de simulación hidrológica e hidráulica.
Cascade two dimensional Model (CASC2D)	Julien y Shasafian (1991)	Físicamente Basado. Distribuido. Modelo de simulación de escorrenia
	Ogden (1998)	
Soil Water Assesment Tool (SWAT)	Arnold et al (1998)	Distribuido. Conceptual. Modelos de sumulacion continua
Hidological Modeling System (HMS)	Yu (1996)	Físicamente basado. Parámetros Distribuidos. Modelo continuo de simulación hidrológica.
	Yu y Schwartz (1998)	
	Tu et al (1999)	
Soil-Vegetation-Atmosfere Transfer (SVAT) Model	Ma et al (1999)	Macroescala. Modelación de caudales aguas abajo del rio
	Ma y Chens (1998)	
Climate. Soil and Vegetation	Eagleson (1978)	Modelo estocastico. Modelo de balance hidrico anual.

4.7 ESTUDIO HIDRÁULICO

El modelo hidráulico tiene básicamente dos insumos de entrada y un motor de cálculo. Los insumos corresponden a la topología del modelo y a los caudales a transitar, el motor de cálculo corresponde al modelo hidráulico empleado para realizar el transito hidráulico de los caudales calculados sobre el tramo evaluado.

4.7.1 Topología del modelo

Sobre el modelo digital de terreno:

- Se definen las orillas del cauce y el eje del canal.
- De acuerdo a la geomorfología del cauce el modelo de terreno se discretiza en secciones transversales al eje del canal que definen el área transversal y cota batea del vaso, así como la morfología y pendiente transversal del área aferente. El número de secciones generado es específico de cada cuerpo lotico evaluado y depende de la geomorfología del mismo (meandros, pendiente longitudinal, rugosidades diferenciales, estructuras hidráulicas en línea, etc)

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

- Se correlacionan espacialmente las secciones transversales, respecto a la distancias entre ejes y orillas de una sección a otra, de igual forma se determina la pendiente entre secciones y el perfil longitudinal de flujo.
- Se definen las rugosidades específicas por tramo en función de la morfología del lecho, preferiblemente por métodos de medición directa o en su defecto por extrapolación de información obtenida de otros estudios para condiciones morfológicas similares. Se deben tener en cuenta estructuras hidráulicas en línea (culverts, canales, bocatomas, etc).



Figura 4-3 Definición topologica del modelo

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

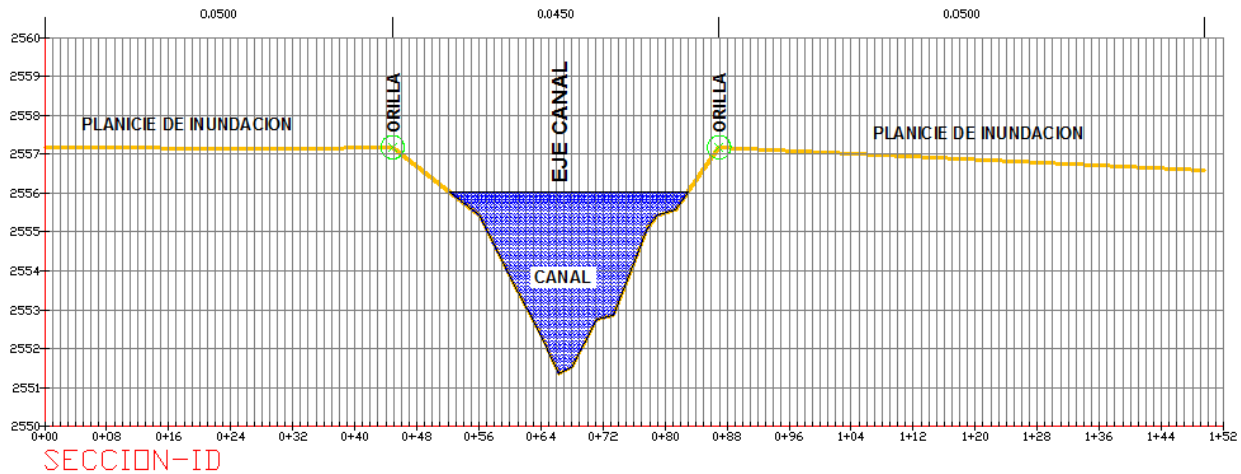


Figura 4-4 Sección hidráulica típica

4.7.2 Caudales

Son aquellos resultado del estudio hidrológico y corresponden al promedio máximo de los últimos quince años para la definición de la ronda y de 25, 50 y 100 años para la evaluación del riesgo.

