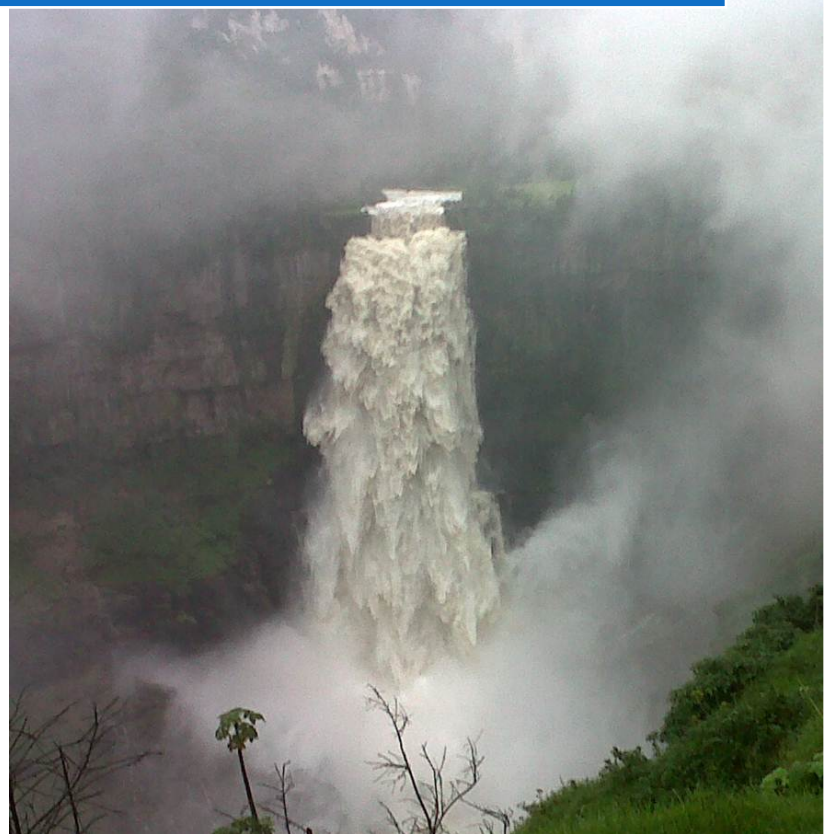


METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN REGIONAL DEL AGUA (ERA)

Documento síntesis



**REALIZAR UNA PROPUESTA DE ESTRATEGIAS,
METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE LA EVALUACIÓN REGIONAL
DEL AGUA, ASÍ COMO PARA DEFINIR LOS
REQUERIMIENTOS FUNCIONALES DEL SISTEMA DE
INFORMACIÓN REGIONAL DEL RECURSO HÍDRICO**

ORDEN DE SERVICIO No. 2-02-4300-908-2013

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	1
1. EVALUACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA.....	4
1.1. CONCEPTOS GENERALES	4
1.2. OFERTA DE AGUA SUPERFICIAL.....	5
1.2.1. Conceptos básicos.....	5
1.2.2. Metodología	6
1.2.3. Técnicas de espacialización	12
1.2.4. Productos.....	12
1.3. OFERTA DE AGUA SUBTERRÁNEA	13
1.3.1. Conceptos básicos.....	13
1.3.2. Metodología	21
1.3.3. Técnicas de espacialización	24
1.3.4. Productos.....	24
2. EVALUACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA	25
2.1. CONCEPTOS BÁSICOS	25
2.2. METODOLOGÍA	27
2.3. TÉCNICAS DE ESPACIALIZACIÓN.....	30
2.4. PRODUCTOS.....	30
3. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO	31
3.1. CONCEPTOS BÁSICOS	31
3.2. METODOLOGÍA	36
3.3. TÉCNICAS DE ESPACIALIZACIÓN.....	37
3.4. PRODUCTOS.....	38
4. ANÁLISIS DEL RIESGO EN LA EVALUACIÓN REGIONAL DEL AGUA	39
4.1. CONCEPTOS BÁSICOS	39
4.2. METODOLOGÍA	40
4.3. TÉCNICAS DE ESPACIALIZACIÓN.....	43
4.4. PRODUCTOS.....	43
5. INDICADORES DEL RECURSO HÍDRICO	43
5.1. INDICADORES DEL SISTEMA HÍDRICO NATURAL	44
5.2. INDICADORES DE INTERVENCIÓN ANTRÓPICA.....	44
5.2.1. Indicadores de presión por uso del agua.....	44
5.2.2. Indicadores de estado de la calidad del agua y presión por contaminación.....	47
5.2.3. Indicadores de riesgo en la evaluación regional del agua	49
5.3. TÉCNICAS DE ESPACIALIZACIÓN.....	51
5.4. PRODUCTOS	51
6. SISTEMA DE INFORMACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO SIRH	52
6.1. CONCEPTOS BÁSICOS	52
6.2. METODOLOGÍA GENERAL	52
6.3. TÉCNICAS DE ESPACIALIZACIÓN.....	54
6.4. PRODUCTOS	55
DOCUMENTACIÓN CONSULTADA	56

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN REGIONAL DEL AGUA (ERA)

INTRODUCCIÓN

Esta presentación se basa en el documento: "Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua" (Ideam, 2013, 218 pp). Su objetivo es suministrar a los funcionarios de las entidades del Distrito Capital, los elementos metodológicos comunes para el estudio regional del agua de la región Bogotá – Cundinamarca¹.

¿Qué es la evaluación regional del agua ERA?

La evaluación regional del agua (ERA) busca el conocimiento del estado actual, la dinámica y las tendencias de los sistemas hídricos regionales, resultantes de la interacción de los procesos naturales y antrópicos, que sirva de base a la adecuada administración del uso y manejo sostenibles del recurso.

Por tanto, la ERA debe cubrir los diversos aspectos relativos al uso del agua, a saber:

- La oferta y disponibilidad espacio-temporal de la cantidad del recurso hídrico.
- La demanda actual del recurso y sus tendencias en el tiempo y el espacio.
- La calidad del recurso, que afecta tanto la disponibilidad como el uso.
- Las amenazas de origen natural y antrópico sobre el recurso y la vulnerabilidad de éste a tales amenazas.

Los resultados del ERA deben ser susceptibles de expresarse en forma de un sistema coherente de indicadores, susceptibles de seguimiento y actualización periódicas, y de integrarse al Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH, que, a su vez, forma parte del Sistema de Información Nacional Ambiente SINA.

¿Cómo se elabora la evaluación regional del agua?

La evaluación regional del agua no es un proceso estático en el tiempo y el espacio, sino un proceso dinámico de inventario de datos, procesamiento, análisis y elaboración de indicadores de estado y presión sobre el agua, que deben ser actualizados periódicamente. En principio, están a cargo de las autoridades ambientales regionales (CARs), pero en ella deben intervenir todos los actores, en especial los departamentos, distritos o municipios, autoridades ambientales urbanas y usuarios del recurso hídrico, en especial las empresas de acueducto y alcantarillado. La figura 1 muestra la metodología general para la elaboración de la ERA, sus propósitos, resultados, componentes temáticos y productos a obtener.

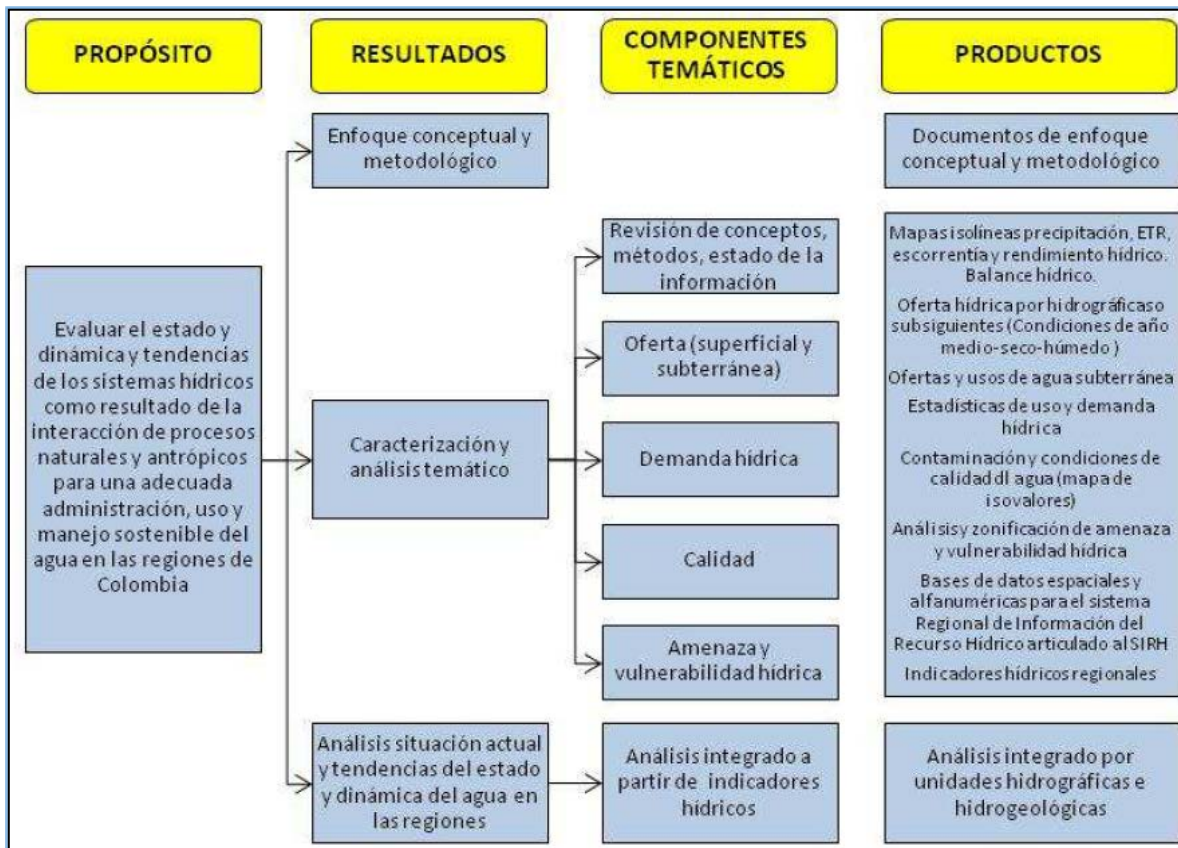
¿Para qué sirve la evaluación regional del agua?

La información generada por la evaluación regional del agua (ERA) debe servir a los siguientes propósitos:

- Soportar las decisiones de las autoridades ambientales regionales y locales en materia de concesiones de agua, permisos de vertimientos, ocupación de cauces, licencias ambientales y otros actos de su competencia relacionados con la administración del agua.
- Facilitar el ejercicio de las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua a cargo de las autoridades ambientales, que permitan soportar el ejercicio de la función sancionatoria.
- Soportar la toma de decisiones en materia de sistemas de abastecimiento y disposición de aguas servidas por parte de las autoridades a cargo de estos servicios.
- Alimentar los sistemas regionales y locales de prevención y atención de desastres relacionados con el recurso hídrico, como inundaciones, sequías y desabastecimiento hídrico de comunidades y actividades socioeconómicas.
- Alimentar el Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH, que constituye la plataforma de conocimiento del recurso hídrico a nivel regional y nacional.

¹ Si bien, en términos generales, se siguen los lineamientos metodológicos del IDEAM, el presente documento no es estrictamente un resumen del mismo, pues adopta una organización diferente y hace algunos aportes propios que son de exclusiva responsabilidad de Epam.

Figura 1. Metodología general de las evaluaciones regionales del agua ERA



¿Cuál es el marco legal e institucional de las ERA?

Si bien la evaluación regional del agua se sustenta en disposiciones tan antiguas y vigentes como el Código de Recursos Naturales y del Ambiente (Decreto Ley 2811 de 1974) y la Ley 99 de 1993, su implementación, a cargo de las autoridades ambientales regionales, fue establecida por el Decreto 1640 de 2012, que, además, dio un plazo de tres años a estas entidades para su desarrollo, a partir de la expedición de la metodología correspondiente por parte del IDEAM (ver figura 2). De acuerdo con esta metodología, las ERA deben servir de base a la actualización periódica del estudio nacional del agua ENA, cuya última versión se publicó en 2010. Las ERA se sitúan en el conjunto institucional nacional del agua como se muestra en la figura 3. Se observa que el nivel de planificación y evaluación nacional corresponde a las 5 áreas hidrográficas y 41 zonas hidrográficas; este es el nivel del ENA. El nivel de planificación regional corresponde a las 309 subzonas hidrográficas en que se ha subdividido el territorio nacional; este es el nivel de las ERA, a cargo de las AA y los municipios, cuyo instrumento de planificación es el plan de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA). A un nivel más detallado, estos instrumentos se desarrollan en planes de manejo e instrumentos tales como los planes de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV).

En los capítulos que siguen se desarrollarán los lineamientos para la evaluación de la oferta, la demanda, la calidad y los riesgos de los recursos hídricos objeto de la ERA. Finalmente se describirá el sistema de indicadores propuestos específicamente para este nivel de planificación.

