

## **Proyecto Jalisco Sostenible Cuenca Río Verde**

### **Pautas metodológicas para el desarrollo del Componente 1 Estudios Técnicos**

#### **1. Contexto general**

La sustentabilidad ambiental de los procesos de desarrollo es una condición en la que se logra la coexistencia armónica del hombre con su ambiente, equilibrando los sistemas transformados y creados y evitando su deterioro, y de este modo, permitiendo un mejoramiento sostenido en el tiempo de la calidad de vida de la población mediante la implementación de diversas actividades del desarrollo humano.

Bajo este enfoque, es imprescindible la selección de alternativas de desarrollo que satisfagan simultáneamente los ejes de sostenibilidad: económica, social y ambiental. Estos últimos se deben considerar como aspectos complementarios y dependientes a tener en cuenta en todo proyecto de planeación de infraestructura hídrica, especialmente aquellos que implican el uso consuntivo de los recursos hídricos, como es el caso de proyectos de aprovechamiento para uso productivo y/o humano.

Uno de los objetivos básicos del Componente 1, tanto a través de los sub-componentes 1 y 2 del Proyecto Jalisco Sostenible Cuenca Río Verde, es la formulación de un conjunto de resultados y propuestas para brindar a los tomadores de decisión estrategias de gestión para el manejo de los recursos hídricos en la cuenca del Río Verde y para optimizar la planeación de infraestructura hídrica dentro del territorio del Estado de Jalisco. Esta formulación de recomendaciones, se orientará considerando los programas de ordenamiento territorial y planeación hídrica a nivel federal y estatal, teniendo en cuenta variables hidrológicas y socio-ambientales como el crecimiento demográfico, el cambio de uso del territorio y/o los efectos del cambio climático, que en su conjunto generan distintos escenarios potenciales de análisis.

Bajo estos escenarios, cada posible actuación de obras hídricas en la cuenca, implica a su vez un cierto grado de transformación o modificación ambiental, que consiste en los impactos sobre el sistema biofísico y socioeconómico, y en particular sobre el grado de explotación de los recursos hídricos generados por la cuenca. La presión de las demandas y el modo empleado para satisfacerlas, determina si se está interviniendo en el marco del desarrollo sostenible, a través de la utilización de un enfoque ecosistémico, que reconoce a la naturaleza como un capital natural proveedor de beneficios a la sociedad que, a su vez, requiere el mantenimiento de procesos ecológicos esenciales para garantizar la continuidad de dichos beneficios. En otras palabras, asegurar un manejo integral de los recursos naturales que promueva su conservación y uso sustentable.

A efectos de orientar el desarrollo metodológico del Componente 1, se describen a continuación de manera conceptual algunos criterios de desarrollo adoptados como base conceptual para la implementación del componente. Los mismos son de carácter general y orientativo, adaptándose a la realidad de la información existente o a adquirir, en función de los tiempos disponibles y las prioridades particulares que los integrantes del Comité de Dirección del Proyecto (CDP) determine.

## **2. Metodología general del Balance Hídrico**

El Estudio de Balance Hídrico se desarrollará teniendo en cuenta todas las ofertas correspondientes a diferentes comportamientos de los forzantes hidrológicos, así como las demandas actuales y potenciales identificadas en el ámbito de la cuenca, incorporando en el análisis de escenarios exclusivamente aquellas demandas actuales y potenciales debidamente sustentadas desde el punto de vista técnico, ambiental, económico y legal por el Gobierno del Estado de Jalisco (GEJ) y los Gobiernos involucrados en el ámbito de la cuenca o potenciales beneficiarios de sus recursos hídricos.

En relación a la evaluación de las demandas, se intentará definir las mismas en base a la identificación de consumos reales o estimados en función del uso real identificado del recurso. Este aspecto constituye un factor diferenciador fundamental con respecto a los balances hídricos realizados de manera antecedente.

El Estudio incluirá, de ser el caso, recomendaciones respecto a soluciones de explotación y regulación hídrica para atender situaciones de demandas no cubiertas, así como la atención de caudales y niveles mínimos para garantizar la preservación de los servicios ambientales brindados por el sistema hídrico. Asimismo, también incluirá recomendaciones relacionadas a los servicios ecosistémicos relacionados con los recursos hídricos, su conservación y manejo sostenible. Dichas recomendaciones serán identificadas de manera cualitativa y a nivel de inventario.

Los aspectos metodológicos específicos que hacen a la realización de las labores técnicas de este Sub Componente, será objeto de permanente revisión a través del Comité de Dirección del Proyecto, a medida que se avance en su implementación. Esta modalidad de trabajo se hace imprescindible, atendiendo a la necesidad de ejecutar el Estudio en plazos razonables y brindando resultados que deberán adaptarse a información secundaria ya generada para el ámbito del Proyecto.

### **2.1. Evaluación de antecedentes y estudios previos**

Como actividad inicial y básica para el desarrollo del estudio, el cual se sustentará fundamentalmente en información secundaria, se llevará a cabo como actividad preliminar el acopio, revisión y análisis de todas las fuentes de información existentes y disponibles, incluyendo los antecedentes de estudios realizados por otras instituciones, y otros desarrollados para los fines de aprovechamiento de los recursos hídricos que involucre la cuenca del río Verde, así como otras cuencas vecinas o de similares características a la cuenca en estudio. En particular se deberá sistematizar la totalidad de la información hidro-meteorológica disponible para la cuenca, así como de otras cuencas de similares características que permitan inferir la producción de las mismas bajo diferentes escenarios hidrológicos.

En vista que la cuenca del Río Verde dispone de numerosos estudios antecedentes, tanto hidrológicos como de ordenamiento e investigaciones básicas territoriales, se procederá a la recopilación de los mismos para su evaluación y clasificación, a efectos de conformar una base de datos de antecedentes que puedan resultar útiles para el desarrollo del estudio de balance hídrico. Se incorporarán en la misma todos los estudios de carácter socio ambiental que permitan

orientar sobre aspectos del medio físico y socio económico, así como su situación antecedente y actual.

A tal efecto se recurrirá a organismos públicos del Estado de Jalisco y del Gobierno Federal, unidades académicas y de investigación, instituciones privadas y de la sociedad civil, así como toda otra fuente que resulte pertinente.

Toda esta información en formato digital será sistematizada y puesta a disposición del Equipo Técnico Multidisciplinario (ETM) del proyecto en el servidor de la oficina de proyecto, así como en el “data room” del proyecto implementado en el marco del Componente II. El material en formato papel será escaneado e impreso y permanecerá disponible en la oficina de proyecto en la ciudad de Guadalajara.

Cualquier requerimiento asociado a otros Estados será canalizado a través de consultas con CONAGUA, a través del marco que brinda el Grupo Técnico de Balance Hídrico (GTBH).

Los aspectos metodológicos específicos que hacen a la realización de las labores técnicas de este Sub Componente definidos en el Plan Operativo, será objeto de permanente revisión a través del Comité de Dirección del Proyecto, a medida que se avance en su implementación.