4.7.3 Modelo hidráulico

Cualquier modelo que permita simulación hidráulica del flujo para canales de cualquier tipo de sección transversal bajo flujo permanente o gradualmente variado, conservando la masa y la energía de acuerdo a las ecuaciones de Saint Venant o Bernoulli y alguna ecuación de resistencia fluida:

$$Z1 + Y1 + (V1^2/2g) = Z2 + Y2 + (V2^2/2g) + h$$

En donde:

Z: Nivel del fondo del canal aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo, denominado este término cabeza de posición, en m.

Y: Lámina de agua aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo, denominado este término cabeza de presión, en m.

V²/2g: Cabeza de velocidad aguas arriba (1) y abajo del tramo (2), denominado este término cabeza de velocidad, en m.

h: Pérdidas de energía en el tramo, dividiéndose en pérdidas por fricción y localizadas, en m.

Se utiliza como la expresión más simple de un flujo de un fluido incompresible en nuestro caso el agua. Si se toma como referencia un tubo de flujo o volumen encerrado por las líneas de corriente en régimen permanente y debido a que no hay pérdida de masa o ganancia de la misma en el

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

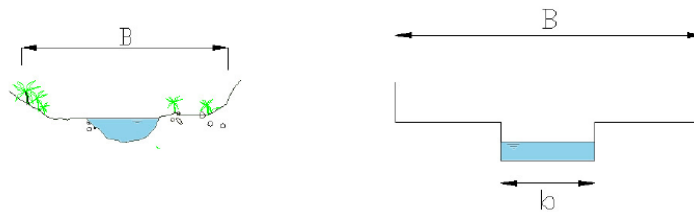
interior de este tubo se cumple que:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 = \dots$$

Esta expresión sencilla es una ayuda significativa a la hora de analizar cualquier flujo, pues se cumple siempre. Intuitivamente la expresión lo que indica es que el volumen se conserva pues la densidad es independiente de la posición y del tiempo. En esta ecuación Q es el caudal, v la velocidad y A el área normal al flujo. Esta idea sencilla de flujo normal hay que tenerla en cuenta a la hora de desarrollar modelos numéricos de flujo en cauces.

La ecuación de continuidad se puede expresar para canal rectangular o su equivalente para un cauce de un río. En la Figura 4-5 se observa la representación de un cauce natural y un canal.

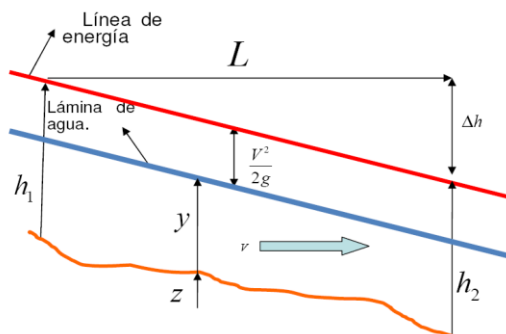
Figura 4-5 Cauce y canal con llanura de inundación y cauce de aguas altas



4.7.3.1 Ecuación de energía

En la Figura 4-6 se observa el esquema de un tramo de canal y dos secciones separadas una distancia Δx, en las que se indican las tres magnitudes de energía que se deben equilibrar.

Figura 4-6 Balance de energía en un tramo de cauce



El equilibrio energético se hace simplemente mediante la relación:

$$H_1 = H_2 + \Delta H$$

$$H = z + y + \frac{v^2}{2g}$$

En donde la energía total H se expresa mediante la suma de tres términos, el potencial, el de presión y el cinético.