Figura 2. Marco legal general de las ERA

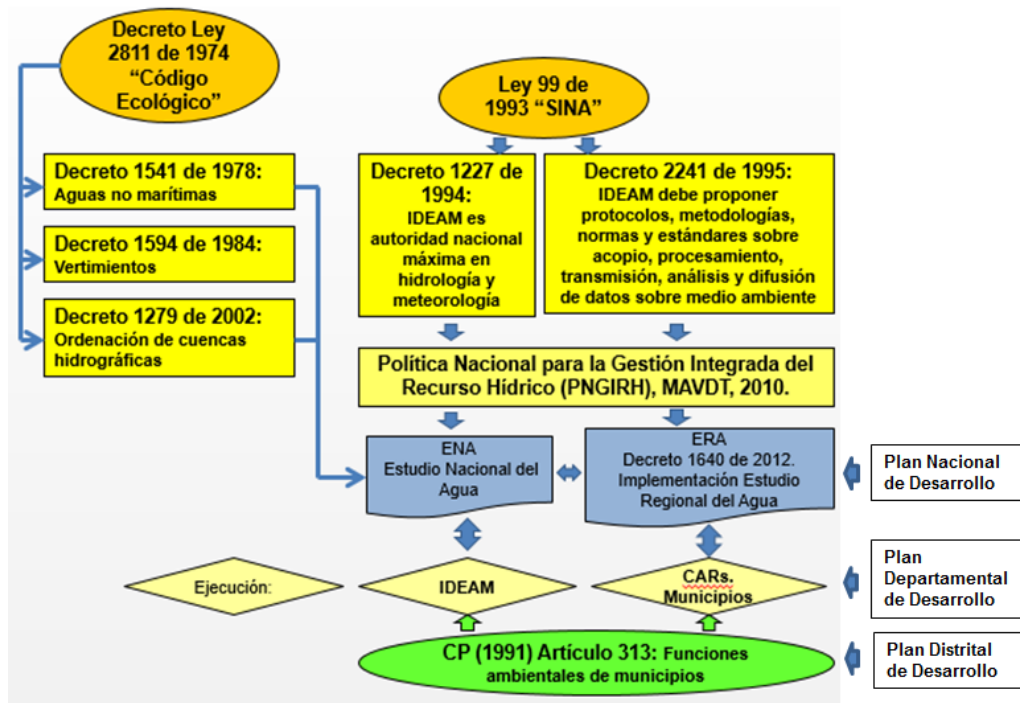


Figura 3. Estructura de planificación de la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico PNGIRH (adaptado de IDEAM, 2010)



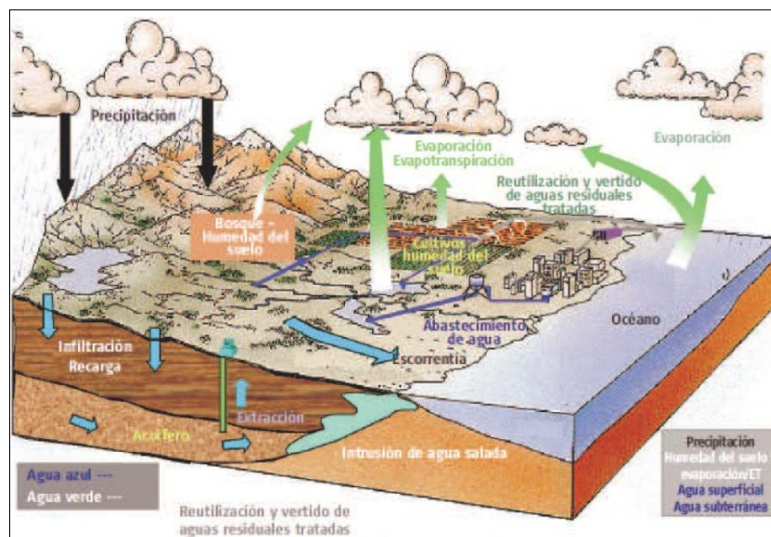
1. EVALUACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA

1.1. CONCEPTOS GENERALES

La oferta hídrica es la cantidad de agua y su régimen, susceptible de aprovechar para diferentes fines en un territorio dato. Esta oferta puede ser superficial y/o subterránea. La base de la determinación de la oferta hídrica es el concepto de ciclo hidrológico, esquematizado en la figura 4. El agua es un recurso natural renovable, es decir, en continua transformación a través de sus tres estados básicos: sólido, líquido y gaseoso.

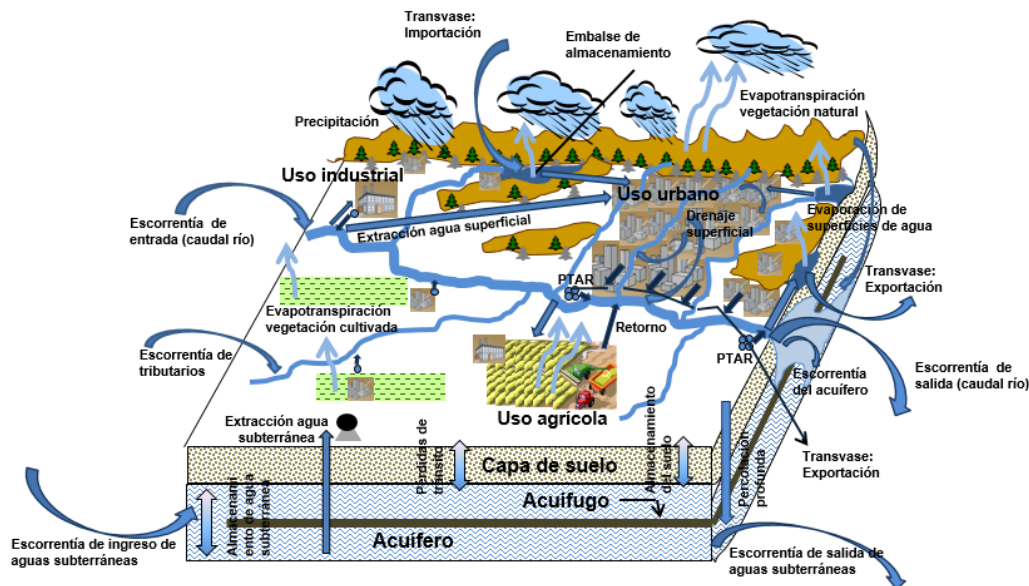
- **La precipitación** es el agua que cae sobre el suelo en forma líquida (lluvia) o en forma de cristales de nieve y/o granizo.
- Luego de caer, la precipitación líquida escurre sobre el suelo en forma laminar o concentrada y llega en forma más o menos rápida a los ríos, lagos y finalmente al mar (**escorrentía superficial**). La precipitación sólida (nieve, granizo) se acumula sobre el suelo por períodos desde algunas horas a cientos de años (caso de los casquetes glaciares), pero luego, gracias a la temperatura ambiente, se transforma en líquido y llega también a los ríos, lagos y mar.
- Otra parte se infiltra en el suelo (**infiltración**), alimentando los acuíferos o depósitos de agua subterránea, situados a veces a profundidades grandes, pero finalmente resurge a través de manantiales y llega también a los ríos y al mar (**escorrentía subterránea**).
- En este recorrido, parte del agua es absorbida por las plantas y luego transpirada a través de sus órganos aéreos, de donde se evapora a la atmósfera, y otra parte se evapora directamente desde el suelo, los ríos, los lagos y el mar. El conjunto de la evaporación a partir del suelo y de las superficies de agua y la transpiración de las plantas constituye la **evapotranspiración**.
- Una vez en la atmósfera, el vapor de agua se acumula durante algunas horas hasta máximo 1,5 semanas, y es transportado por los vientos y forzado a ascender, proceso en el cual se condensa y forma nubes que, al alcanzar un determinado desarrollo vertical, cae nuevamente en forma de lluvia o de precipitación sólida.

Figura 4. Esquema del ciclo hidrológico (UNESCO, 2006; en IDEAM, 2013)



Un concepto derivado del ciclo hidrológico es el balance hídrico, al cual se hará referencia más adelante, o el de presupuesto de agua, esquematizado en la figura 5. Este concepto implica que para cualquier territorio es posible estimar las entradas y salidas de agua, así como las cantidades usadas y las pérdidas en el proceso, desde que se disponga de la información adecuada.

Figura 5. El concepto de presupuesto del agua aplicado a una región específica



1.2. OFERTA DE AGUA SUPERFICIAL

1.2.1. Conceptos básicos

La estimación de la oferta distingue dos tipos de cuencas hidrográficas: intervenidas y poco intervenidas, en función de si el régimen de caudales ha sido significativamente alterado o no por la acción antrópica. Además, contempla los siguientes conceptos (IDEAM, 2013):

Oferta hídrica total superficial (OHTS): Volumen total de agua que fluye sobre la superficie del terreno y se concentra en los cauces de los ríos y en los cuerpos de agua lénticos. Se representa por el caudal total de escorrentía Q_t .

Oferta hídrica disponible (OHTD): Volumen promedio de agua que resulta de sustraer de la oferta total superficial (OHTS) el volumen de agua correspondiente al caudal ambiental (Q_{amb}). Se representa por el caudal disponible Q_d .

Oferta hídrica regional disponible (OHRD): Volumen promedio de agua que resulta de adicionar a la oferta hídrica disponible (OHTD) los volúmenes de agua de retorno (Q_r) de los diferentes usos y de sumar o restar los caudales de trasvase (Q_{tr}) desde o hacia otras cuencas. Es la oferta que se utiliza para el cálculo del índice de uso del agua (IUA). Se representa por el caudal disponible regional Q_{dr} .

Oferta hídrica regional aprovechable (OHRA): Volumen promedio de agua que resulta de restar del volumen medido en la estación hidrométrica de referencia, representativa de la unidad de análisis, el volumen de agua correspondiente al caudal ambiental. Se representa por el caudal hídrico regional aprovechable Q_{hra} .

Caudal ambiental (Q_{amb}): Volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad, para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas (Decreto 3930/2010). Si bien el caudal ambiental debe, por tanto, estimarse con base en criterios hidrológicos, hidráulicos, biológicos y socioeconómicos, mientras el IDEAM define la metodología específica de cálculo, se ha propuesto utilizar los caudales Q_{75} o Q_{85} de la curva de duración de caudales diarios (en caso de disponerse de series de caudal) o de caudales mensuales (en caso de utilizar modelos lluvia-caudal). En caso de utilizar caudales mensuales, el procedimiento contempla un factor de ajuste resultante de la relación entre los caudales diarios y mensuales para estas frecuencias, calculada para estaciones de ríos vecinos con información diaria.

Caudal de retorno (Q_r): Caudal retornado a las corrientes o cuerpos de agua por cada usuario; depende del tipo de uso y de las condiciones climáticas y tecnológicas. Por ejemplo, para el uso residencial doméstico, el RAS 2000 recomienda entre 0,75 y 0,85 del caudal extraído o usado, que, en principio, va al alcantarillado.

Caudal de trasvase (Q_{tr}): Caudal de agua que se desvía de una cuenca a otra, para aumentar la disponibilidad. En el caso de una unidad de análisis específica, puede ser positivo (si entra) o negativo (si sale hacia otra cuenca).

Caudal medido en la estación representativa (Q_{est}): Caudal medido en la estación hidrométrica de referencia, que debe ser representativa de la unidad de análisis correspondiente.

Caudal extraído (Q_{ex}): Caudal total extraído de una fuente para la atención de las demandas de los diferentes usos.

La tabla 1 muestra las principales relaciones de los diferentes tipos de caudales.

Tabla 1. Principales relaciones entre caudales

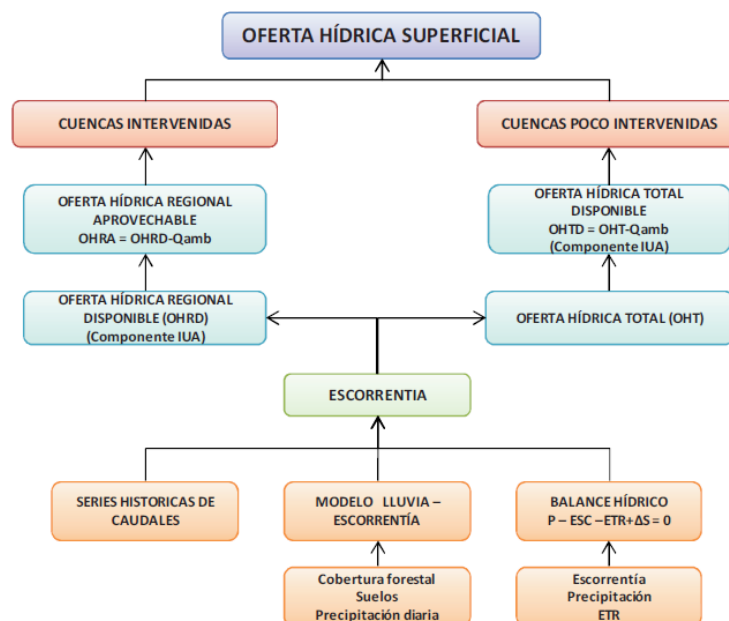
Caudal	Fórmula
Caudal total de escorrentía	Q_t
Caudal disponible	$Q_d = Q_t - Q_{amb}$
Caudal disponible regional	$Q_{dr} = Q_t - Q_{amb} + Q_r \pm Q_{tr}$
Caudal aprovechable	$Q_{hra} = Q_{est} - Q_{amb}$
Caudal ambiental	$Q_{amb} = Q_{d75}, 0, = Q_{d85}$ Factor de ajuste = $Q_{d85}/Q_{m85}, 0, = Q_{d75}/Q_{m75}$

1.2.2. Metodología

La metodología a emplear en la estimación de la oferta depende de la disponibilidad de información (ver figura 6):

- Si existen series históricas de caudales en estaciones representativas de la(s) cuenca (s) aprovechadas, el método básico se basa en la construcción de la curva de duración de caudales diarios.
- Si no existen datos de caudales, se pueden utilizar dos métodos:
 - La generación de series de caudales mensuales mediante modelos lluvia – caudal
 - Cálculo de la escorrentía mediante la estimación del balance hídrico.

Figura 6. Procedimiento para evaluar la oferta hídrica superficial regional (IDEAM, 2013)

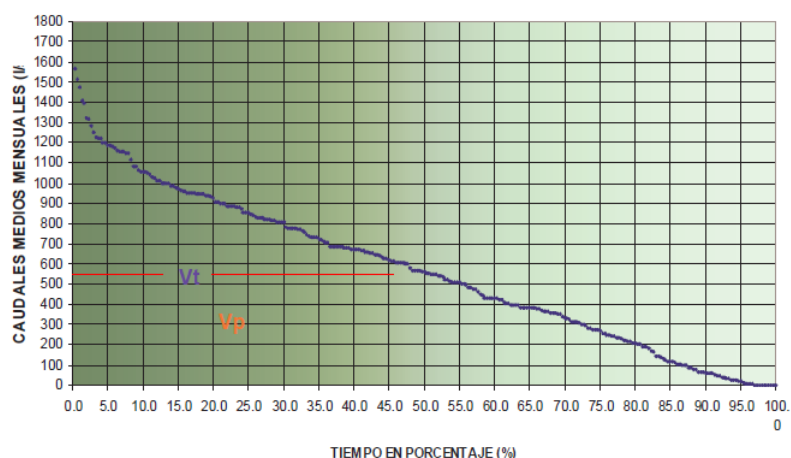


a) Cálculo de la oferta a partir de las series de caudales diarios

La base del cálculo consiste en la construcción de la curva de duración de caudales diarios, la cual es una curva de frecuencias acumuladas que expresa el porcentaje de tiempo durante el cual es igualado o excedido un caudal determinado. En estas curvas, el eje de las ordenadas representa el caudal medio diario (o el caudal que se desee normalizar) y el eje de las abscisas el porcentaje de tiempo (año, mes, día) durante el cual un valor determinado de

caudal es igualado o excedido en un período dado de tiempo. La figura 7 muestra un ejemplo de curva de duración de caudales típica.