## **2.2. Evaluación de Cartografía Antecedente y Consolidación de Cartografía de Base unificada**

Se procesará información cartográfica de fuentes oficiales estatal y federales (INEGI, Secretaría de Comunicaciones y Transporte, SEMARNAT, SEMADET, CEA, CONAGUA, INECC, otras) que será analizada y procesada temáticamente a efectos de que se encuentre disponible a través de un visualizador SIG por parte de todo el ETM.

Se coleccionarán así mismo imágenes satelitales (Landsat 7 y 8, SPOT, Google Map Pro, otras) y data de cotas de terreno de repositorios de uso público (USGS, INEGI, ASTER, etc.).

Con el total de esta información se depurará y conformará una cartografía base que será la empleada en el proyecto de manera uniforme por los distintos especialistas del ETM.

## **2.3. Evaluación de Red Hidro – Meteorológica existente**

Se procederá a recolectar la información de base meteorológica e hidrométrica que exista disponible para el ámbito de la cuenca en las bases de datos de CONAGUA, CEA, IMTA, INIFAP y otros. En particular se requerirá poder acceder a las bases de datos CLICON, SHI y BANDAS de la CONAGUA para disponer de la información oficial de base.

Complementariamente se solicitará al IMTA, por intermedio de la CEA, las bases de datos utilizadas para la realización del estudio “Análisis de los escurrimientos en la cuenca del río Verde” de Julio 2015.

En base a esta información se conformará la base hidro meteorológica de la cuenca en estudio (que podrá incorporar datos de otras estaciones fuera del ámbito de la cuenca pero que podrá ser de utilidad para evaluar la respuesta de la misma). Esta base de datos será utilizada para

caracterizar de acuerdo a criterios estadísticos los forzantes hidrológicos que serán empleados para la calibración, validación y carga del modelo hidrológico a desarrollar.

#### **2.4. Caracterización Geológica y Geomorfológica de la Cuenca**

En base a información secundaria y contrastes de campo se procederá a caracterizar la geología y geomorfología de la cuenca. Este aspecto resultará de gran utilidad a la hora de definir la caracterización y génesis de los suelos, los patrones de escurrimiento y la evaluación de los procesos de escorrentía, infiltración y erosión, entre otros.

#### **2.5. Caracterización Hidrogeológica de la Cuenca**

En base a información secundaria se definirán los principales acuíferos de la cuenca, sus áreas de recarga, su interrelación con las aguas superficiales, y en general el comportamiento dinámico de las aguas subterráneas a partir de un modelo conceptual del área de estudio. Se identificarán así mismo las zonas de mayor explotación del recurso subterráneo y la respuesta de los mismos en base a datos disponibles de niveles y calidad hidroquímica (en particular la salinidad). Si bien el balance hídrico permitirá definir la respuesta de la cuenca en términos de disponibilidad de recursos superficiales, la interrelación y el comportamiento de los escurrimientos verticales entre el sistema subterráneo y superficial serán tenidos en cuenta a la hora de definir la producción de la cuenca.

#### **2.6. Caracterización de Usos del Suelo, Cobertura Vegetal y Aptitud de Suelos**

En base a datos antecedentes, contraste de campo e interpretación de imágenes satelitales se determinarán los principales usos actuales de los suelos de la cuenca y su cobertura vegetal, identificando la distribución de los diferentes tipos de cultivos, actividades pecuarias y demás usos. También se caracterizará, en aquellos sectores no antropizados, el tipo de cobertura vegetal existente. Se tomarán en cuenta las experiencias locales (del INIFAP entre otros) en cuanto a las curvas de crecimiento, las superficies potenciales de riego y temporal de los cultivos más importantes de la cuenca. Esta información será sistematizada a efectos de determinar las condiciones de evapotranspiración, que determina el otro componente de escurrimiento vertical a considerar en el balance.

La productividad de las tierras en una región se mide básicamente por el nivel de productividad de los cultivos, la cual se relaciona o está limitada por varios factores, entre los cuales se encuentran el clima, los suelos, el manejo eficiente del agua, y las prácticas agrícolas a través del tiempo, entre otros.

Con el fin de plantear alternativas que aseguren un desarrollo ambiental sostenible en la cuenca del Río Verde, se requiere realizar un inventario general de las características edáficas, identificar los diferentes tipos de uso de las tierras, evaluar el uso o aptitud potencial de las tierras y en general conocer las prácticas de manejo de los cultivos bajo riego y sin riego. Asimismo, el conocimiento detallado de cada uno de estos factores y aspectos ambientales permitirá conocer el potencial agrícola y productivo de las tierras presentes en la cuenca, teniendo en cuenta las necesidades hídricas y requerimientos agroecológicos de los cultivos actuales y potenciales a implementar en la región.

El conocimiento y la aplicación de los datos y resultados generados de este inventario de los suelos, usos actuales y vegetación de la región son necesarios e indispensables en el balance hídrico, ya que son un insumo necesario durante las diferentes fases de la modelación hidrológica de la cuenca, al igual que para el ordenamiento territorial de la cuenca.

## **2.7. Uso del suelo y vegetación (cobertura vegetal)**

El estudio del uso actual y cobertura vegetal en la cuenca en estudio permitirá identificar y representar los diferentes tipos de usos del suelo y vegetación (cobertura vegetal) y las diversas formas de utilización de las tierras que se dan actualmente en la región, esto con el fin de ordenar el territorio de acuerdo a la vocación o aptitud de los suelos.

Asimismo, el conocimiento de los usos actuales, los tipos de cobertura vegetal y su interacción con los factores ambientales, como el clima, los suelos y el agua, entre otros, ayudan a determinar inicialmente el tipo y grado de cobertura que ofrecen los cultivos, los pastos, la vegetación natural, etc., contra la erosión y degradación del suelo, así como también generarán información valiosa sobre el contenido y movimiento del agua en el suelo, factores importantes en el análisis y modelación de la oferta y demanda hídrica en la región.

En el presente estudio, la identificación y el mapeo del uso actual y la cobertura vegetal se fundamentará en la interpretación de imágenes de satélite recientes, la cual será complementada con información existente del área de estudio, además de la verificación en campo de cada uno de los elementos y usos delimitados.

En el presente estudio las grandes unidades y tipos de uso del suelo y vegetación se definirán siguiendo los criterios y tipos de clasificación propuestos por Instituto Nacional de Estadística (INEGI); los cuales se complementarán y ajustarán con la información de los sistemas de clasificación propuestos en el Inventario Nacional Forestal (INF.2000); así como también con los trabajos de campo.

El levantamiento de la información y mapeo de uso actual y cobertura vegetal se fundamentará en el estudio y evaluación de antecedentes en zona, los cuales serán complementados con la interpretación de imágenes de satélite, además de la comprobación en campo de las unidades previamente delimitadas; así como también de los tipos de uso y cobertura vegetal identificados.