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

La energía total siempre se relaciona con un nivel de referencia único para todas las secciones. Debido a que el valor de la energía potencial se debe medir desde el punto más bajo de la sección hasta el nivel de agua, y desde este último hasta la línea de energía se mide la altura de energía cinética del flujo y que esto es así para cualquier sección independientemente de su posición respecto de la cota de referencia; a esta suma se le suele denominar energía específica de esa sección. Esta energía se puede escribir de muchas formas entre otras como se plantea a continuación:

$$E = y + \frac{v^2}{2g}$$

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad \rightarrow \quad \text{con} \quad v = \frac{Q}{A}$$

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad \rightarrow \quad \text{con} \quad q = \frac{Q}{B}$$

$$E = y + \frac{\bar{q}^2}{2g\bar{y}^2} \quad \rightarrow \quad \text{con} \quad \bar{q} = \frac{Q}{B}$$

Todas son ecuaciones de la energía específica de una sección de flujo y todas se componen de dos términos: el potencial y el cinético. Desde el punto de vista ingenieril todos los términos se expresan en magnitudes de “longitud” y las unidades son los “metros”.

4.7.4 Fronteras del modelo

Una vez implementada la topología en el modelo y cargados los caudales, es necesario definir las condiciones hidráulicas de frontera del tramo evaluado. Lo recomendable sería conocer la profundidad de flujo para cada caudal evaluado en la primera y última sección del modelo, definiendo esta profundidad de flujo como frontera aguas arriba y aguas abajo.

En el caso de no conocer la lámina asociada al caudal, se debe determinar la profundidad normal de flujo para cada caudal evaluado en los extremos topológicos del modelo. Conocida la profundidad normal se calcula el número de Froude, que indicara si el flujo es subcrítico o supercrítico, definiendo de esta manera el control hidráulico en el modelo..

4.7.5 Modelos computacionales

Una vez que se ha determinado el caudal de creciente para el periodo de retorno deseado, el siguiente paso es determinar el perfil de la superficie de agua a lo largo del canal. Este análisis puede llevarse a cabo suponiendo flujo permanente, gradualmente variado, no uniforme, utilizando un modelo unidimensional como el HEC-RAS (U. S. Army Corps of Engineers) o un modelo bidimensional basado en diferencias finitas o elementos finitos (Lee y Bennett, 1981; Lee, et al., 1982; Mays y Taur, 1984).

Los modelos unidimensionales solamente permiten que las propiedades de flujo varíen a lo largo del canal, mientras que los modelos bidimensionales también tienen en cuenta cambios a lo ancho, en la sección transversal.

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

En forma opcional, puede llevarse a cabo un análisis de flujo no permanente con el fin de identificar la máxima elevación de la superficie del agua en diferentes secciones transversales durante la propagación de la onda de creciente a través del tramo del río.

Los modelos de flujo no permanente son necesarios para la delineación de las planicies de inundación en grandes lagos, debido a que el almacenamiento en el lago altera la forma y el caudal pico del hidrograma de crecientes a medida que el flujo pasa a través de él.

A continuación se presentan algunos programas y sus respectivas características para modelación hidráulica.

Tabla 4.2 Software para modelación hidráulica

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN	EJEMPLO DE MODELOS	DATOS DE ENTRADA	DATOS DE SALIDA	TIEMPO COMPUTACIONAL (AÑO 2006)
0D	No es físicamente basado	Evalúa la extensión de la inundación y las profundidades de inundación	AgcGIS Delta mapper	MDE (DEM) Altura de lámina de agua aguas arriba Altura de lámina de agua aguas abajo	Extensión de la inundación y profundidad del agua a través de la intersección entre la lámina de agua y el MDE.	Segundos
1D	Soluciona las ecuaciones de Saint Venant 1D	Diseño a escala del modelo, la cual puede ser del orden de 10s a 100s de km dependiendo del tamaño de la cuenca	Mike 11 HEC-RAS SOBEK-CF Infoworks RS (ISIS)	Secciones transversales del cauce ppal y la llanura de inundación. Hidrogramas de caudal aguas arriba. Hidrógrafas de altura aguas abajo.	Profundidad del agua y velocidad media en cada sección transversal. Extensión de la inundación por la intersección de la profundidad del agua simulada con el MDE. Hidrograma de salida aguas abajo.	Minutos