Figura 7. Ejemplo de curva de duración de caudales (IDEAM, 2013, Estación Playa Rica)



Antes de construir la curva de caudales diarios, es necesario adelantar un proceso de selección de estaciones a utilizar, tanto dentro de la cuenca como en cuencas vecinas, depurar la información de cada serie de datos y homogeneización de las mismas a un período común, en lo posible de más de 20 años. Para este efecto es fundamental utilizar una estación de la red nacional de referencia (red del IDEAM), a partir de la cual se pueden establecer correlaciones con estaciones de período más corto. En general, las series de caudales se construyen a partir de las series de niveles, utilizando para ello la curva de calibración o curva de gastos, construida a su vez con base en la estadística de aforos líquidos. Pero, por lo general, las entidades entregan las tablas de caudales diarios en Excel.

A partir de la curva de duración de caudales medios diarios es posible determinar un conjunto de parámetros característicos de la oferta hídrica en el sitio de la estación hidrométrica. La tabla 2 muestra los principales parámetros de interés para las ERA.

Tabla 2. Información necesaria para la evaluación de la oferta, estimada a partir de la serie de caudales medios diarios y la curva de duración correspondiente

Componente del régimen		Parámetro	Aplicación técnica
Valores normales	Valores anuales y mensuales	Caudal medio anual multianual (m^3/s)	Magnitud oferta hídrica
		Caudal medio mensual multianual (m^3/s)	Magnitud oferta hídrica
		Caudal mínimo mensual multianual (m^3/s)	Estacionalidad oferta hídrica
		Caudal máximo mensual multianual (m^3/s)	Estacionalidad oferta hídrica
		Diferencia entre caudal máximo y mínimo medio mensual (m^3/s)	Variabilidad oferta hídrica
		Mes de caudal máximo y mínimo en el año	Estacionalidad oferta hídrica
	Valores diarios	Percentil de excedencia del 50% curva caudales diarios (m^3/s)	Caudal característico medio
		Percentil de excedencia del 10% curva caudales diarios (m^3/s)	Variabilidad diaria anual
		Percentil de excedencia del 90% curva caudales diarios (m^3/s)	Variabilidad diaria anual
		Diferencia entre caudales de percentiles del 10% y 90%	Variabilidad diaria anual
		Caudal medio máximo diario multianual (m^3/s)	Magnitud y frecuencia
		Caudal medio mínimo diario multianual (m^3/s)	Magnitud y frecuencia
Valores extremos	Valores máximos (avenidas)	Caudal rebasado 10 días al año	Caudal característico máximo
		Percentil de excedencia del 5% curva caudales diarios (m^3/s)	Avenida normal
		Coefficiente de variación de caudales máximos diarios CV (%)	Variabilidad caudales
		Máximo número de días consecutivos con caudal medio diario $>Q_{5\%}$	Duración
	Valores mínimos (sequías)	Caudal rebasado 355 días al año	Caudal característico mínimo
		Percentil de excedencia del 95% curva caudales diarios (m^3/s)	Sequía habitual
		Coefficiente de variación de caudales mínimos diarios CV (%)	Variabilidad caudales
		Promedio días al mes con caudal medio diario $<Q_{95\%}$	Duración
		Máximo número de días consecutivos con caudal medio diario $<Q_{95\%}$	Duración
		Promedio días al año con caudal medio diario = 0	Duración
Otros valores		Percentil de excedencia del 75% curva caudales diarios (m^3/s)	Cálculo caudal ambiental

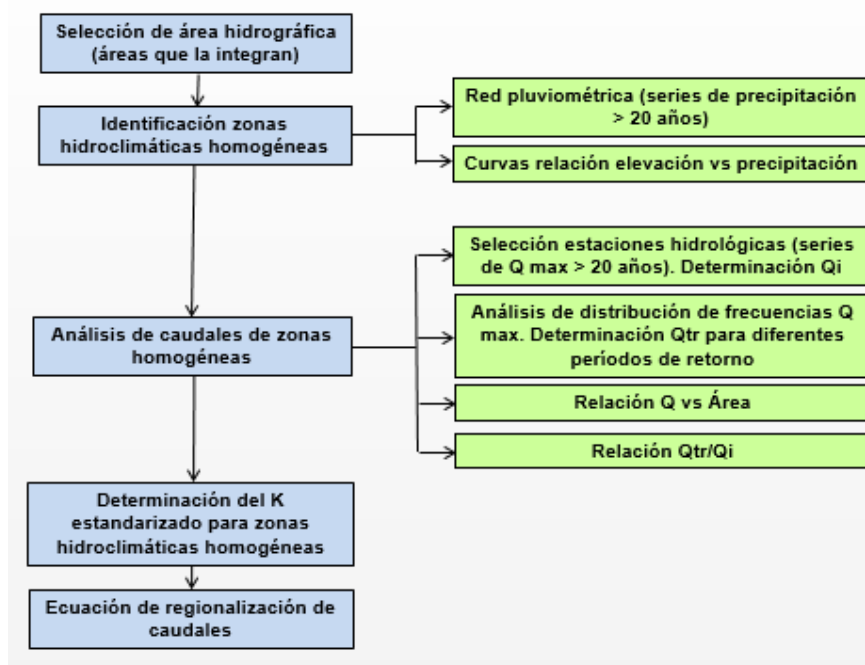
Componente del régimen	Parámetro	Aplicación técnica
	Percentil de excedencia del 85% curva caudales diarios (m^3/s)	Cálculo caudal ambiental
	Percentil de excedencia del 75% curva caudales mensuales (m^3/s)	Cálculo caudal ambiental
	Percentil de excedencia del 85% curva caudales mensuales (m^3/s)	Cálculo caudal ambiental

La curva de duración de caudales define el régimen de caudales de una corriente, ya que permite determinar la distribución de caudales en el tiempo. Los caudales característicos (medio, máximo y mínimo) determinados igualmente sobre la curva de duración (ver tabla 1), permiten caracterizar las condiciones medias, húmedas y secas de una cuenca. Por tanto, esta curva permite analizar la disponibilidad y variabilidad de caudales de una cuenca, esto es, su régimen hidrológico. Asimismo, la forma (tendencia) de la curva permite analizar la capacidad de regulación natural de una cuenca, la cual depende del relieve, la cobertura vegetal y las características geomorfológicas, entre otras.

Regionalización de caudales

Las estaciones hidrométricas están localizadas en un punto específico de una cuenca y, por tanto, sus valores característicos son válidos para ese punto de la corriente. Pero, por lo general, es necesario conocer los caudales en puntos donde no hay estación o donde los datos son insuficientes. Para lograr este propósito se recurre a análisis de regionalización de caudales. El proceso general es el mostrado en la figura 8.

Figura 8. Proceso de regionalización de caudales (IDEAM, 2013)



Una vez seleccionada el área hidrográfica de estudio, se procede a identificar las zonas hidroclimáticas homogéneas, para lo cual se seleccionan las estaciones de precipitación con series en lo posible de más de 20 años. Estas series deben ser sometidas a un proceso de depuración y homogeneización, antes de calcular sus valores característicos. Luego se elaboran curvas de precipitación media multianual vs elevación, cuyas formas permiten separar zonas climáticamente homogéneas. Por ejemplo, en regiones montañosas, zonas donde la precipitación aumenta con un gradiente dado con la altitud, y zonas donde disminuye con la altitud.

Una vez definidas las zonas climáticas homogéneas, se seleccionan las estaciones hidrométricas con series de caudales en lo posible de más de 20 años, se depuran y homogeneizan, y se realiza en cada una de ellas un análisis de distribución de frecuencias. Por ejemplo, si se trata de regionalizar caudales máximos, las series de caudales máximos se ajustan a diferentes distribuciones, de las cuales las más empleadas son Pearson Tipo III, Log Pearson Tipo III, Normal, Log Normal y Gumbel. Para cada distribución se obtienen los estadígrafos característicos (coeficiente de

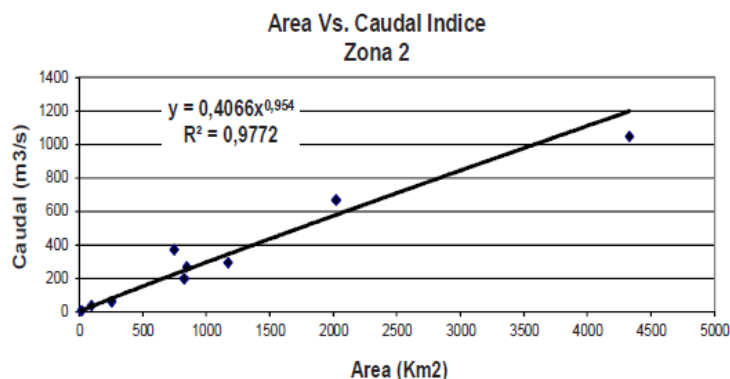
variación, asimetría, kurtosis, etc) y, en función de ellos, se estiman los caudales máximos para diferentes períodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años, entre otros posibles).

Para cada estación se determina el caudal máximo medio, denominado *caudal índice* Q_i , y se construye la relación entre caudal índice y área aferente a cada estación (ver ejemplo en figura 9). La ecuación resultante es del tipo:

$$Q_i = C \cdot A^n \quad (1)$$

Si el coeficiente de correlación de la regresión anterior es bueno, se verifica la homogeneidad hidrológica de la zona.

Figura 9. Ejemplo de relación entre caudal máximo y área



Fuente: IDEAM, 2013.

Luego se construye la relación entre el Q_i de cada estación y los caudales correspondientes a cada uno de los períodos de retorno (Q_r) seleccionados. Los valores de K se promedian para todas las estaciones de la región, y se obtiene la ecuación de regionalización del tipo siguiente, que permite estimar los caudales para diferentes períodos de retorno en cualquier punto de la cuenca:

$$Q_{Tr} = K_{Tr} \cdot Q_i \quad (2)$$

Donde:

Q_{Tr} : Caudal para un determinado período de retorno y para un área específica dentro de la región hidrográfica analizada.

K_{Tr} : Valor adimensional estandarizado obtenido en la curva de frecuencias o en las tablas definidas para cada caso especial.

Q_i : Caudal índice estimado como se indicó arriba, para la misma área específica dentro de la región hidrográfica analizada

El mismo procedimiento se puede utilizar para regionalización de caudales mínimos. La tabla 3 muestra la información resultante de los análisis de frecuencia de caudales diarios máximos.

Tabla 3. Información resultante de los análisis de frecuencia

Tipo de información	Información necesaria
Hidrológica	Caudal índice o caudal máximo medio multianual (Q_i)
	Caudales de crecientes para diferentes períodos de retorno: 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años.
	Hidrogramas de crecientes con diferentes períodos de retorno

b) Cálculo de la oferta a partir de modelos lluvia - caudal

Cuando no se dispone de datos de caudales diarios, o éstos son insuficientes o de calidad inadecuada, los caudales medios y extremos pueden generarse mediante la utilización de un modelo lluvia-escorrentía. Estos modelos parten del conocimiento de la lluvia como variable de entrada y, en función de las características de la cuenca, estiman la parte de la lluvia que se convierte en escorrentía directa. Entre estas características, las más importantes son las morfométricas

(área, perímetro, pendiente, forma), la geología y geomorfología, el tipo de suelos y la cobertura vegetal existente. La tabla 4 resume la información que generalmente requiere el empleo de estos modelos.

Tabla 4. Información necesaria para los modelos lluvia – caudal

Tipo de información	Información necesaria
Cartográfica	Planchas topográficas del IGAC a escala 1:25.000, 1:10.000 o mayor, con curvas de nivel acordes a la escala. DEM 30
Generales de la cuenca (a partir de mapa topográfico)	Parámetros morfométricos: área, perímetro, longitud de la corriente, sinuosidad, densidad de drenaje, patrón de drenaje, factor de forma, elevación media de la cuenca, pendiente media de la cuenca, pendiente media de la corriente, tiempo de concentración.
Fisiográficas de la cuenca (a partir de mapas temáticos)	Mapa de distribución de pendientes (DEM)
	Mapa geológico (litología)
	Mapa geomorfológico (procesos)
	Mapa de suelos y aptitud
	Mapa de coberturas de la tierra
Climatológicas	Lluvia diaria
	Lluvias máximas diarias (en 24 h)

No sobra advertir que, antes de su utilización, las series de lluvias deben ser sometidas a análisis de consistencia y validez de los registros, con el fin de depurarlas de datos defectuosos. Asimismo, mediante análisis de regresión con estaciones vecinas, se puede llevar las series a un período homogeneizado o común. En la literatura y en el mercado se pueden encontrar diferentes tipos de modelos utilizables. Uno de los más conocidos es el modelo lluvia – caudal del Soil Conservation Service de EEUU, cuya aplicación contempla la selección de series de lluvias máximas de 24 horas de estaciones vecinas y el análisis de frecuencia de las mismas para determinar las lluvias máximas para diferentes períodos de retorno. A partir de éstas y mediante modelos como HEC-HMS ((Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) de los Estados Unidos de América (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>), se pueden determinar las crecientes con diferente período de retorno y de los hidrogramas correspondientes. El procedimiento involucra, el cálculo del área aferente, la duración del aguacero de diseño, la selección del valor del número de curva CN en función del tipo de suelo hidrológico, el uso y tratamiento del suelo, las combinaciones hidrológicas de suelo y vegetación, y las condiciones de humedad antecedente a la lluvia máxima en consideración, la estimación y distribución de la lluvia efectiva y de las pérdidas de agua y la determinación del tiempo de concentración del aguacero. Los detalles de la aplicación del modelo pueden encontrarse en la fuente citadas del USCS. Debido a que el modelo lluvia-caudal mediante el cual se calculan las crecientes es incierto, se adelanta su calibración por medio de la comparación de sus resultados con caudales máximos estimados en cuencas vecinas con series históricas de caudales, o mediante su comparación con estudios de regionalización de caudales máximos aplicables a la(s) cuenca(s) en consideración. Otros modelos, como el ya mencionado HEC HMS, permiten estimar series de caudales medios mensuales, con base en las series de lluvias mensuales.

c) Cálculo de la oferta a partir de balances hídricos

El balance hídrico determina la disponibilidad del agua en cada una de las fases del ciclo hidrológico: precipitación, evaporación, infiltración y escorrentía superficial (ver figuras 3 y 4). La base física del balance hidrológico es la formulación de las ecuaciones de conservación de masa para volúmenes de control o unidades hidrológicas determinadas. Expresa la equivalencia entre los aportes de agua que entran al volumen de control y la cantidad de agua que sale considerando además las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante un periodo de tiempo determinado. La ecuación general del balance hídrico en una cuenca intervenida es del tipo siguiente:

$$P - ETR - Ex - Rt \pm Tr \pm \Delta S \pm \Delta er = Esc \quad (3)$$

Donde:

P: Precipitación (mm).