El proceso de interpretación de las imágenes comprenderá varias etapas, dentro de las cuales se incluyen: georreferenciación y la elaboración del mosaico de imágenes de la cuenca, la corrección de distorsiones y errores de las imágenes, selección de áreas de entrenamiento y comprobación de campo. Teniendo en cuenta que la interpretación de imágenes consiste en un procesamiento digital supervisado o no supervisado durante el cual se agrupan o clasifican los píxeles de una imagen en categorías o clases, dentro de un espacio multiespectral. En el presente estudio se empleará el método supervisado, el cual se fundamenta en el conocimiento del territorio (desarrollado en base al análisis de antecedentes, recorridos de campo y evaluación de orto imágenes de detalle), así como de los elementos o tipos de usos presentes, tales como por ejemplo los cultivos de arroz, los sistemas agroforestales, la vegetación nativa, así como los pastos naturales, entre otros.

Una vez realizada la clasificación supervisada de las imágenes se procederá a validar y verificar directamente en campo los elementos delimitados. Esta etapa incluye definir áreas de entrenamiento seleccionando zonas homogéneas con extensiones representativas a la resolución espacial de las imágenes satelitales utilizadas. Cada clase y tipos de usos definidos se identificarán en al menos tres áreas distribuidas en la región donde sea posible el acceso; esto con el fin de disminuir el riesgo de incertidumbre y la variabilidad dentro de una misma clase. Así mismo, en cada área de entrenamiento se registrarán varios o múltiples puntos de control en campo, con sus respectivas coordenadas geográficas, para luego extrapolar la información a toda la cuenca y en específico en cada uno de los tipos de uso y cobertura vegetal identificados previamente.

Luego de la etapa de campo, se procederá a reclasificar las imágenes, extrapolar la información, ajustar las unidades delimitadas y elaborar el mapa de uso actual y cobertura vegetal con su respectiva leyenda. Una vez definidos y delimitados los tipos de usos del uso y vegetación (cobertura vegetal) se determinarán los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) con base en los estudios antecedentes (INIFAP u otros) realizados para los cultivos locales; en falta de dicha información estos se complementarán con la metodología y e índices propuestos por FAO (FAO. Boletín 56. Riego y Drenaje)

### **Reconocimiento general de los suelos en el ámbito de estudio**

El estudio de las características edáficas del ámbito de estudio que se realizará será a nivel general (escala 1:500.000), con una unidad de mapeo mínima entre 50 y 100 ha, condición esta que dependerá específicamente del tipo de información existente. Asimismo, la metodología a seguir durante la ejecución del estudio de suelos se ajustará a la legislación nacional vigente, así como también en las normas legales que rigen y aprueban el reglamento para la ejecución de reconocimientos de suelos en México y particularmente en el Estado de Jalisco.

En general, el estudio de suelos comprende varias fases. La primera etapa inicia con la evaluación de los antecedentes del área de estudio, incluyendo la revisión de estudios realizados anteriormente, el inventario y la adquisición de las imágenes de satélite que cubren el ámbito de estudio, así como la elaboración del mosaico de imágenes de zona de estudio, la georreferenciación y la rectificación de las mismas, con base al modelo digital de elevación y el mapa topográfico de la cuenca.

Una vez corregidas las imágenes y eliminadas las distorsiones geométricas se procederá a interpretarlas digitalmente, utilizando el software ArcGIS versión 10.2. Sobre las imágenes de satélite, se realizará una interpretación fisiográfica digital de toda el área, la cual consiste en separar grandes unidades de paisaje, teniendo en cuenta patrones de drenaje, lineamientos estructurales, geología, morfografía, textura, rugosidad y grado de alteración de las geoformas, así como también el tono (color) de las imágenes. Este análisis fisiográfico determinará la presencia de grandes paisajes, tipos y formas de relieve, presentes en el ámbito de estudio, como por ejemplo montañas, colinas, piedemontes, etc., entre otros.

Concluida la fase de interpretación digital, se procederá a realizar el inventario de suelos presentes en cada una de las unidades fisiográficas delimitadas, fase durante la cual se realizarán observaciones de identificación y comprobación en campo de los suelos presentes, así como también se ajustan o redefinen las unidades de suelos previamente delimitadas.

Posterior a esta fase se procederá con la descripción de las calicatas y muestreo de los perfiles modales representativos, de acuerdo con las normas propuestas por la USDA para este tipo de estudios (USDA.2012). Los suelos o componentes taxonómicos se clasificarán siguiendo el sistema de clasificación de suelos de FAO-UNESCO (FAO. WRB.1988).

## **2.8. Caracterización de suelos y pruebas de campo**

Teniendo en cuenta la importancia de los suelos en el balance hídrico de la cuenca y en los procesos de ordenamiento territorial (macro planeación) se requiere conocer las características fisicoquímicas de los suelos de los taxones dominantes. El análisis de las propiedades de los suelos se realizará de manera puntual, y con el objetivo de comprobar y complementar la información cartográfica existente. Estas propiedades se determinarán de acuerdo a los siguientes procedimientos y métodos de laboratorio:

- Características y propiedades de los suelos
  - o Color: Determinación directa en campo, tomando muestras de cada horizonte del perfil de suelos y comparándolas con las cartas de colores de la tabla Munsell (Soil Color Chart. Munsell. 1998).
  - o Textura: Método organoléptico, es decir, percepción al tacto.
  - o Profundidad: Medición directa en campo de la profundidad de cada uno de las capas que conforman el perfil del suelo.
  - o Estructura: Observación directa del suelo en campo. Los parámetros fueron el tipo, el tamaño y el grado de evolución o desarrollo estructural.
  - o Consistencia: Observación directa en campo. Esta propiedad se determinó en dos estados: en húmedo (muy friable, friable, firme y muy firme) y en mojado (rangos de plasticidad).
  - o Límites entre horizontes: Observación directa en campo.
  - o Porosidad: Observación y cuantificación directa en campo.
- Métodos y análisis de laboratorio
  - o Durante el reconocimiento de campo se describirán y muestrearán los perfiles modales o representativos a las cuales se les determinarán los siguientes parámetros fisicoquímicos:
  - o pH: Se determinará en agua en relación 1:1 y se cuantificará por el método potenciómetro con electrodos de vidrio.
  - o Textura: % de arena, limo y arcilla: Determinación por el método del hidrómetro.
  - o Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): Método saturación con acetato de amonio, 1 Normal a pH (neutro).
  - o Al +3 H<sup>++</sup>: Método de Yuan. Extracción con KCl, 1 N.
  - o Carbón orgánico (CO): Por el método de Walkley Black.
  - o Fósforo (P) disponible: Por el método de Olsen, modificado, extracción con NaHCO<sub>3</sub>=0.05 M, pH 8,5.
  - o Bases intercambiables (Ca, Mg, K, Na): Se determinará por Acetato de amonio 1 N y neutro.
  - o Elementos menores (Mn, Fe, Zn, Cu): Extracción con DTPA.
  - o Boro (B) disponible: Se seguirá el método de agua caliente, cuantificación con curcumina.