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN	EJEMPLO DE MODELOS	DATOS DE ENTRADA	DATOS DE SALIDA	TIEMPO COMPUTACIONAL (AÑO 2006)
1D+	Enfoque 1D+ con celdas de almacenamiento para la simulación del flujo en las llanuras de inundación	El diseño de la escala del modelo puede ser del orden de 10s a 100s de km dependiendo del tamaño de la cuenca, con potencial de aplicación en escalas mayores si se utilizan datos escasos de secciones transversales	Mike 11 HEC-RAS SOBEK-CF Infoworks RS (ISIS)	Igual a los modelos 1D	Igual a los modelos 1D	Minutos a horas
2D-	Ley de conservación de momentum 2D- para la llanura de inundación	Gran escala de modelación para inundaciones urbanas dependiendo de las dimensiones de las celdas	LISFLOOD-FP	MDE (DEM) Hidrograma de caudal aguas arriba. Hidrógrafas de altura aguas abajo.	Extensión de la inundación y profundidad del agua. Hidrograma de caudal de salida aguas abajo.	Horas
2D NC	Soluciona las ecuaciones de onda poco profunda bidimensionales en la forma no conservativa	Diseño de la escala del modelo del orden de 10s km. Podría tener el potencial para ser usado en modelación de escalas amplias su se aplica con mallas secundarias. No es adecuado para simulaciones de modelos transcíticos y flujos de rompimiento de presas.	TUFLOW	MDE Hidrogramas de caudal aguas arriba. Hidrógrafas de altura aguas abajo.	Extensión de la inundación Profundidades Velocidades promedio en la vertical en cada nodo computacional Hidrograma de caudal de salida aguas abajo	Horas a días

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN	EJEMPLO DE MODELOS	DATOS DE ENTRADA	DATOS DE SALIDA	TIEMPO COMPUTACIONAL (AÑO 2006)
2D C	Soluciona las ecuaciones de onda poco profunda bidimensionales en la forma conservativa	La misma que 2D NC más la capacidad de modelar exactamente flujos transcíticos, rompimiento de presas y flujos de transientes rápidos	Mike 21 TELEMAC SOBEK-OF Delft-FLS Infoworks	Igual que 2D NC	Igual que 2D NC	Horas a días
2D+	Solución 2D plus para las velocidades en la vertical usando sólo la ecuación de continuidad	Modelación de costas donde los perfiles de velocidad 3D son importantes. Ha sido también aplicado para modelación de rios en proyectos de investigación	TELEMAC 3D Delft-3D	MDE Hidrogramas de caudal aguas arriba. Distribución de velocidades de entrada. Hidrografas de altura aguas abajo.	Extensión de la inundación Profundidades de la lámina de agua Velocidades u, v y w para cada celda computacional. Hidrograma de caudal de salida aguas abajo.	Días
3D	Solución 3D de las ecuaciones tridimensionales de Navier Stokes y Reynolds promedio	Predicciones tridimensionales de campos de velocidades en los cauces principales y llanuras de inundación	CFX FLUENT PHEONIX	MDE Hidrogramas de caudal aguas arriba. Distribución de velocidades de entrada y distribución de energía cinética turbulenta Hidrografas de altura aguas abajo.	Extensión de la inundación Profundidades de la lámina de agua Velocidades u, v y w, energía cinética turbulenta para cada celda computacional. Hidrograma de caudal de salida aguas abajo.	Días

4.8 ANÁLISIS BÁSICO PREDIAL

En el análisis básico predial realizado en la definición y delimitación de zonas de ronda de protección de cuerpos hídricos se utiliza una sobreposición cartográfica simple, ya que nos

Gestión Ambiental Responsabilidad de Todos

Bogotá D.C. Carrera 7 No. 36-45; Código Postal 110311 - Conmutador: 320 9000 Ext: 1345 www.car.gov.co

Fax: 287 1772 - Correo electrónico: sau@car.gov.co

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

permite identificar cuales predios y en qué proporción se encuentran éstos predios afectados por los polígonos de ronda de protección encontrados en la aplicación del modelo hidráulico.

La sobreposición cartográfica simple consta de dos capas de información geográfica que se han de sobreponer una sobre la otra con el fin de hacer análisis de las relaciones geográficas entre ellas.