ETR: Evapotranspiración real (mm) (evaporación + transpiración)-

Ex: Sumatoria del volumen extraído expresado en mm (demanda) para el período en consideración.

Tr: Sumatoria del volumen de trasvase (mm) hacia (+) o desde (-) la cuenca.

Rt: Sumatoria del volumen de agua que retorna a la cuenca asociada a diferentes actividades, en el período considerado (mm).

ΔS : Cambio de almacenamiento (mm).

Δer : Término residual de discrepancia (mm).

Esc : Escorrentía media a partir del caudal medido en la estación hidrométrica (mm) durante el período considerado.

Es evidente que, en cuencas no intervenidas, los términos Ex , Rt y Tr serían iguales a cero. Como se puede observar, las unidades de los diferentes componentes del balance hídrico están dadas en lámina de agua (mm). Esto supone que, para poder estimar la escorrentía en cualquier punto de una cuenca es necesario disponer de mapas de isolíneas de precipitación y evapotranspiración real. En el caso de la precipitación, la construcción de estos mapas es posible mediante la utilización de datos de las estaciones pluviométricas y pluviográficas existentes dentro y en los alrededores de la cuenca o área de interés. En el caso de la ETR, es necesario estimar la ETP en una red de *puntos virtuales* del área y, luego, estimar, para esos mismos puntos la ETR y construir el mapa de isolíneas mediante métodos de interpolación manuales o automáticos (ver más adelante, métodos de espacialización). Los datos expresados en lámina de agua (mm) pueden ser transformados en volumen, multiplicando la lámina por el área, o a unidades de caudal, dividiendo el volumen por las unidades de tiempo en que se desee expresar el caudal (días, segundos, etc).

La metodología ERA de IDEAM propone estimar la ETR a partir de la evapotranspiración potencial (ETP) y la precipitación (P), mediante la fórmula de Budyko, así:

$$ETR = ((ETP * P * \tanh(P/ETP)) (1 - \cosh(ETP/P) + \sinh(ETP/P)))^{1/2} \quad (4)$$

O según la fórmula de Turc, así:

$$ETR = P / (0,9 + (P^2 / L^2))^{1/2} \quad (5)$$

(para $P/L > 0,316$)

Donde:

L : Factor heliotérmico,

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3 \quad (6)$$

T : Temperatura media anual en °C.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se puede emplear las ecuaciones de Penman-Monteith, las cuales se pueden encontrar en la literatura especializada. Para fines de comprensión, es necesario recordar el significado de los conceptos de evapotranspiración, así:

Evapotranspiración real (ETR) o efectiva. Es la cantidad de vapor de agua efectivamente evaporada por el suelo y por las plantas cuando el suelo está a una humedad específica natural.

Evapotranspiración potencial (ETP). Es la cantidad máxima de agua susceptible de pasar a la atmósfera en estado de vapor, en un clima dado, a partir de una cubierta vegetal continua bien alimentada en agua. Por tanto, la ETP comprende la evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación durante un período de tiempo dado.

De acuerdo con lo expuesto, la tabla 5 muestra la información necesaria para la aplicación de ese método.

Tabla 5. Información necesaria para la estimación del balance hídrico

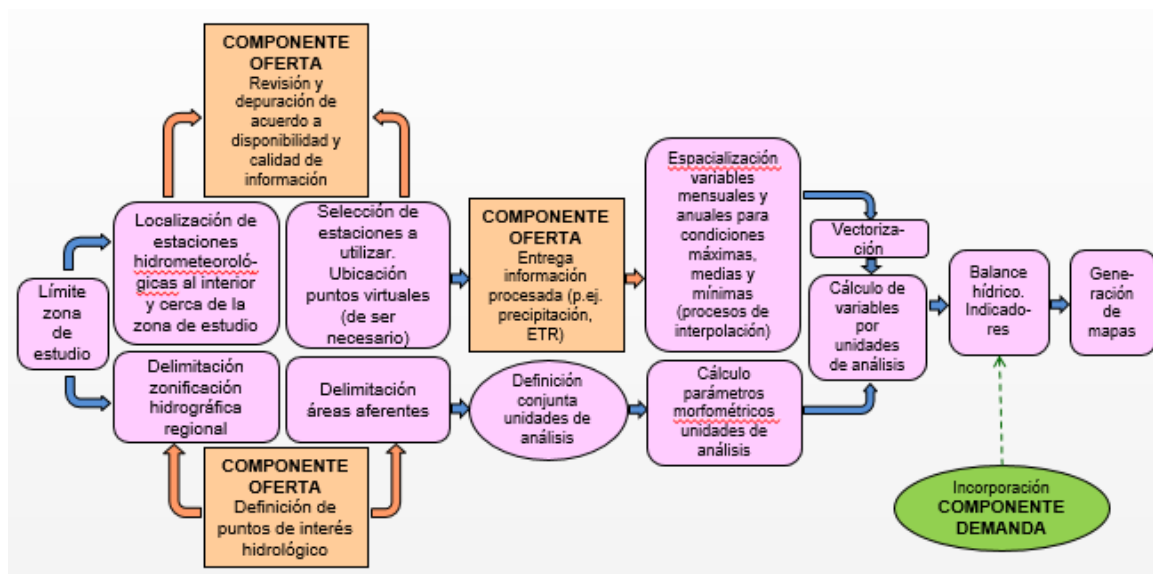
Tipo de información	Información necesaria
Cartográfica	Planchas topográficas del IGAC a escala 1:25.000, 1:10.000 o mayor, con curvas de nivel acordes a la escala.
	DEM 30
Climatológicas	Lluvia media anual
	Lluvia media anual multianual
	Temperatura media anual
	Temperatura media anual multianual
	Evapotranspiración real media anual
	Evapotranspiración real media anual multianual
	Evapotranspiración potencial media anual *
	Evapotranspiración potencial media anual multianual *
Hidrológicas	Volumen total anual de extracción de agua (demanda)
	Volumen total anual multianual de extracción de agua (demanda)

Tipo de información	Información necesaria
	Volumen total anual de agua trasvasada de (o hacia) otras cuencas ($\pm$)
	Volumen total anual multianual de agua trasvasada de (o hacia) otras cuencas ($\pm$)
	Volumen total anual de agua de retorno, por uso y total.
	Volumen total anual multianual de agua de retorno, por uso y total
	Cambio de almacenamiento anual
	Cambio de almacenamiento anual multianual
	Caudal medio anual medido en la estación de referencia
	Caudal media anual multianual en la estación de referencia
*No se incluyen los parámetros necesarios para el cálculo de la ETP	

1.2.3. Técnicas de espacialización

La figura 10 muestra el procedimiento general de espacialización de las variables hidrometeorológicas. En primer lugar es necesario ubicar y seleccionar las estaciones a utilizar en el análisis (incluidos los puntos virtuales), procesar la información y elaborar los mapas de cada una de las variables, a nivel mensual, anual o multianual, según corresponda; esta información debe ser vectorizada para su tratamiento en el SIG. Paralelamente, se debe realizar la zonificación hidrográfica regional (con ayuda del DEM), delimitar las áreas aferentes (cuencas de interés), definir las unidades de análisis y calcular los parámetros morfométricos de las unidades de análisis. Con base en los mapas vectorizados y en los parámetros morfométricos, se estiman las variables a nivel de cada unidad de análisis, se elaboran los mapas de estas variables, se estiman los indicadores representativos de la oferta y se generan los mapas de los indicadores.

Figura 10. Procedimiento general de espacialización de las variables hidrometeorológicas (IDEAM, 2013)



Dado que la información disponible se refiere a una cantidad limitada de puntos, para elaborar los mapas se requiere la utilización de técnicas de interpolación tradicionales (como Inverse Distance Weighted IDW, y Spline) o geoestadísticos (como kriging y cokriging). El kriging se aplica a variables que cambian de manera continua en el espacio, de tal forma que los valores más próximos al lugar a interpolar tienden a tener valores más cercanos a éste que los más alejados, y tiene en cuenta la redundancia entre datos, la continuidad o variabilidad espacial y la anisotropía (dirección preferencial). El cokriging hace intervenir en la interpolación variables secundarias, como la altitud o el relieve. Estos sistemas están disponibles en varios sistemas de información geográfica SIG. Para convertir en lámina (mm) valores puntuales medidos de escorrentía, normalmente es necesario determinar el centroide del área aferente a cada estación, lo cual permite distribuir los valores de escorrentía y rendimiento al interior de la unidad de análisis. En todo caso, el método de interpolación debe ser escogido con criterios hidrológicos.

1.2.4. Productos

Los productos cartográficos finales de la evaluación de la oferta de aguas superficiales son:

- Mapa de la red hidrometeorológica
- Mapas de precipitación anual y mensual
- Mapas de evapotranspiración real anual y mensual
- Mapas de escurrimiento anual y mensual, para condiciones medias, máximas y mínimas.
- Mapas de rendimiento hídrico anual y mensual, para condiciones medias, máximas y mínimas.

La tabla 6 muestra las convenciones para los mapas de escurrimiento y rendimiento medio anual.

Tabla 6. Convenciones para los mapas de escurrimiento (mm) y rendimiento hídrico (l/s/km²) (IDEAM; 2013)

COLOR	ESCORRIMIENTO PROMEDIO ANUAL	RENDIMIENTO MEDIO ANUAL
	0 a 100	0 a 3
	100 a 200	3 a 6
	200 a 300	6 a 10
	300 a 400	10 a 15
	400 a 600	15 a 20
	600 a 800	20 a 30
	800 a 1000	30 a 40
	1000 a 1500	40 a 50
	1500 a 2000	50 a 70
	2000 a 2500	70 a 100
	2500 a 3000	100 a 150
	3000 a 4000	150 a 200
	4000 a 5000	Mayor a 200
	5000 a 6000	
	Mayor a 6000	

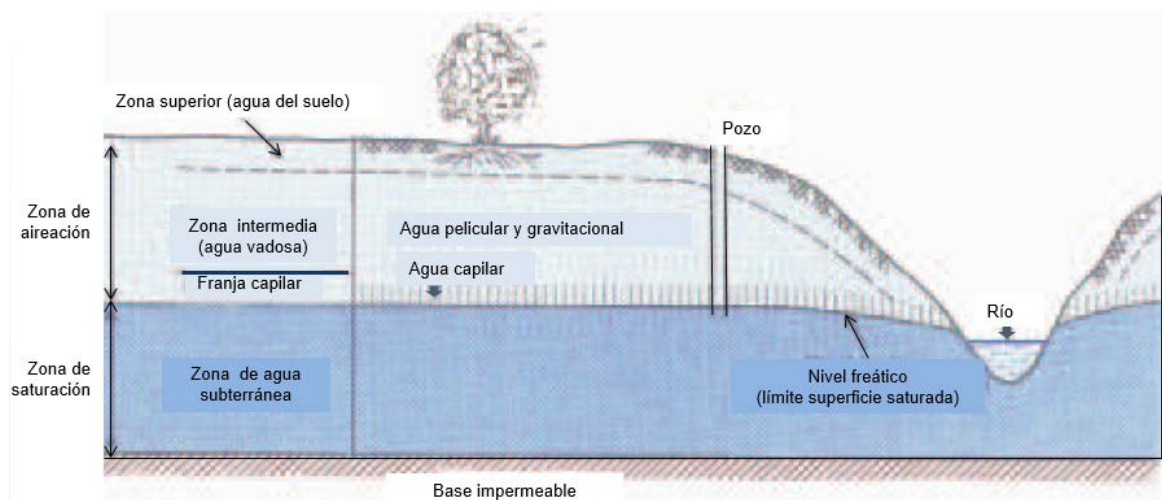
1.3. OFERTA DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.3.1. Conceptos básicos

El agua subterránea es el agua que ocurre bajo el nivel freático en los suelos y formaciones geológicas que se encuentran totalmente saturadas. El agua subterránea forma parte del ciclo hidrológico, sufriendo procesos de recarga y descarga. En general, el agua superficial y el agua subterránea son interdependientes, si bien los límites de las cuencas hidrográficas y de las cuencas hidrogeológicas no siempre coinciden. Las aguas subterráneas se caracterizan, además, por velocidades de circulación muy lentas. La estimación de la oferta de aguas subterráneas de una región exige conocer los siguientes conceptos:

- Por lo general, bajo la superficie del terreno se encuentra una **zona no saturada** o vadosa, cuyos poros están ocupados parcialmente por agua y parcialmente por aire, y una **zona saturada**, cuyos poros están ocupados en su totalidad por agua. El límite entre estas dos zonas es el nivel de saturación o nivel de agua, donde la presión es igual a la presión atmosférica. Una porción de agua puede ser removida del subsuelo por drenaje o por bombeo, pero el resto es mantenida en su sitio por las fuerzas de tensión molecular o superficial (figura 11)
- **Porosidad.** Representa el espacio intersticial de la roca y, por tanto, su capacidad de almacenar agua. Se define como el volumen de vacíos dividido por el volumen total de la roca. Se distingue la porosidad primaria o ligada al origen de la roca, por lo general homogénea, y la porosidad secundaria, adquirida con posterioridad a su disposición, como consecuencia de fracturamientos, fallamientos, dilución kárstica o pseudokárstica u otros. La porosidad depende de factores tales como la forma y colocación de las partículas, la granulometría, el grado de compactación y la cementación de los granos de una roca o formación. El concepto de *porosidad efectiva* representa la cantidad de espacios de poros interconectados disponibles para el flujo del agua y se expresa como la relación de intersticios interconectados y el volumen total. Aunque para medios porosos no consolidados y algunas rocas consolidadas las dos porosidades son idénticas, en general la porosidad efectiva se considera como una parte de la porosidad total. La tabla 7 muestra algunos valores de porosidad efectiva.