- Azufre (S) extractable: Se determinará utilizando Ca (HPO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.
- Nitrógeno (N) total: Se cuantificará por el método de Kjeldahl.

## **2.9. Interpretación del comportamiento de la Cuenca y Planteo del Modelo Conceptual**

De la interpretación conjunta de las características de la cuenca determinada en los títulos anteriores, así como de los principales forzantes hidrológicos, se determinarán los principales factores de respuesta de cada sector, permitiendo plantear un modelo de tipo conceptual que represente de manera simplificada la respuesta hidrológica ante diferentes situaciones de carga en la misma, e identifica semejanzas y diferencias entre sectores de comportamiento diferenciado dentro de la misma cuenca. Este modelo conceptual será la base del planteo de la modelación numérica que se efectuará a posteriori.

## **2.10. Análisis de Datos Meteorológicos**

Consistirá en la selección de las estaciones que se consideran representativas del ámbito de estudio, sea que se encuentren dentro o fuera de los límites físicos de la cuenca. Se realizará esta selección basándose fundamentalmente en la calidad de los registros (longitud y continuidad, consistencia y homogeneidad).

## **2.11. Análisis de Datos Hidrométricos**

Análogamente a lo expresado para la data meteorológica, se procederá con las estaciones hidrométricas, las que servirán básicamente para la calibración del modelo numérico.

## **2.12. Evaluación de consistencia, homogeneización y complementación de las series de datos de Precipitación y Caudal**

Seleccionadas en una primera instancia las estaciones meteorológicas e hidrométricas, se procederá a someter a las series respectivas a un conjunto de test para validar su representatividad y calidad, los que pondrán a prueba la consistencia y homogeneidad estadística de las series. En caso de presentar debilidades en este sentido, se procederá a su corrección y complementación, o su eventual reemplazo. Las series que superan este control de calidad serán empleadas para la definición de las condiciones hidrológicas con que se correrá, calibrará y validará el modelo hidrológico.

Las series depuradas permitirán asimismo definir estadísticamente condiciones que puedan caracterizar períodos de abundancia, medios y de sequía, los que serán evaluados sobre los escenarios a definir más adelante.

## **2.13. Parametrización de las Cuencas y Subcuencas**

En base a la información física de la cuenca, sus condiciones de homogeneidad y la disponibilidad de datos, se procederá a definir los principales parámetros que definen la respuesta hidrológica de los diferentes sectores de la cuenca y las 13 sub cuencas, permitiendo tenerlos predefinidos a la hora de requerirlos para los fines de la modelación.

#### **2.14. Evaluación y selección de Modelos Hidrológicos**

En base a una serie de condiciones comunes exigibles o deseables para las diferentes herramientas numéricas disponibles para la modelación hidrológica, así como la mayor o menor adaptabilidad a las condiciones y datos disponibles para la cuenca del río Verde, se procederá a indagar como responde cada una de ellas a esas condiciones deseadas. De este modo se llegará a una selección basada en criterios más homogéneos.

Los criterios de análisis para la selección de esta herramienta serán definidos para el proyecto de la siguiente forma:

- a) En general, el modelo debe poseer características operativas adecuadas para el estudio, de modo de ser capaz de simular balances de agua de larga duración (de carácter mensual, anual y plurianual). Modelos de “eventos”, o sea, de corta duración, son naturalmente útiles y valiosos, pero no lo son tanto para esta clase de estudios.
- b) El modelo debe ser robusto; esto es, debe proveer soluciones útiles a problemas complejos, en forma independiente de la dificultad y naturaleza de la cuenca.
- c) En cuanto a procesos físicos en la cuenca, el modelo debe ser capaz de representar en forma eficiente tanto la demanda como la oferta de agua, e incluir variados procesos de interés tales como, por ejemplo, la retención en lagos y embalses. Al mismo tiempo, su estructura debe adecuarse a la escasez de datos de base de la cuenca, por lo cual modelos más sofisticados con alto requerimiento de datos no serían en principio adecuados para este fin.
- d) El modelo debe ofrecer vinculación a sub-modelos de gestión de aguas y de optimización de recursos hídricos.
- e) El modelo debe poseer una interfaz gráfica lo más amigable posible, procurando el beneficio de su vinculación previa y posterior con software de Sistema de Información Geográfica (SIG).
- f) En lo posible, los desarrolladores del modelo deben ofrecer formas de ayuda (soporte) eficientes al usuario, ya sea a través de preguntas directas o bien vía foros on-line.
- g) En lo posible, debe existir experiencia previa internacional en el uso del modelo en cuencas similares.
- h) Los costos de licencia en relación a las prestaciones del modelo y la duración del proyecto deben ser ventajosos.

#### **2.15. Recorrido y Relevamiento de Estaciones Hidro Meteorológicas seleccionadas**

Se procederá al relevamiento de las estaciones hidrometeorológicas a efectos de familiarizarse con sus condiciones de implantación, lo que permitirá, por una parte, a interpretar algunos comportamientos singulares, y por otra a identificar posibles sitios de ejecución de aforos referenciales. Se llevará a cabo una evaluación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas activas, preparando una ficha para cada una de ellas y definiendo el tipo de estación, su condición operativa y grado de mantenimiento y su nivel de cumplimiento en relación a las exigencias operativas de estándares internacionales (WMO). Aquellas que a la fecha se encuentren inactivas, eventualmente podrán ser visitadas a efectos de evaluar las condiciones físicas en las cuales operaron y realizar eventuales recomendaciones relacionadas con la conveniencia de su nueva puesta en operación para afianzar resultados futuros.

## **2.16. Implementación del Modelo Seleccionado**

Dependiendo de la selección del modelo, se procederá a configurar el mismo mediante una adecuada discretización que permita representar de manera simplificada las características de la cuenca. Se generarán los archivos de carga de datos de características de cada sector de la cuenca y de los forzantes hidrológicos que considere. Este proceso se inicia con la configuración correspondiente a la situación actual de la cuenca, sobre la que se efectuará la calibración del modelo.

## **2.17. Ejecución de Aforos Referenciales y Relevamientos de Campo**

La realización de un conjunto de aforos referenciales será una actividad permanente durante toda la duración del estudio.

Evidentemente un conjunto de valores puntuales no modificarán las tendencias determinadas en base a series de larga duración, pero permitirán resolver posibles situaciones de inconsistencia de datos existentes, así como obtener como datos actualizados relativos de distribución de caudales entre tributarios, que tendrán suma importancia a los fines de la calibración del modelo.

Asimismo, se efectuarán relevamientos de campo de diversa naturaleza, destinados al reconocimiento de los aspectos físicos de la cuenca. En particular se efectuarán recorridos destinados a la clasificación supervisada de cobertura vegetal y al muestreo de suelos.