En primer lugar se debe verificar que las dos capas posean un mismo sistema de coordenadas y se encuentren referenciadas a un mismo origen, con el fin de garantizar que la ubicación de los objetos de estas capas sea real y así poder identificar las características o relaciones topológicas existentes entre ellas. En dado caso que las capas no cumplan con esta condición cartográfica básica será necesaria la transformación de estos sistemas de coordenadas, es decir se debe migrar alguna de las dos capas desde su sistema de coordenadas original hacia el sistema de coordenadas de la otra capa y así al ser coincidentes poder realizar la sobreposición de estos objetos geográficos.

Al tener esta información lista se grafica la capa que contiene los polígonos de la zona de ronda de protección del cuerpo hídrico en estudio y luego se grafica la capa que contiene los polígonos de los límites prediales.

En estos análisis básicos prediales buscamos principalmente dos relaciones topológicas en particular, primero la intersección, es decir cuales polígonos de la capa de predios se tocan total o parcialmente con el polígono de la zona de ronda de protección del cuerpo hídrico. En segundo lugar la contención, es decir, cuales polígonos de la capa de predios se encuentran contenidos total o parcialmente en el polígono de la zona de ronda de protección del cuerpo hídrico.

El resultado de este proceso es un listado de los predios afectados por la zona de ronda de protección del cuerpo hídrico y un listado con el cálculo del área o porcentaje del área afectada en cada uno de los predios afectados por la zona de ronda de protección del cuerpo hídrico.

4.9 ZONIFICACION Y USOS RECOMENDADOS DEL SUELO

El régimen para la zonificación y usos recomendados de los suelos que se encuentran dentro de la zona de ronda para el Río Frío, se establece según el acuerdo 16 de 1998 numeral 3.2., el cual dice:

“3.2 Áreas periféricas a nacimientos, cauces de ríos, quebradas arroyos, lagos, lagunas, ciénagas, pantanos, embalses y humedales en general son franjas de suelo de por lo menos 100 metros a la redonda, medidos a partir de la periferia de nacimientos y no inferior a 30 metros de ancho, paralela al nivel máximo de aguas a cada lado de los cauces de ríos, quebradas y arroyos sean permanentes o no, y alrededor de lagos, lagunas, ciénagas, pantanos, embalses y humedales en general.”

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

Uso principal: *Conservación de suelos y restauración de la vegetación adecuada para la protección de los mismos.*

Usos compatibles: *Recreación pasiva o contemplativa.*

Usos condicionados: *Captación de aguas o incorporación de vertimientos, siempre y cuando no afecten el cuerpo de agua ni se realice sobre los nacimientos. Construcción de infraestructura de apoyo para actividades de recreación, embarcaderos, puentes y obras de adecuación, desagüe de instalaciones de acuicultura y ex tracción de material de arrastre.*

Usos prohibidos: *Usos agropecuarios, industriales, urbanos y suburbanos, loteo y construcción de viviendas, minería, disposición de residuos sólidos, tala y rocería de la vegetación”*

GUIA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RONDA

5 BIBLIOGRAFÍA

- Chow, V. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGRA-HILL.
- Diaz Granados, M. (2009). Memorias del curso Hidráulica de Rios. Bogotá : Universidad de los Andes.
- Engineers, U. A. (2001). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User´s Manual*. Davis USA: USACE.
- Flood Site. (01 de Febrero de 2009). *Flood inundation modelling. Model choice and proper application*. Recuperado el 24 de Agosto de 2009, de Flood Site: www.floodsite.net
- Horrit, M., & Bates, P. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 87-99.
- Instituto Geológico y Minero de España. (2008). *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundación: Métodos, experiencia y aplicación*. Madrid : Ministerio de ciencia e innovación.
- Instituto Geológico y Minero de España. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guia Metodológica para su elaboración*. Madrid: Ministerio de Ciencia e innovación.
- Ministerio, d. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vias.
- Silva Medina, G. (2000). *Hidrología Básica*. Bogotá: Publicaciones Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional.
- Vargas M., R., & Diaz Granados , M. (2008). *Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Bogotá: Universidad de los Andes.