Figura 11. Distribución del agua en el suelo y el subsuelo



Fuente: ITGE, 1987, en IDEAM, 2013

Tabla 7. Valores de porosidad efectiva para diferentes materiales terrestres (IDEAM, ENA 2010)

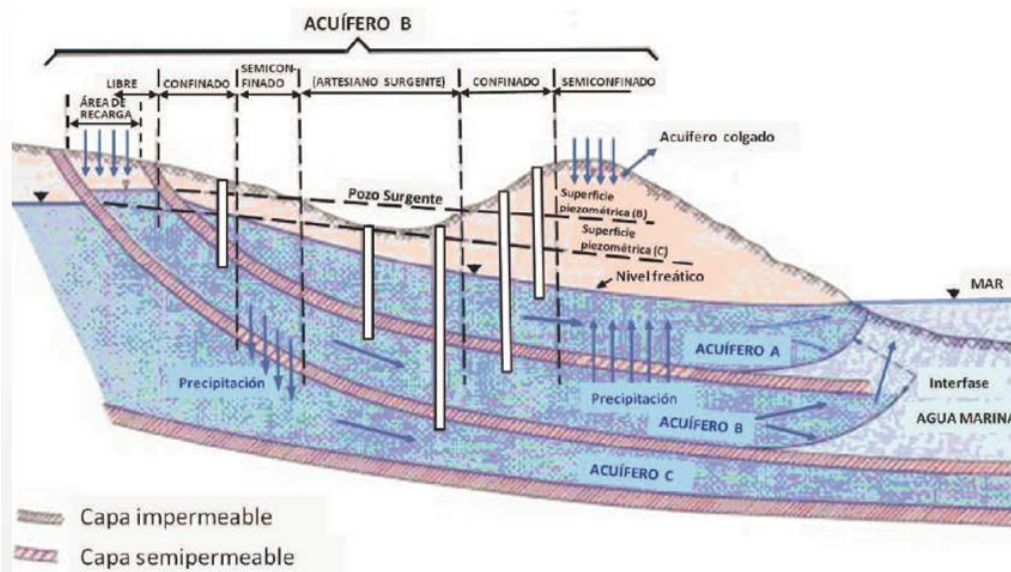
Material	Porosidad efectiva (%)				
	Walton (1970)	Johnson (1967)	Rodríguez (1984)	USGS (1987)	Sanders (1998)
Arcilla	1-10	0-5	0-3	2	
Arcilla arenosa		3-12			
Arena	10-30			22	
Arena fina		10-28	18-22		10-28
Arena media		15-32	26-28		
Arena gruesa		20-35	27-30		22-35
Arena y grava	15-25	20-35	17-21		
Arenisca	5-15				0,5-10
Arenisca semiconsolidada				6	
Grava	15-30			19	13-26
Grava fina		21-35	22-24		
Grava media		13-26	16-24		
Grava gruesa		12-28	17-22		
Caliza	0,5-5			18	
Calizas, dolomitas no carstificadas					0,5-10
Calizas, dolomitas carstificadas					5-40
Lutita	0,5-5		0-3		0,5-5
Limo		3-19			3-19
Granito				0,09	
Basalto				8	
Rocas ígneas					0,005-0,01

- **Acuíferos.** Formaciones superficiales o rocas que contienen agua subterránea y son capaces de transmitir y entregar cantidades significativas de agua. Los acuíferos son alimentados por agua que se infiltra a través de formaciones permeables, como areniscas y arenas (zonas de recarga), las cuales pueden estar o no en las cuencas altas. Las formaciones que almacenan agua pero sólo permiten el flujo muy lento de ella, por sus condiciones semipermeables o impermeables, se denominan **acuitardos**. Las que pueden contener agua pero que no la transmiten, es decir, no permiten su flujo en cantidades significativas, se denominan **acuicierres o acuicludos**. Finalmente, las formaciones que no contienen ni permiten el flujo de agua se denominan **acuífugas**.

Por su naturaleza, una roca puede ser impermeable, pero, por su alto nivel de fracturamiento, puede dar lugar a un acuífero de porosidad secundaria.

- **Nivel piezométrico.** Es la altura hasta la cual sube el agua en un pozo, equilibrando la presión del agua en el acuífero con la presión atmosférica. Se toma con respecto a un nivel de referencia dado (figura 12).
- **Tipos de acuíferos.** Es posible diferenciar tres tipos de acuíferos: **libres**, es decir, con superficie libre abierta a la atmósfera, los cuales se alimentan principalmente de agua lluvia; **acuíferos confinados**, en los cuales el agua, sometida a presión, circula por una capa permeable confinada entre dos capas impermeables, por lo que su explotación sólo se puede hacer mediante pozos profundos; y **acuíferos semiconfinados** o de goteo, que ocurren cuando las capas confinantes de un acuífero confinado permiten cierto paso de agua, ya sea hacia arriba o hacia abajo, en función de la altura piezométrica (figura 12). En pozos perforados en acuíferos libres, el nivel freático es el mismo piezométrico. En pozos perforados en acuíferos confinados, el nivel de agua sube por encima del nivel de agua en el acuífero, hasta alcanzar el nivel piezométrico o de equilibrio. En ocasiones, el agua del pozo sube por encima de la superficie del terreno, dando lugar a pozos surgentes.

Figura 12. Acuíferos libres, confinados y semiconfinados (Bear, 1982; en IDEAM, 2013)



- **Manantiales.** Son puntos de descarga natural de un acuífero. Pueden ser de diferentes tipos, según el tipo de acuífero, la litología, la presencia de zonas de fracturamiento y otros factores.
- **Permeabilidad.** La permeabilidad o conductividad hidráulica se define como la capacidad que tiene un medio poroso para transmitir agua bajo un gradiente de presión dado. Depende de la granulometría, la porosidad, la forma y el tamaño de los granos y la colocación y orientación de los granos. Se puede estimar por medio de la siguiente ecuación (Custodio y Llamas, 1996):

$$K = \frac{Q/A}{(h_A - h_B)/L} \quad (7)$$

Donde:

Q: Caudal de agua

K: Conductividad hidráulica

A: Sección que atraviesa el flujo

$(h_A - h_B)$: Diferencia de niveles de agua entre la entrada y salida del flujo

L: Longitud recorrida por el fluido

El signo negativo indica que el flujo se desarrolla en la dirección en que decrece la altura de agua.

El gradiente hidráulico (i) se estima de la siguiente manera:

$$i = \frac{h_A - h_B}{L} \quad (8)$$

La tabla 8 muestra valores típicos de permeabilidad para algunos acuíferos.

Tabla 8. Valores de permeabilidad (ITGE, 1987. Adaptado de Villanueva e Iglesias, 1984. En IDEAM, 2013)

K (m/día)	Calificación estimada	Posibilidades del acuífero
$K < 10^{-2}$	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
$10^{-2} < K < 1$	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
$1 < K < 10$	Media	Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica
$10 < K < 100$	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
$100 < K$	Muy alta	Pozos con más de 100 l/s con 10 m de depresión teórica

- **Transmisividad.** Es el caudal de agua que proporciona una sección de ancho unidad de frente acuífero sometido a un gradiente de 100%, o, en otras palabras, es el producto de la permeabilidad del acuífero por su espesor saturado (ITGE, 1987). Por tanto, por ser el producto de una velocidad por una longitud, la transmisividad se expresa en m²/día o cm²/s. La tabla 9 muestra los valores de transmisividad para diferentes tipos de materiales.

Tabla 9. Valores de transmisividad (T) para diferentes tipos de materiales (m²/d) (ITGE, 1987; adaptado de Custodio y Llamas, 1983; en IDEAM, 2013)

T	1	10	10 ²	10 ³	
Calificación	Impermeables	Poco permeables	Algo permeables	Permeables	Muy permeables
Calificación del acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Tipos de materiales			Arena fina	Arena limpia	
	Arcilla compacta	Limo arenoso	Arena limosa	Grava y arena	Grava limpia
	Pizarra	Limo	Caliza poco fracturada	Arena fina	Dolomitas, calizas muy fracturadas
	Granito	Arcilla limosa		Caliza fracturada	
			Basaltos		

- **Coefficiente de almacenamiento.** Es la cantidad de agua cedida por un prisma de acuífero de un metro cuadrado de sección y la altura del acuífero, cuando el nivel piezométrico baja un metro (ITGE, 1987). Este coeficiente (S) condiciona el agua producida por un acuífero, es adimensional y se expresa por la siguiente ecuación (Custodio y Llamas, 1996). La tabla 10 muestra algunos valores típicos del coeficiente de almacenamiento

$$S = \text{Volumen de agua} / \text{Area unitaria} \cdot \text{Cambio unitario de altura de agua} \quad (9)$$

Tabla 10. Valores típicos del coeficiente de almacenamiento (Villanueva e Iglesias, 1984; ITGE, 1987; en IDEAM, 2013)

Tipo de material permeable	Forma de funcionamiento del acuífero	Valores de S (medio)
Kárstico		
Calizas y dolomitas jurásicas	Libre	$2 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$5 \cdot 10^{-5}$
Calizas y dolomitas cretáceas y terciarias	Libre	$2 \cdot 10^{-2}$ a $6 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3} a $5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	10^{-4} a $5 \cdot 10^{-5}$
Poroso intergranular		
Gravas y arenas	Libre	$5 \cdot 10^{-2}$ a $15 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
Kársticos y porosos		
Calcarenitias marinas terciarias	Libre	$15 \cdot 10^{-2}$ a $18 \cdot 10^{-2}$

- **Almacenamiento específico.** Es el volumen de agua que un acuífero absorbe o expulsa de su almacenamiento por unidad de área, por unidad de espesor de acuífero y por unidad de campo en la altura piezométrica, así (Custodio y Llamas, 1996):

$$Ss = \text{Volumen de agua} / \text{Area unitaria} * \text{Espesor unitario} * \text{Cambio unitario de altura} \quad (10)$$

Luego:

$$S = b * Ss \quad (11)$$

Donde b: espesor saturado del acuífero.

En los acuíferos libres, el coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad eficaz y varía entre 0,05 y 0,30 (Custodio y Llamas, 1996). En acuíferos confinados, el volumen de agua contenido en un elemento de volumen geométrico fijo varía con la presión del mismo, es decir, se deforma, variando así su porosidad, debido a la compresión o expansión del agua. El coeficiente de almacenamiento varía entre 10^{-3} y 10^{-5} y se calcula así (Custodio y Llamas, 1996):

$$S = \gamma b (\phi \beta + \sigma) \quad (12)$$

Donde:

γ : Peso específico del agua

b: Espesor del acuífero

ϕ : Porosidad del acuífero

β : Coeficiente de compresibilidad dinámica del agua

σ : Coeficiente de compresibilidad dinámica vertical del suelo

Para que el agua se mueva en un acuífero se requiere que haya una diferencia de altura entre dos puntos, la cual se puede medir mediante piezómetros nivelados topográficamente (un piezómetro es un pozo abierto a la atmósfera y conectado con el acuífero a medir). Con los datos de altura del agua en los piezómetros se pueden construir mapas piezométricos, que indican la dirección del flujo y su pendiente.

Según la Ley de Darcy, existe una proporción directa entre la velocidad del agua en un acuífero en régimen laminar (v) y su gradiente hidráulico (i), en un medio saturado, continuo, homogéneo (con propiedades constantes en cualquier lugar del mismo) e isótropo (sus propiedades, en especial la permeabilidad, no depende de la orientación del medio), así (Custodio y Llamas, 1996):

$$i = -v/K \quad (13)$$

De donde:

$$v = -K * i = -K * (dh/ds) \quad (14)$$

Donde K: conductividad hidráulica o permeabilidad.

Bajo el nivel freático, en la zona no saturada, predomina el movimiento horizontal, hacia áreas de descarga. No obstante, localmente pueden desarrollarse significativos movimientos verticales de agua, descendentes en zonas de recarga y ascendentes en zonas de descarga. Además, el régimen de flujo está ligado al tiempo de residencia del agua en el acuífero, el cual depende las condiciones geológicas y climáticas. Así, el paso del agua a través del sistema subterráneo del ciclo hidrológico puede llegar a tardar decenios, siglos y milenios, sobre todo si se tienen en cuenta que las tasas de flujo normalmente no exceden de 10 m/d y pueden ser tan bajas como 1 m/año (figura 13). Por estas mismas razones, los sistemas hidrogeológicos determinan espacialmente flujos de alcance local, intermedio y regional, de profundidad y características hidráulicas e hidrogeoquímicas diferentes, debido a influencias físicas, químicas y antrópicas variables en el espacio (ver figura 14).

- **Reserva de agua subterránea.** La reserva de agua subterránea es la cantidad de agua almacenada en el acuífero que puede drenar por acción de la gravedad, esto, es, la parte del volumen de saturación que no queda adherida a las partículas por fenómenos de tensión superficial, capilaridad u otros. Se expresa en unidades de volumen y equivalen al producto de la superficie del acuífero por su espesor saturado de agua y por su coeficiente de almacenamiento (ITGE, 1987). Las fluctuaciones de nivel freático en acuíferos libres representan por tanto la

variación de las reservas. Para un año hidrológico, se pueden distinguir los siguientes tipos de reserva (Pérez, 1995; en IDEAM, 2013):

- **Reserva mínima:** Corresponde al caudal mínimo de escorrentía subterránea, representado por la superficie freática mínima o de estiaje.
- **Reserva máxima:** Corresponde al caudal máximo de escorrentía subterránea, representado por la superficie freática máxima.
- **Variación anual de la reserva:** Corresponde a la diferencia entre la reserva máxima y la mínima para un año hidrológico dado.
- **Reserva permanente:** Corresponde a la reserva mínima media.
- **Reserva total:** Corresponde a la reserva máxima media.
- **Reserva reguladora:** Es la variación de la reserva entre la reserva total y la permanente.