## **2.18. Calibración y Validación del Modelo**

Una vez estructurado el modelo hidrológico en base al modelo conceptual de la cuenca, se procederá a su calibración en base a un período de lluvias definido a partir de la serie histórica adoptada, contrastando la producción de caudales en secciones donde se cuente con caudales aforados históricamente, modificando las variables del modelo hasta lograr un ajuste adecuado. Alcanzado un acuerdo razonable de estos resultados se procederá a correr el modelo con otra parte diferente de la serie de precipitaciones, verificando que los resultados mantengan un ajuste adecuado en términos de producción de caudales.

## **2.19. Relevamiento e Identificación de Demandas Actuales y Futuras**

Este componente está principalmente relacionado con la determinación de las demandas hídricas de los diferentes sectores de uso del recurso, tanto de las demandas actuales como futuras y/o potenciales.

Las demandas actuales en cada una de las 13 subcuencas se calcularán en base al inventario de las superficies de riego (distritos y unidades de riego), datos agroclimáticos proporcionados por la red agrometeorológica gestionada por INIFAP, el censo demográfico (INEGI), inventarios de industrias, censos pecuarios (ODEIRUS) y demás usos que dependen de recursos hídricos provenientes de la cuenca (con la ayuda del sistema de información geográfica, comprobaciones de campo, información secundaria, estadísticas etc.), las eficiencias de uso actuales (con la ayuda de metodologías de reconocimiento rápido, entrevistas, estudios existentes etc.). Estas demandas “reales” serán contrastadas con las demandas “teóricas” de las concesiones de agua otorgadas de acuerdo al Registro Público de Derechos de Agua (REPDa).

Para la determinación de la demanda hídrica ambiental se tomarán en consideración todas las demandas ambientales que satisfagan a largo plazo las necesidades básicas de los ecosistemas ligados al agua (fluviales, acuíferos, humedales), poniendo especial énfasis en las demandas fluviales (caudal ecológico), de acuerdo a las normativas recientes de la CONAGUA<sup>1</sup>, pero además tomando en cuenta las experiencias nacionales e internacionales relacionadas con este demanda, seleccionando el tipo de metodología acorde con la disponibilidad de datos para su aplicación.

Los cálculos de las demandas futuras y potenciales en la cuenca se analizarán bajo el supuesto del nivel de desarrollo previsible para las diferentes actividades y usos, caracterizado por una parte por las tendencias históricas de crecimiento o reducción, y por otro por las pautas de ordenamiento territorial y ecológico que prevén los respectivos instrumentos de planificación con que el Estado cuenta, con el fin de evitar potenciales conflictos sociales y económicos derivados del uso del agua. Asimismo, se tomarán en cuenta los efectos potenciales del cambio climático.

Para el cálculo de las demandas futuras de uso poblacional se tomarán en cuenta las proyecciones de crecimiento demográfico por parte de diferentes instituciones estatales y nacionales, especialmente el INEGI así como el incremento proyectado del acceso y calidad de los servicios de agua potable en la cuenca. En base a información a requerir a los actuales operadores, se considerarán las fuentes de suministro, los niveles de tratamiento, los consumos actuales, los antecedentes de macro y micro medición de los sistemas en operación, el nivel de cobertura de servicio, las dotaciones consideradas, el agua no contabilizada y todo otro elemento que permita interpretar y cuantificar la demanda actual para este uso.

Para la estimación del potencial de demanda de agua para usos agropecuarios (que representa el 88.79% del volumen total de uso<sup>2</sup>) se tomarán en cuenta los posibles efectos de cambio climático (en base a las investigaciones realizadas por IMTA, INIFAP y otras fuentes), el potencial de desarrollo de la actividad, así como el posible incremento de las eficiencias de uso, especialmente en la actividad agrícola bajo riego. Para ello se tomarán especialmente en cuenta las investigaciones locales del INIFAP, las informaciones proporcionadas por el SEDER, SAGARPA INIFAP y otros en cuanto a las superficies potenciales de riego y temporal de los cultivos más importantes de la cuenca, así como el uso actual y potencial del suelo que identifica la distribución actual y potencial de los diferentes tipos de cultivos y actividades agropecuarias. Se estimará el potencial de incremento de las eficiencias de uso en base a experiencias locales, regionales e internacionales.

Las demandas futuras de las actividades industriales estarán basadas en los potenciales de desarrollo de este sector de acuerdo a la planificación económica del Estado.

Los diferentes usos de agua tanto actuales como futuros en cada subcuenca se relacionarán con las diferentes fuentes de agua (superficiales, subterráneas, embalses etc.) en relación a posibles escenarios de satisfacción de las mismas, dando prevalencia a la utilización del recurso superficial toda vez que resulte suficiente.

---

<sup>1</sup> NMX-AA-159-SCFI-2012 Norma Mexicana que establece el procedimiento para la determinación del Caudal ecológico en cuencas hidrológicas. México, D.F., 20 de septiembre de 2012. (2012).

<sup>2</sup> Análisis de los Escurrimientos de la cuenca del Río Verde, Informe Final, IMTA, Julio 2015)

Para cada una de las demandas identificadas y cuantificadas se determinará cual es la tasa de retorno a considerar en términos de balance, dado que toda actividad de consumo nunca determina un aprovechamiento del cien por ciento del agua consumida y diferentes porcentajes, muchas veces significativos, retornan al medio receptor en forma de efluentes o pérdidas.

En base a esta definición de demandas se espera poder formular propuestas de optimización del uso para cada una de las actividades, con énfasis en medidas de modernización y tecnificación en el uso agrícola y pecuario (por ser las de mayor volumen). Estas medidas de optimización conducirán a la propuesta de medidas de planificación, gestión y conservación del recurso hídrico en el Estado de Jalisco que serán consideradas a la hora de recomendar medidas de macro planeación de obras hídricas en ese ámbito territorial.

## 2.20. Definición de Escenarios de Análisis

Con el modelo operativo se procederá a definir bajo que situaciones serán evaluados los resultados de balance: a cada una de estas situaciones se la denomina un “escenario”. Así, un escenario define una situación del estado de la cuenca en términos de su esquema de demandas, situación de infraestructuras dentro de la cuenca, prioridades de satisfacción, etc. Desde el punto de vista hidrológico, esta evaluación será siempre ejecutada para 3 situaciones correspondientes, cada una de ellas a una condición típica que representa forzantes de años ricos, medios y pobres, y siempre tomando en cuenta los posibles escenarios de cambio climático. En la tabla siguiente se presenta un esquema matricial de la definición de cada escenario:

Escenario	Sub Escenario	Forzantes Hidrológicos (*)	Condición de Infraestructura	Situación de Demanda	Esquema de Prioridades de Uso
<i>Escenario 1</i>	Año Seco	Situación A	Esquema N	Horizonte X	Esquema 1
	Año Medio				
	Año Húmedo				
<i>Escenario 2</i>	Año Seco	Situación C	Esquema R	Horizonte Y	Esquema 3
	Año Medio				
	Año Húmedo				
<i>Escenario ...</i>	Año Seco	⋮	⋮	⋮	⋮
	Año Medio				
	Año Húmedo				
<i>Escenario n</i>	Año Seco	Situación n	Esquema n	Horizonte n	Esquema n
	Año Medio				
	Año Húmedo				

(\*) Incorpora condiciones representativas de escenarios de Cambio Climático

Se tomará en cuenta la incorporación y disponibilidad de información que permita la definición de los diferentes escenarios de cambio climático, probables a diferentes escalas temporales en los promedios de la temperatura superficial del aire, las precipitaciones y la humedad. Se considerarán casos extremos de sequías y de inundaciones. En base a este procedimiento se

obtendrá un conjunto de resultados basados en análisis de sensibilidad ante el cambio de estos parámetros climáticos, que se constituirá en una herramienta de gestión para la toma de decisiones por parte de GEJ.

En el presente Estudio se considerarán como referencia los escenarios climáticos desarrollados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2000), la UNAM, el INECC, así como otros estudios regionales de referencia, tales como “Los Recursos Hidrológicos del centro de México ante un Cambio” en donde se analizan las variaciones en la disponibilidad de agua que se presentarían en la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago frente a un escenario de cambio climático y el estudio “Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México”, del IMTA, el cual presenta las condiciones climatológicas que prevalecen particularmente en México, y su relación con los recursos hídricos, de acuerdo con los diferentes escenarios de cambio climático a futuro planteados por IPCC. Así mismo se podrá utilizar información disponible en repositorios de tipo global como WCRP CORDEX<sup>3</sup> u otros.

### **2.21. Desarrollo de Corridos de Producción del Modelo**

Consiste en proceder a la carga de cada situación y ejecutar la operación hasta contar con resultados. Estos sets de resultados corresponderán a cada uno de los escenarios seleccionados y contemplarán para cada uno de ellos las salidas resultantes de considerar tres situaciones de los forzantes hidrológicos correspondientes a períodos secos, medios y ricos.

### **2.22. Evaluación de Resultados**

Una vez obtenidos los resultados se procederá a verificar su calidad y consistencia, para luego proceder a su interpretación en base a diferentes parámetros y en particular a la satisfacción de demandas planteadas.

### **2.23. Análisis y evaluación de necesidades de intervención a efectos de optimizar el uso del recurso superficial**

En este capítulo se concentrarán un conjunto de recomendaciones referentes a las acciones que permitan lograr la optimización del recurso hídrico superficial, basadas en los resultados de la modelación y en la experiencia.

En particular, debido a su volumen e importancia relativa, el consumo agropecuario presenta una clara preponderancia en el uso del agua, encontrándose en la región por encima del promedio nacional de México. El análisis de toda la información obtenida durante el diagnóstico permitirá determinar las alternativas de solución para lograr el uso sustentable del agua en la cuenca, de acuerdo a los diferentes tipos de agricultura, sistemas de riego e infraestructura hidroagrícola así como prácticas de manejo. En base a este análisis se elaborará una guía para la determinación de las demandas actuales y futuras de este sector que servirá como elemento para la formulación de propuestas de optimización de la planificación hídrica a nivel estatal.

En base a los resultados de las actividades anteriores se definirán posibles estrategias para hacer más eficiente el uso del agua por parte del sector más demandante, con el fin de generar

---

<sup>3</sup> [www.cordex.org](http://www.cordex.org)

aportes a las propuestas de planificación que forman parte del sub componente 2 del proyecto, en concreto para los siguientes aspectos:

- Evaluación los de planes de modernización y tecnificación en el riego sector del sector agropecuario.
- Sistematización de las informaciones contenidas en los “Planes Directores para la Modernización Integral del Riego”.
- Actualización de los balances hídricos a nivel de cada sistema.
- Determinación de los niveles de sobre e infradotación de cada sistema de riego y actualización de las dotaciones en combinación con las acciones de modernización.
- Priorización de las acciones y regiones a intervenir de acuerdo a las pautas de ordenamiento económico ecológico del Estado, las posibilidades económicas y asignación de porcentajes de financiamiento entre actores involucrados y los impactos esperados de las posibles intervenciones.
- Propuestas de Diseño de un Programa de Modernización y Tecnificación del riego en el sector agropecuario.
- Propuestas de Incremento de la productividad de la agricultura bajo riego.

#### **2.24. Planteo Conceptual de Medidas Estructurales y No estructurales**

En base al análisis precedente se propondrán medidas estructurales como no estructurales para mejorar el uso del recurso en la cuenca. Las mismas serán presentadas a nivel de idea de proyecto, sin más pretensión que establecer una línea de desarrollo posterior.

#### **2.25. Criterios de Apuntalamiento para el Desarrollo Sostenible del Área del Proyecto**

En todos los aspectos del desarrollo del proyecto se evaluarán el grado de sostenibilidad de las prácticas de uso, concentrándose aquí el diagnóstico de estos aspectos y las propuestas de medidas para lograr revertir o mejorar este enfoque.

#### **2.26. Selección de Alternativas para la Implementación de un Aplicativo para el Manejo de Resultados y el Apoyo a la Toma de decisión**

Se evaluarán alternativas de formato y software de un Aplicativo o herramienta para permitir de manera ordenada el acceso a toda la información generada durante el estudio. Esta herramienta deberá permitir el rápido acceso a resultados y conclusiones que puedan apoyar a la toma de decisiones futuras que excedan al alcance temporal del proyecto.

#### **2.27. Desarrollo del Aplicativo**

Se llevará a cabo la carga de la información, sirviendo este Aplicativo para una rápida transferencia a las autoridades locales previo al cierre del proyecto.

### **3. Metodología general para la valoración económica de servicios ambientales**

Una política de gestión de los recursos hídricos se refleja en el capítulo XXVI del artículo 9 de la ley de aguas nacionales que dispone lo siguiente:

- Art. 9.-XXVI. *“Promover en el ámbito nacional el uso eficiente del agua y su conservación en todas las fases del ciclo hidrológico, e impulsar el desarrollo de una cultura del agua que considere a este elemento como recurso vital, escaso y de alto valor económico, social y ambiental, y que contribuya a lograr la gestión integrada de los recursos hídricos”*

En particular, la ley de aguas nacionales hace referencia al “alto valor económico, social y ambiental del agua”. Este valor económico deriva no solamente de los usos consuntivos y no consuntivos asociados, sino de los servicios ecosistémicos que esta provee, y que representan un beneficio para las comunidades, y que a los efectos de poder ser cuantificados pueden ser asociado a un valor económico.

En este sentido la valoración de Servicios Ecosistémicos permite incorporar en la evaluación económica de una alternativa los beneficios ambientales asociados, vinculando el criterio de sostenibilidad al proceso de toma de decisiones.