Figura 13. Regímenes típicos de agua subterránea y tiempos de residencia bajo condiciones húmedas (Winter et al, 1998; en IDEAM, 2013)

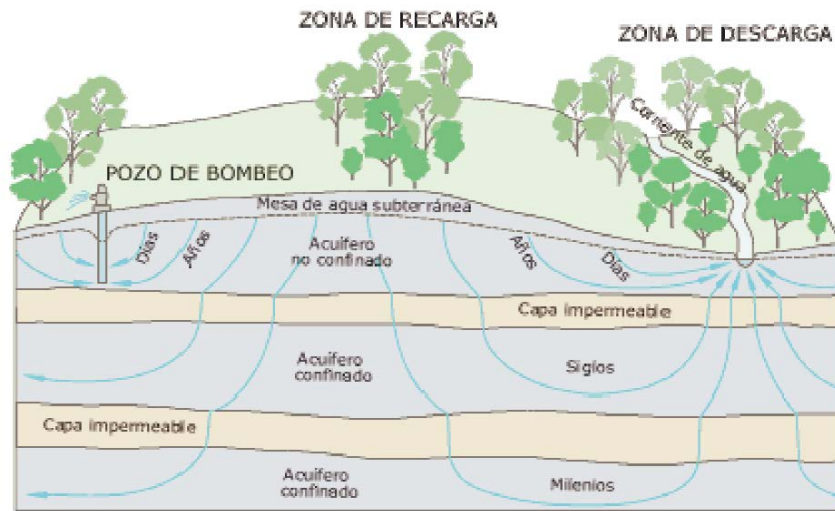
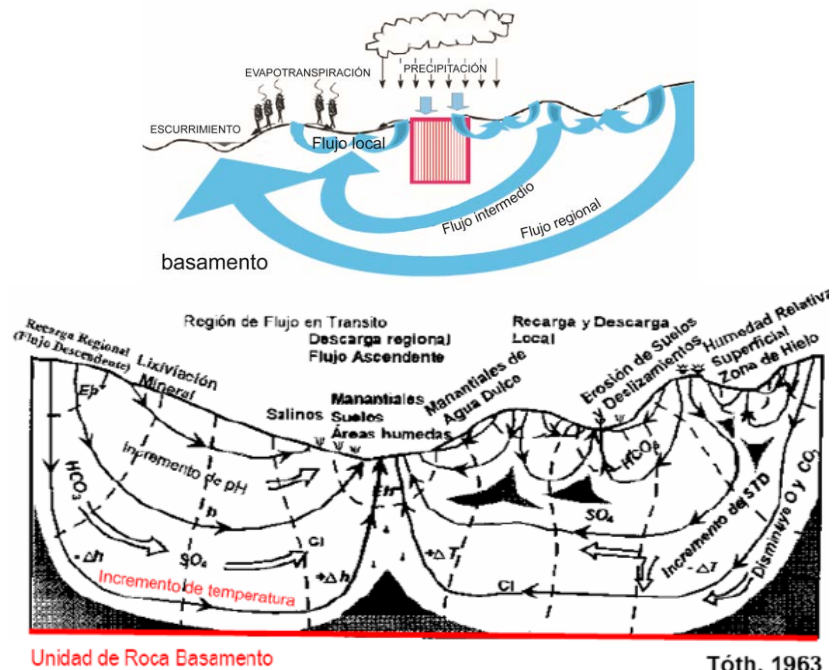


Figura 14. Sistemas de flujo de agua subterránea



Para la ERA, los dos conceptos de necesario conocimiento son: la reserva permanente de los sistemas acuíferos y la variación anual de la reserva, que constituye **la oferta renovable de aguas subterráneas**, o, en otros términos, **la recarga media anual** del sistema acuífero.

La recarga, aportación o entrada al acuífero es variable en el tiempo y el espacio. Por su dificultad para medirla, se suelen utilizar valores medios a los largo de una serie de años. Las fuentes de recarga pueden ser naturales, como la lluvia, o artificiales, como la infiltración a partir de sistemas de riego, canales de drenaje, etc. También pueden ser directas o difusas (como la lluvia); indirectas o concentradas, como las provenientes de cauces permanentes, estacionales o efímeros; flujos laterales, provenientes de otros acuíferos; retorno de riegos, excesos de riego, pérdidas en los canales o tuberías de distribución y descarga urbana (Lemer, 1990; Vélez, 2004; en IDEAM, 2013). Por las anteriores razones, para la evaluación de la recarga y la dinámica del escurrimiento subterráneo, es de fundamental importancia el estudio de las conexiones entre aguas superficiales y subterráneas, las cuales dependen de la geología y las conexiones hidráulicas, que varían en función de la topografía superficial y la morfología y posición de los acuíferos.

Hay diferentes métodos para la estimación de la recarga, entre los cuales son de mencionar: medidas directas, balance de agua, técnicas de Darcy, técnicas de trazadores y medidas empíricas. Cada entidad podrá escoger el método que mejor se adapte a sus disponibilidades de información. El método del *balance hídrico*, al alcance de la mayor parte de autoridades ambientales, se basa en el principio de conservación de la masa en una cierta región de volumen conocido (volumen de control), definida por unas condiciones de frontera, durante un período de tiempo. Implica que la diferencia entre las entradas y salidas de agua debe ser igual al cambio de almacenamiento de agua en el sistema- El balance se puede hacer en forma independiente en la zona superficial, en la zona no saturada y saturada:

$$R = P - Es - Et - \Delta S \quad (15)$$

Donde:

R: Recarga (mm)

P: Precipitación (mm)

Es: Escorrentía (mm)

Et: Evapotranspiración (mm)

ΔS : Cambio en el almacenamiento (mm)

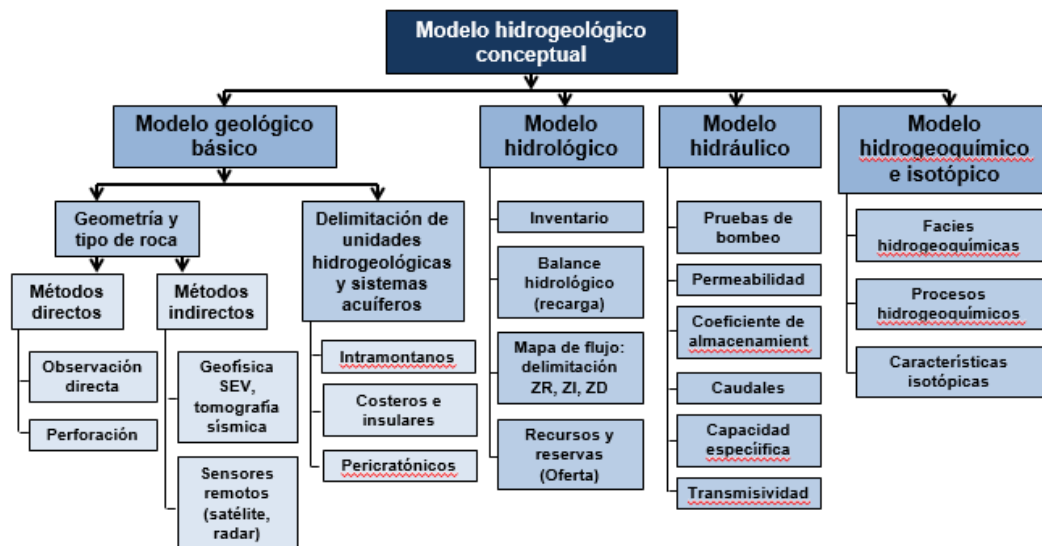
Esta fórmula asume que la única entrada al sistema es la precipitación y que no hay trasvases superficiales ni subterráneos ni extracciones. En caso de que existan estos componentes, es necesario estimarlos e integrarlos (ver fórmula 3 de balance hídrico de aguas superficiales). El conocimiento de las áreas de recarga y descarga de un acuífero es, por tanto, la base para la administración del recurso, y para la determinación de zonas vulnerables y zonas de manejo especial.

- **Modelo hidrogeológico conceptual (MHC).** El modelo hidrogeológico es el instrumento básico para planificar el aprovechamiento de las aguas subterráneas. Para ello es necesario tener un conocimiento mínimo sobre las características físicas y químicas del acuífero y sobre su dinámica. Se debe tener en cuenta que los acuíferos son en general **sistemas heterogéneos**, complejos, segmentados, y frecuentemente multicasas, que pueden estar interconectados o no. Los factores físicos y químicos de un acuífero están determinados por (ver figura 15):
 - **Las características geológicas**, de las cuales depende el tipo, textura y estructura de la roca, las cuales a su vez determinan parámetros como la porosidad, la permeabilidad, la capacidad de almacenamiento y la capacidad específica. Se determinan mediante métodos directos como: evaluaciones geológico-geofísicas, que incluyen: levantamiento de columnas estratigráficas, correlaciones, secciones geológico-geofísicas, registros de perforaciones; y métodos indirectos, como interpretación de imágenes de sensores remotos, sondeos eléctricos verticales SEV, registros sísmicos, tomografías, magnetometría y registro geofísico de pozos.
 - **Las características hidrológicas**, en especial la lluvia, de la cuales depende la cantidad y localización de las zonas de recarga. La evaluación hidrológica incluye la determinación de la distribución espacio-temporal de la recarga, la dinámica del flujo, balance hídrico y relaciones hidráulicas con el sistema de agua

superficial. El modelo hidrológico se construye a partir de información hidroclimática, uso de trazadores e inventarios de puntos de agua (pozos). Estos inventarios incluyen usos y usuarios, cuantificación de los aprovechamientos, tendencias de la demanda, estado sanitario de las captaciones, parámetros de diseño y características hidráulicas de los pozos, parámetros de calidad y demás variables que contempla el FUNIAS y que deben ser incorporadas al Sistema de Información del Recurso Hídrico Subterráneo Regional. El modelo debe retroalimentarse con los resultados del monitoreo de aguas subterráneas regional.

- **Las características hidrogeoquímicas**, que dependen de la composición físico-química del subsuelo y del uso del suelo y del agua. La evaluación hidrogeoquímica e isotópica es parte estructural del MHC y debe permitir conocer las facies hidrogeoquímicas, separar y reconocer sistemas de flujos, interacciones entre acuíferos, relaciones con el agua superficial, edad y origen de las aguas subterráneas y afectaciones antrópicas. Se basa en monitoreos hidrogeoquímicos e isotópicos y se complementa con el inventario de pozos.
- **Las características hidráulicas e hidrodinámicas**, que dependen de las características hidráulicas del suelo y subsuelo. La evaluación contempla el reconocimiento de los tipos de acuíferos (libre, confinado, semiconfinado), sus características hidráulicas (permeabilidad, porosidad, capacidad específica, caudales de explotación, rendimiento o productividad), superposición y extensión de conos de abatimiento, etc.

Figura 15. Componentes del modelo hidrogeológico conceptual (IDEAM, 2013)



El MHC es dinámico, pues depende de factores en continuo cambio, como el clima, la extracción y recarga y los efectos de los usos del suelo (ver ejemplo en figura 16). A este respecto es conveniente recordar que, en general, las unidades hidrogeológicas e hidrológicas superficiales no tienen los mismos límites, lo que obliga a adoptar estrategias de gestión particulares para el agua subterránea (figura 17).

El modelo hidrogeológico conceptual MHC no es el objetivo final del estudio del comportamiento de un acuífero. De hecho, es tan sólo un insumo para modelos numéricos ulteriores que permitan validar el MHC y comprender en mayor detalle las aguas subterráneas. No obstante, ambos tipos de modelos deben basarse en datos numéricos que permitan su alimentación y validación, levantados a través de programas de monitoreo de frecuencia y alcance espacial adecuados. No se debe olvidar al respecto que un modelo científico es una herramienta que reproduce el funcionamiento de un sistema natural, y cuyo objetivo es el estudio y análisis del mismo bajo diferentes condiciones. Por lo mismo, un modelo debe permitir una visión de conjunto de los procesos naturales del sistema y analizar la incidencia de los diferentes factores presentes, en forma tal que permita predecir su comportamiento y respuesta ante situaciones de estrés (Muñoz, 2002; Waterloo Hydrogeologic, 2000). Para la modelización de sistemas hidrogeológicos existen diferentes tipos de modelos disponibles, entre ellos (Muñoz, 2002; Waterloo Hydrogeologic, 2000):

- Modelos físicos: Reproducción a escala de un fenómeno natural. Su limitante es que el comportamiento de los materiales y su escala no reflejan necesariamente el comportamiento natural real.