### **Objetivo**

Se propone identificar la metodología de valoración económica de algunos de los servicios ecosistémicos proporcionados por la cuenca del Río Verde, a utilizarse como herramienta para la selección de escenarios viables de esquemas de infraestructura hidráulica, tanto para proponer un mejor manejo del recurso hídrico como para el planteo de pautas de macro planeación.

### **Los Servicios Ecosistémicos de una cuenca hidrográfica y su metodología de evaluación**

En primer lugar, se define como Servicio Ecosistémico (SE), aquel beneficio que deriva de la interacción entre el recurso hídrico y los ecosistemas.

Los SE benefician directamente a las comunidades que aprovechan del recurso hídrico para los usos tradicionales (agricultura, uso poblacional, industria, producción hidroeléctrica) y no tradicionales, como es el caso del servicio recreativo, deportivo (pesca), de transporte (navegación).

En falta de una gestión integral de los recursos hídricos, los SE que resulten debilitados o neutralizados, deberán ser remplazados por infraestructuras hidráulicas que cumplan la misma función con un consecuente incremento de costos para la comunidad.

Algunos de los servicios ambientales proporcionados por los ecosistemas y relacionados con los procesos eco-hidrológicos se mencionan a continuación:

- Capacidad de almacenamiento del agua superficial y sub-superficial
- Capacidad de regulación y disponibilidad de agua para diferentes usos
- Dilución, absorción y filtración de compuestos químicos (mejoramiento de los parámetros de calidad de agua)
- Control y modulación de los procesos erosivos en los cauces, control de avenidas y flujo de detritos
- Conservación del régimen natural de caudales a favor de las especies riparianas
  - o Transferencia de nutrientes

- Modificación de la morfología fluvial
- Equilibrio entre erosión y deposición de sedimentos

Si bien algunos de los SE mencionados resulten de difícil cuantificación, los que derivan de una redistribución y/o incremento de los caudales que escurren en la red hidrográfica, pueden ser evaluados mediante la aplicación de metodologías concretas que apuntan a determinar el valor económico correspondiente.

En general se asume que el incremento de disponibilidad del volumen de escurrimiento anual puede contribuir al mantenimiento de los SE propios de los ríos dependiendo de la época del año. La disponibilidad de agua y por ende, de aporte al caudal de base del curso superficial, se puede traducir en los siguientes SE:

- Mantenimiento de hábitats acuáticos/sostenimiento de biodiversidad – Servicios de regulación y provisión
- Capacidad de autodepuración del agua – Servicio de regulación
- Conservación de suelos en la planicie aluvial – Servicio de regulación
- Calidad del Paisaje – Servicio cultural
- Actividades recreativas – Servicio cultural
- Usos consuntivos (agua potable, piscinas, acuicultura, etc.) - Servicio de provisión

En particular, a continuación, se resumen las metodologías para:

- **Usos recreativos:** Utilizo del río o las aguas de un embalse como balneario. Una mayor disponibilidad de agua en el cauce o la presencia de embalses permanentes permitiría disponer de una mayor cantidad de agua para estos usos recreativos en varias épocas del año
- **Aprovisionamiento de agua dulce:** La implementación de alternativas que puedan incrementar la disponibilidad de agua dulce en los ríos, lo que, tras asegurar el cumplimiento del caudal ecológico, proporcionaría agua adicional para la potencial demanda doméstica.
- **Autodepuración del agua:** Los ríos cumple una función de asimilación y dilución en relación a la carga contaminante (DBO) de las aguas residuales contaminadas con coliformes provenientes de descargas domésticas directas. Con un caudal más abundante, la capacidad de asimilación y dilución de contaminantes sería mayor, si bien este aspecto no debería ir en contra de las iniciativas de un adecuado saneamiento para la cuenca.

SERVICIO	TIPO	VALOR	MÉTODO	DESCRIPCIÓN
Recreación	Cultural	Uso directo – sin valor de mercado	COSTO DE VIAJE	<p>Se calcula el área debajo de la curva de demanda, que relaciona la cantidad de visitas a un lugar con los gastos que tienen los visitantes para llegar a este lugar. Se puede tomar en consideración los costos en los que incurren las personas para beneficiarse de estos servicios.</p> <p>Existen bienes sustitutos de los servicios ambientales que sí cuentan con un mercado. Los gastos realizados para trasladarse a otro balneario deben entenderse como la disposición mínima a pagar por ello.</p>
Disponibilidad de agua para consumo humano	Provisión	Uso directo – con valor de mercado	PRECIO DE MERCADO	Tarifa del agua potable. Costo de sustitución de otras fuentes de agua segura (consumo de agua envasada, filtros domiciliarios, cloración domiciliaria, etc.).
Autodepuración del agua	Regulación	Uso indirecto – sin valor de mercado	COSTOS EVITADOS	<p>Se cuantifica el valor de un bien ambiental a través de los costes que evita o los que inducirían su pérdida. Al valorizar estos daños, se está valorizando indirectamente los servicios ecosistémicos que impiden que estos problemas se manifiesten. Este método identifica los efectos positivos o negativos que un cambio en la calidad de un recurso (el aire o el agua, por ejemplo) produce sobre los elementos que interactúan directa o indirectamente con este bien. Para usar esta metodología es necesario evaluar los costos en los que los diferentes actores deben incurrir como respuesta a una acción determinada, como ocurre, por ejemplo, con los costos adicionales de la construcción de obras de infraestructura o de prevención, costos de reposición de activos por manejos inadecuados y costos de impactos ambientales. Asimismo, se pueden incluir en el cálculo de los perjuicios físicos causados por un determinado agente. La traducción en términos monetarios se lleva a cabo evaluando el costo de las pérdidas en recursos materiales. También se tienen en cuenta los costos producidos por enfermedades (medicamentos, tratamiento hospitalario) y la incapacidad para trabajar.</p>

*Recreación:* Para estimar el valor económico de las actividades recreativas del río se puede utilizar el método de costo de viaje. Este método pretende determinar el valor que le otorgan los usuarios a los servicios que prestan ciertas áreas recreativas. Consiste en revelar mediante encuestas, el origen de los visitantes que acuden al sitio de estudio, la frecuencia y duración media de las visitas, los costos de acceso al sitio -entre los que se incluyen principalmente el costo de viaje y gastos regulares- y variables socioeconómicas de los individuos –e.g., edad, nivel de ingreso, educación (WWF, 2014). Con esta información se establece la demanda recreativa. El tiempo y dinero que dedica una persona a visitar el balneario es una aproximación de su disponibilidad a pagar por acceder al servicio de recreación. Esto implica relacionar los costos de viaje con el número de visitas a la zona recreativa mediante una curva de demanda.

*Disponibilidad de agua para consumo humano:* El aprovisionamiento de agua dulce es un valor de uso que supone la interacción del hombre con los recursos y posee un valor (precio) otorgado por el mercado. El valor del servicio ecosistémico de aprovisionamiento de agua dulce es el valor de la facturación por el recurso agua – discriminando la valoración de la distribución, comercialización y mantenimiento de la red.

*Autodepuración del agua:* Para la valoración del incremento de la capacidad de autodepuración del agua se puede aplicar el método de costos evitados. Este método parte de la premisa que existen bienes sustitutos de los servicios ambientales que sí cuentan con un mercado y a partir de los cuales se puede estimar el valor del servicio ambiental en cuestión (WWF, 2014).

El incremento del volumen de agua en los ríos proporciona una mayor capacidad de asimilación de contaminantes. El valor del servicio se ha asigna a la capacidad de asimilación de contaminación que tiene el volumen de agua adicional. Se ha emplea la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) que es uno de los análisis más frecuentes para aguas residuales y mide la cantidad de oxígeno consumida por las bacterias al degradar la materia orgánica.

La monetización del cambio de calidad que produce el ahorro de agua se ha cuantificado en base al canon de vertido establecido por las autoridades competentes:

$$\begin{aligned}
 & \text{Incremento del volumen de agua} \left( \frac{m^3}{\text{año}} \right) \times \text{Concentración máxima admisible} \left( \frac{mg}{m^3} \right) \\
 & = \text{Carga contaminante asimilada} \left( \frac{mg}{\text{año}} \right) \\
 & \text{Carga contaminante asimilada} \left( \frac{mg}{\text{año}} \right) \times \text{Canon de vertido} \left( \frac{\$}{mg} \right) \\
 & = \text{Valor económico de autodepuración} \left( \frac{\$}{\text{año}} \right)
 \end{aligned}$$

#### 4. Metodología para el cálculo de la laminación de crecidas extraordinarias en el Embalse de El Zapotillo, para obra en situación de desvío.

El cálculo de la variación a través del tiempo de los niveles y volúmenes de embalse y caudales erogados en la presa El Zapotillo en su actual condición de desvío ante la ocurrencia de una crecida se efectúa resolviendo para cada instante una ecuación diferencial de balance que expresa como varía el volumen en un dado intervalo diferencial:

$$\delta V / \delta t = Q_{\text{afluente}} - Q_{\text{erogado}}$$

dónde:

$\delta V$  = variación del volumen almacenado en el embalse

$Q_{\text{afluente}}$  = caudal afluente

$Q_{\text{erogado}}$  = caudal erogado

$t$  = tiempo

El caudal afluente ( $Q_{\text{afluente}}$ ) es el caudal ingresante al embalse y es función del tiempo. Esta relación considerada como una serie de tiempo se denomina “hidrograma”. Si la misma se grafica como serie de tiempo, el área bajo la curva entre dos instante  $t_1$  y  $t_2$  representa el volumen acumulado para el período ( $t_2 - t_1$ ). El caudal erogado ( $Q_{\text{erogado}}$ ) es el caudal saliente del embalse a través de los órganos de descarga de la presa (vertedero, conductos) y depende del nivel de embalse. La variación del volumen ( $V$ ) del embalse depende a su vez de la geometría del embalse.

La ecuación diferencial que representa la evolución del volumen de embalse no tiene una solución que permita obtener una función que represente la evolución del volumen (y por tanto el nivel de embalse) en función del tiempo (y por tanto del caudal ingresante). La solución se obtiene aplicando un método de resolución numérica de la ecuación diferencial, y en el análisis de los niveles de embalse de la presa Zapotillo se aplicó el método de Runge-Kutta de segundo orden.

Para el cálculo los valores del volumen embalsado y del caudal erogado en función del nivel de embalse se confeccionaron tablas desde las cuales se obtienen los valores interpolando linealmente.

La tabla que brinda el volumen de embalse en función de la elevación del mismo se obtuvo del documento “Estudio hidrológico complementario sobre el aprovechamiento y crecientes para el almacenamiento de la presa de almacenamiento El Zapotillo, Río Verde, Jalisco, Informe final 2005”, “Tabla 11.3 Elevación-área-capacidad”, página 73, elaborado por CONAGUA.

Los caudales afluentes para los 2 casos analizados, crecida decamilenaria obtenida a partir del hidrograma maximizado de la crecida de 1973 y la propia crecida histórica de 1973, se obtuvieron de los gráficos del informe ya citado presentes en las páginas 53 y 43 respectivamente.

Para la confección de las tablas correspondientes al cálculo del caudal erogado se calculó para un determinado rango de niveles de embalse los caudales erogados por vertedero (en esta situación correspondientes al sobrepaso de la presa) y por los conductos del desvío.

El caudal del vertedero se calcula mediante la expresión

$$Q = C \cdot L \cdot (N_e - N_v)^{3/2}$$

dónde:

Q = caudal [m<sup>3</sup>/s]

C = coeficiente de descarga del vertedero de pared gruesa con descarga libre [m<sup>1/2</sup>/seg]. Valor adoptado 1.3 a 1.4 [m<sup>1/2</sup>/seg]

L = Longitud de vertimiento [m]

N<sub>e</sub> = Nivel de embalse [msnm]

N<sub>v</sub> = Nivel de coronamiento del vertedero [msnm]

El caudal erogado por los conductos de desvío se calcula con las siguientes expresiones

$$J_F = f \cdot L / D \cdot U^2 / (2 \cdot g)$$

$$J_T = k_t \cdot U^2 / (2 \cdot g)$$

$$N_e = N_s + J_F + J_T + U^2 / (2 \cdot g)$$

Donde:

J<sub>F</sub> = pérdida de carga por fricción [m]

f = coeficiente de fricción, calculado con la ecuación de Colebrook-White. Esta ecuación depende de la velocidad del escurrimiento, la rugosidad (k) de las paredes del conducto, el diámetro (D) del conducto y el propio valor f

k = rugosidad del conducto [m]. Valor adoptado 0.00165 (valor medio para hormigón)

D = diámetro (m). Para conductos no circulares se adopta un diámetro equivalente igual a 4 \* R<sub>H</sub> donde R<sub>H</sub> es el radio hidráulico del conducto definido como el cociente entre el área ocupada por el escurrimiento y el perímetro mojado del mismo.

L = longitud de los conductos [m]. Valor adoptado 187 m

U = velocidad [m/s]; U=Q/A

Q = caudal [m<sup>3</sup>/s]

A = área del conducto [m<sup>2</sup>]

J<sub>F</sub> = pérdida de carga local [m]

K<sub>T</sub> = coeficiente de pérdida de carga local en la toma. Valor adoptado 0.25

g = aceleración de la gravedad [9.81 m/s<sup>2</sup>]

N<sub>s</sub> = nivel de agua a la salida del conducto [msnm]. Valor adoptado 1555.93 msnm

N<sub>e</sub> = Nivel de embalse [msnm]

Finalmente, para la resolución numérica de la ecuación diferencial que permite calcular la evolución del nivel de embalse y caudal erogado, se utilizó un intervalo de 1 hora.