- Modelos analógicos: Utilizan una ley física parecida a la que rige el sistema, para caracterizar y/o interpretar un fenómeno particular (por ejemplo, uso de la ecuación de la membrana elástica para simular la deformación de un cono de bombeo de agua). No son muy utilizados en la actualidad.
- Modelos digitales o numéricos: Resuelven la ecuación diferencial de continuidad mediante matrices en cada una de las celdas en que se ha discretizado el sistema a simular. Son los más utilizados en hidrología y calidad de acuíferos, en problemas tales como:
 - * Modelos de flujo.
 - * Modelos de transporte de masa
 - * Modelos de transporte de calor

Figura 16. Modelo hidrogeológico conceptual para la Sabana de Bogotá: corte esquemático Oeste – Este por una cuenca de la Sabana de Bogotá (Fuente: Van der Hammen, CAR, 1998 (Dib. M.C. Barón))

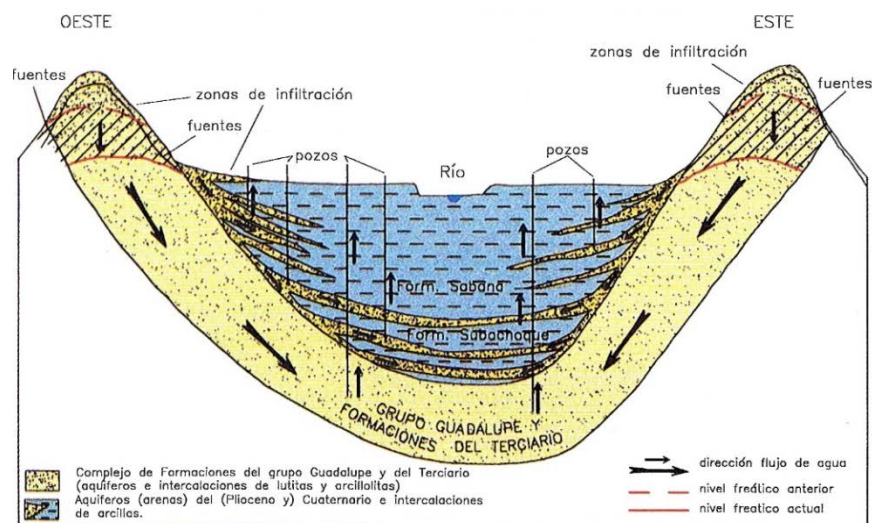


Figura 17. Divergencia de límites hidrográficos, hidrogeológicos y político-administrativos (Fuente: Adaptado de Carrillo y otros, 2007; en IDEAM, 2013)



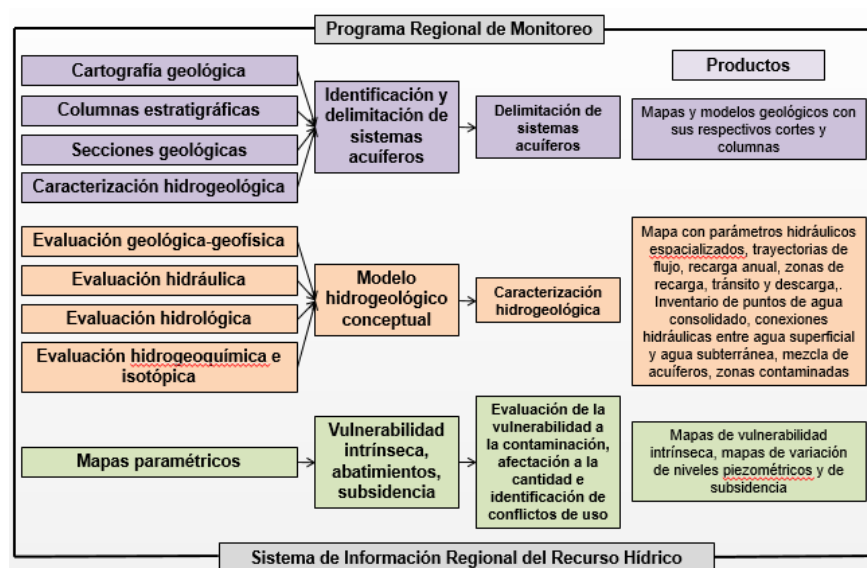
1.3.2. Metodología

A nivel nacional, las unidades de análisis son las provincias hidrogeológicas, caracterizadas porque, en cada una de ellas, sus acuíferos han sido formados por procesos geológicos similares, tienen particularidades geomorfológicas comunes y se hallan separadas entre sí por rasgos tectónicos regionales, que generalmente coinciden con límites (o barreras) impermeables. Ellas constituyen unidades mayores (identificables a escalas entre 1:10.000.000 y 1:500.000), definidas con base en unidades tectónicas y estratigráficas.

Para evaluar las provincias hidrogeológicas se puede trabajar con datos escasos y heterogéneos, de varias fuentes, ya que no se requiere de un nivel alto de información. Se representan en mapas hidrogeológicos generales y son útiles para reconocimiento nacional o internacional, pues representan grandes áreas con parámetros estáticos, sin dependencia del tiempo. Las provincias hidrogeológicas pueden estar integradas por una o varias cuencas hidrogeológicas.

A nivel regional o de las ERA, las unidades de análisis deben ser de mayor resolución, toda vez que constituyen el campo de la toma de decisiones. Estas unidades han sido denominadas por el IDEAM *sistemas acuíferos*, definidos por un dominio espacial, limitado en superficie y profundidad, en el que existen uno o varios acuíferos, relacionados o no entre sí, pero que constituyen una unidad práctica para la investigación o explotación (ITGE, 1987). Los sistemas acuíferos son, por tanto, sistemas dinámicos en el tiempo y el espacio, que pueden subdividirse en unidades menores, como cuencas hidrogeológicas o simplemente acuíferos. La caracterización de estos sistemas acuíferos corresponde a lo que se ha denominado previamente modelo hidrogeológico conceptual MHC. La figura 18 muestra el procedimiento general para la evaluación de sistemas acuíferos dentro de las ERA.

Figura 18. Procedimiento para la evaluación de sistemas acuíferos (IDEAM, 2013)



- La delimitación de sistemas acuíferos debe hacerse, fundamentalmente, con base en información geológica, como se describió arriba.
- Una vez delimitados los sistemas acuíferos, se debe priorizarlos en función de criterios socioeconómicos y de los objetivos establecidos en los POMCAs, entre otros.
- Los sistemas acuíferos priorizados deben ser objeto de PMAA (planes de manejo ambiental de acuíferos), para lo cual es necesario elaborar el modelo hidrogeológico conceptual MHC.
- En sistemas acuíferos y cuencas hidrogeológicas de las grandes ciudades, se debe evaluar el efecto de la impermeabilización sobre la recarga, la contaminación a partir de alcantarillado sanitario y vertimientos industriales.
- La evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación, afectación a la cantidad e identificación de conflictos por uso, debe permitir, a partir de las condiciones de variabilidad climática, presiones por uso y vertimientos, definir escenarios prospectivos para la protección y manejo de sistemas acuíferos. Para ello se debe contar con el MHC, que se cruce con el inventario de fuentes potenciales de contaminación, y permita evaluar la vulnerabilidad y riesgo de los sistemas a la contaminación, la vulnerabilidad a las variaciones climáticas, la delimitación de regiones con agotamiento o deterioro de la calidad del agua y la identificación de conflictos de uso. Los productos obtenidos en esta fase se mencionan en la sección 1.3.4.

Todo lo anterior debe estar soportado por el *programa de monitoreo de aguas subterráneas*, el cual debe diseñarse de acuerdo con las particularidades de cada sistema acuífero y de sus condiciones de uso. A este respecto, es importante recalcar en las siguientes características de las aguas subterráneas, que deben guiar el diseño de la red de monitoreo:

- Las velocidades de flujo de las aguas subterráneas son muy inferiores a las de las aguas superficiales. Así, mientras en las primeras las velocidades son del orden de m/d, en las segundas son del orden de m/s. Esto tiene efectos en la atenuación de la contaminación pero, una vez afectado o contaminado un acuífero, la dificultad de descontaminarlo es mayor.
- Según sus características, las unidades hidrogeológicas pueden almacenar y transmitir agua en cantidades significativas, pero ellas no necesariamente están conectadas regionalmente, y sus características hidráulicas cambian horizontal y verticalmente debido a la heterogeneidad, anisotropía y discontinuidad de las unidades de roca – sedimento que conforman los acuíferos. De esta forma, los acuíferos se presentan como sistemas heterogéneos, complejos, segmentados y frecuentemente multicasas, interconectados o no.

Entre los instrumentos a utilizar, son de mencionan: el protocolo de monitoreo y seguimiento del agua del IDEAM, componente de aguas subterráneas; el FUNIAS, la guía metodológica para los planes de manejo ambiental de acuíferos PMAA, el Programa Nacional de Aguas Subterráneas del IDEAM, la Guía para la modelación de aguas subterráneas del IDEAM, concesiones y permisos de vertimientos y tasas por uso del agua.

De otro lado, hay abundante literatura técnica sobre aguas subterráneas, monitoreo de aguas subterráneas, elaboración de MHC y mapas hidrogeológicos y otros temas mencionados en este resumen, en las páginas y publicaciones especializadas del IDEAM, INGEOMINAS, OMM, UNESCO, Banco Mundial (GW-GATE), International Association of Hydrogeologist (IAH). De acuerdo con lo expuesto, la tabla 11 muestra la información necesaria para la evaluación de la oferta de aguas subterráneas

Tabla 11. Información necesaria para la estimación de la oferta de aguas subterráneas

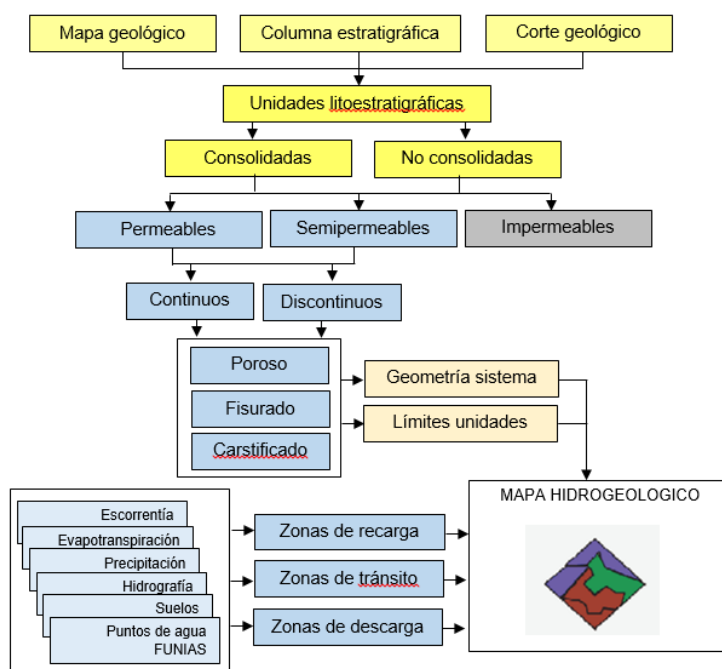
Tipo de información	Información necesaria
Cartográfica general y temática e información para MHC	Planchas topográficas del IGAC a escala 1:25.000, 1:10.000 o mayor, con curvas de nivel acordes a la escala.
	DEM 30
	Imágenes de sensores remotos (fotos aéreas, imágenes de satélite)
	Mapa geológico a escala adecuada, secciones y columnas estratigráficas
	Registros de perforaciones
	Sondeos eléctricos verticales SEV
	Registros sísmicos
	Tomografías
	Magnetometría
	Pruebas de bombeo de perforaciones y pozos de producción
	Registro geofísico de pozos
	Resultados (registros) de monitoreos hidrogeoquímicos e isotópicos
	Mapa de suelos
	Mapa de cobertura vegetal
Uso y manejo (para MHC)	Registro de usuarios (FUNIAS)
	Registros hidráulicos de pozos
	Inventario de concesiones y aprovechamientos de agua
	Rendimientos (productividad) de pozos
	Inventario de permisos de vertimiento
Climatológicas e hidrológicas (para balance hídrico)	Lluvia media anual (mm)
	Lluvia media anual multianual (mm)
	Temperatura media anual (mm)
	Temperatura media anual multianual (mm)
	Evapotranspiración real media anual (mm)
	Evapotranspiración real media anual multianual (mm)
	Evapotranspiración potencial media anual * (mm)
	Evapotranspiración potencial media anual multianual * (mm)
	Escorrentía media anual (mm)
Hidrológicas e hidráulicas	Escorrentía media anual multianual (mm)
	Área del sistema acuífero
	Espesor del sistema acuífero
	Niveles piezométricos (msnm)
	Mapas de flujo piezométrico
	Permeabilidad K (m/d)
	Transmisividad (m ² /d)
	Porosidad total (%)
	Porosidad efectiva (%)
	Coeficiente de almacenamiento (S)

Tipo de información	Información necesaria
	Almacenamiento específico (Ss)
	Velocidad de flujo
	Reserva mínima anual Rmin (m³)
	Reserva máxima anual Rmax (m³)
	Variación de la reserva anual (m³)
	Reserva permanente (m³)
	Reserva total (m³)
	Variación de la reserva = Reserva reguladora (m³) (recarga anual media)
*No se incluyen los parámetros necesarios para el cálculo de la ETP	

1.3.3. Técnicas de espacialización

De acuerdo con “Hidrogeological Maps: a Guideline and Standard Legend”, 1995, de la IAH, la conversión de un mapa geológico en un mapa hidrológico e hidrogeológico puede enfocarse como se indica en el flujograma de la figura 19. Para el cruce de los diferentes mapas temáticos involucrados en el mapa hidrogeológico, se sigue un proceso similar al señalado para los mapas de escorrentía superficial.

Figura 19: Pasos para la elaboración de un mapa hidrogeológico (IDEAM, 2013)



1.3.4. Productos

En el desarrollo del MHC se deben obtener los siguientes productos:

- Mapa de parámetros hidráulicos especializados
- Mapa de trayectorias de flujo
- Recarga anual y mapa de zonas de recarga
- Mapa de zonas de tránsito y descarga
- Inventario de puntos de agua consolidado
- Conexiones hidráulicas entre agua superficial y agua subterránea

Los análisis de vulnerabilidad deben obtener los siguientes productos:

- Mapas de riesgo y vulnerabilidad

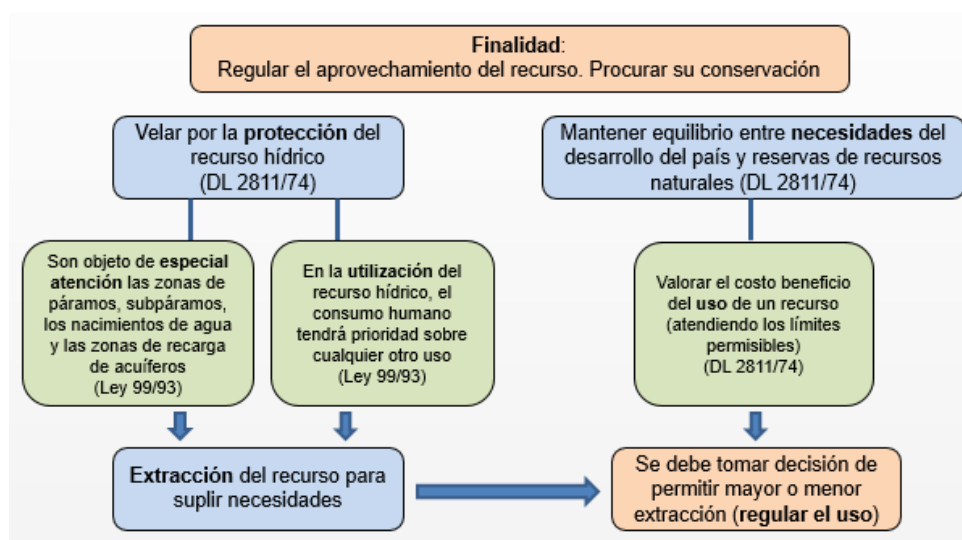
- Zonificación de intensidad de uso
- Mapa de fuentes de contaminación
- Mapas del MHC (geológicos, geofísicos, hidrogeológicos, isovalores hidrogeoquímicos e hidráulicos, isopiezas y distribución de la recarga,
- Potencialidades y restricciones de aguas subterráneas, conflictos de uso, medidas de protección y manejo para problemas específicos (perímetros de protección de pozos, medidas de abandono de pozos, regulación de regímenes de bombeo, protección de zonas de recarga, medidas para control de vertimientos y rellenos sanitarios, monitoreo de fuentes de contaminación con redes específicas, recarga artificial, uso conjunto de agua superficial y subterránea, control de concesiones y permisos, etc.).
- Recomendaciones para el diseño de la red de monitoreo de aguas subterráneas.

2. EVALUACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA

2.1. CONCEPTOS BÁSICOS

El uso del agua está reglamentado por la Ley (Decreto Ley 2811 de 1974, Ley 99 de 1993 y sus decretos reglamentarios) (ver figura 20). Existen usos por ministerio de la ley, que no requieren permiso de autoridad alguna, y usos para atender las necesidades sociales y económicas de la comunidad, sujetos a permisos y/o concesiones. A nivel regional, las autoridades ambientales regionales (CARs y AAU) son las encargadas por la ley de otorgar permisos y concesiones de agua. Para ello, cada autoridad requiere conocer, de una parte, la disponibilidad (oferta) del recurso y, de otra parte, la justificación del uso, incluida la valoración de su costo/beneficio frente a otros usos potenciales.

Figura 20. Marco legal de la demanda de agua (IDEAM, 2013)



Para la evaluación regional del agua ERA, es necesario conocer la demanda actual y proyectada de uso del agua, para poder planificar en forma adecuada su aprovechamiento, en forma tal que los usos o concesiones no superen las disponibilidades, para evitar el agotamiento del recurso. Para el estudio de la demanda, es importante partir de los siguientes conceptos:

- **Demanda de agua:** Es la extracción de agua del sistema natural, destinada a suplir las necesidades de consumo humano, la producción sectorial y las demandas de los ecosistemas no antrópicos. Incluye el agua extraída no consumida y el agua extraída consumida (figura 21).
- **Agua extraída:** Es la extracción de agua del sistema natural, destinada a suplir las necesidades y los requerimientos de consumo humano, producción sectorial y demandas esenciales de los ecosistemas existentes, sean intervenidos o no. Puede ser superficial o subterránea, por lo que es necesario diferenciar la fuente.

- **Consumo efectivo:** Es la cantidad real de agua utilizada en el consumo humano y en los procesos de producción económica, servicios y comercio, durante un período de tiempo dado. Incluye el consumo bruto más el almacenamiento menos las descargas (figura 22).

Figura 21. El concepto de la demanda de agua (IDEAM; 2013)

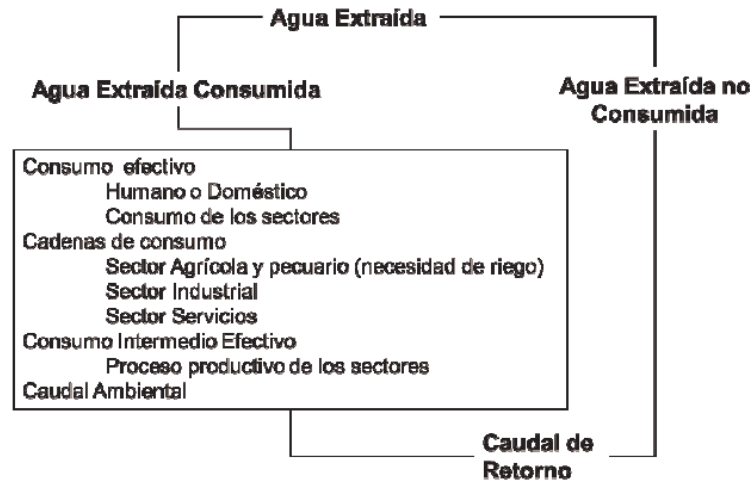
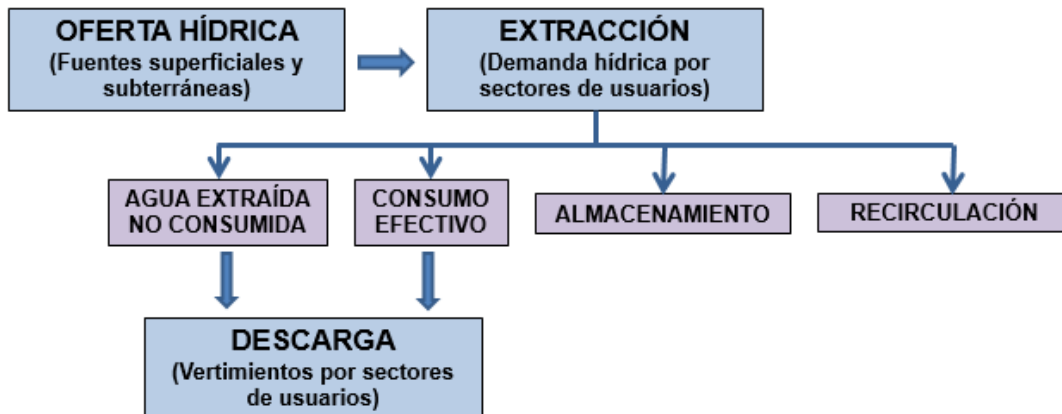


Figura 22. Dinámica regional del uso del agua (IDEAM, 2013)



- **Consumo intermedio efectivo:** Es la cantidad de agua usada realmente como insumo y materia prima en los procesos. Se estima cuando no se conoce el consumo total de la actividad económica.
- **Cadena de consumo de agua:** Es el conjunto de las etapas de los procesos productivos. Por ejemplo, en la actividad pecuaria, es la cantidad de agua usada en las etapas de cría, levante, engorde y sacrificio (formal e informal) de ganado, más el consumo de manejo de la población en los diferentes lugares de alojamiento y beneficio (porquerizas, establos, galpones, plantas de sacrificio y hatos ganaderos). En el sector agrícola incluye la siembra, el crecimiento (representadas en necesidades de riego), cosecha y poscosecha. En el sector industrial, se refiere al procesamiento, lavado y enfriamiento en la obtención de productos manufacturados, etc. El consumo humano no se considera una cadena productiva.
- **Caudal ambiental:** Caudal necesario para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y no acuáticos (ver sección de oferta hídrica).
- **Caudal de retorno:** Es el volumen de agua devuelto a la red de drenaje de una cuenca como remanente de los volúmenes aprovechados en el consumo humano y en los procesos productivos de las actividades económicas. Las descargas o vertimientos forman parte del caudal de retorno.
- **Agua extraída no consumida:** Es el volumen de agua extraído del sistema natural, pero que no es utilizado efectivamente en ningún tipo de uso, retornando al sistema con variaciones en su calidad (caso de las pérdidas técnicas en los sistemas de acueducto).

- **Sectores de usuarios:** Si bien se pueden considerar otros sectores en forma independiente, de acuerdo con el Decreto 3930 de 2010, los sectores son:

- Consumo humano y doméstico.
- Preservación de flora y fauna.
- Agrícola.
- Pecuario.
- Recreativo.
- Industrial.
- Estético.
- Pesca, maricultura y acuicultura.
- Navegación y transporte acuático.

La evaluación de la demanda dentro de las ERA debe contemplar todos los sectores de usuarios, todas las actividades de cada sector y todas las áreas donde ocurran los usos. Es conveniente detallar la estimación de usos en los sectores o áreas donde haya conflictos de uso, o en los casos de sectores específicos relevantes en una región.

2.2. METODOLOGÍA

En primer lugar es necesario identificar los sectores de usuarios objeto de cálculo, luego analizar la información existente, en seguida se debe escoger el método de cálculo, tanto para la demanda actual como proyectada; de acuerdo con el método seleccionado, se debe recopilar la información necesaria y, si es necesario, diseñar instrumentos y campañas de captura de información; finalmente, una vez se disponga de la información requerida, se debe proceder a calcular la demanda. La demanda se debe calcular para todas las actividades en m³/año, aunque también se puede hacer en m³/s, o l/s, según el tamaño del área de estudio. La fórmula general es:

$$Dh = Ch + Css + Cpff + Csa + Csp + Cr + Csi + Ce + Cm + Csac + Cnt + Aenc \quad (16)$$

Donde:

Dh: Demanda hídrica

Ch: Consumo humano o doméstico

Css: Consumo del sector servicios

Cpff: Preservación de fauna y flora

Csa: Consumo del sector agrícola

Csp: Consumo del sector pecuario

Cr: Consumo recreativo

Csi: Consumo industrial

Ce: Consumo del sector energía

Cm: Consumo de minería

Csac: Consumo del sector pesca, maricultura y acuicultura

Cnt: Consumo para navegación y transporte

Aenc: Agua extraída no consumida

La tabla 12 muestra un resumen de la metodología de cálculo por sector.

Tabla 12. Método de cálculo de la demanda de agua por sector e información necesaria (IDEAM. 2013; otros)

Sector	Fórmulas	Información necesaria y observaciones
Consumo humano Ch	$Ch = Cpc \cdot P + IANC$	Consumo per cápita (Cpc): l/hab.día Población (P) Índice de agua no contabilizada IANC (por pérdidas técnicas); se da por lo general en % de Ch, por lo cual se debe estimar en l/s, multiplicando el resultado $Cpc \cdot P$ por este porcentaje. El cálculo se debe hacer en forma separada para la población urbana y rural. Si no se dispone del consumo per cápita, se debe calcular por muestreo. Las proyecciones deben tener en cuenta el incremento de la población cada año y el posible

Sector	Fórmulas	Información necesaria y observaciones
		decremento del consumo per cápita. Si se desea, el consumo en l/s se puede llevar a m³/s o m³/año.
Consumo del sector servicios y comercio	$C_{ss} = C_c + O_f + O_t$ $C_c = C_{pu} * U_{cc} + IANC$ $O_f = O_{fpu} * U_{of} + IANC$ $O_t = O_{tpu} * U_{ot} + IANC$	Cc: Consumo en hoteles, restaurantes y establecimientos de comercio. Of: Consumo en oficinas Ot: Otros Normalmente, las empresas de acueducto no tienen datos desagregados para los diversos subsectores del sector servicios. Por esta razón se acostumbra estimar el consumo como un % del consumo humano Ch, y aplicar el mismo % de pérdidas técnicas asumido para Ch.
Consumo para preservación de fauna y flora	$C_{pff} = Q_{75\%} \text{ o } Q_{85\%}$	Equivale al caudal ambiental (ver oferta hídrica). Se estima como el percentil de excedencia del 75% o del 85% sobre la curva de duración de caudales medios diarios.
Consumo del sector agrícola	$C_{sa} = D_a \text{ l/s.ha} * A$ $E_{tc} = K_c * E_{Tp}$	ETc es la evapotranspiración del cultivo (en mm) ETp es la evapotranspiración de referencia potencial (en mm) Kc es el coeficiente del cultivo $K_{c_i} = K_{c_{prev}} + \left[\frac{i - \sum(L_{prev})}{L_{etapa}} \right] \times (K_{c_{prox}} - K_{c_{prev}})$ Kci: Coeficiente del cultivo para el día i i: Número del día dentro de la etapa de crecimiento (1-duración de la etapa de crecimiento) L: Duración de la etapa considerada (días) $\sum(L_{prev})$: Suma de las duraciones de las etapas previas (días) $D_a = 10 \sum_{i=1}^n \left[\frac{(K_c \times E_{Tp}) - \left(\frac{P \times K_e}{100} \right)}{K_r} \right] \times A$ Da: Requerimiento de agua del cultivo (m³/ha) (llevarlo a l/s.ha) 10: factor que aplica para convertir a m³/ha Lp: Duración del período de crecimiento (para $\sum$ del día 1 al día Lp). Kc: Coeficiente de cultivo (adimensional) P: Precipitación (mm) Ke: Coeficiente de escorrentía (adimensional) Kr: Coeficiente de eficiencia de riego (adimensional) A: Área sembrada (ha) Dado que muchas veces no hay datos suficientes para calcular el requerimiento de agua de cada uno de los cultivos de una región, se acostumbra utilizar un módulo de riego medio en l/s.ha. Este módulo, multiplicado por el área, da la demanda total para riego agrícola. Otra forma alternativa es mediante encuestas entre productores para determinar el volumen de agua de riego utilizado en el año, y luego dividir este volumen por el área (ha) y por el número de segundos del año. Esto permite estimar en forma rápida el módulo de riego.
Consumo del sector pecuario	$C_{sp} = D_p \text{ l/s.ha} * A$ $C_{sp} = C_v + C_s + C_{ua}$	Cv: Consumo vital en cada fase del proceso productivo por especie (m³/cabeza.edad * Número de cabezas) Cs: Consumo en sacrificio (m³/año) Cua: Consumo en lugares de manejo y alojamiento El Cua de pastos de pastoreo o pastos de corte se puede considerar como un cultivo, por lo cual para su cálculo se puede utilizar la misma metodología de Csa, estimando un módulo de riego de pastos. En caso de que haya estabulación, se debe agregar el consumo en el establo. Una forma alternativa de estimar Cv es mediante encuestas a productores sobre el agua consumida en un ciclo y en un año, y calcular el módulo de consumo en m³/cabeza.año, valor a multiplicar por el número de cabezas (aves, puercos, etc, explotados en el año o en el ciclo para el cual se realiza el cálculo). El consumo en sacrificio debe estimarse sólo si éste se realiza en la finca. Si se realiza en mataderos urbanos, éstos deben considerarse como actividades industriales urbanas.
Consumo recreativo	$C_r = Dev * A$	En caso de cauces, embalse o lagunas utilizados exclusivamente para recreación activa, se debe calcular el área A (ha) y la evaporación a partir de superficies libres de agua, con base en registros de evaporación de tanque de estaciones cercanas. Con esta base se puede estimar el módulo consumo (Dev, en l/s.ha) de mantenimiento de estos cauces o cuerpo de agua, equivalente a su tasa de evaporación y estimar el consumo anual de agua en l/s. Si se trata de cauces con caudal ambiental o cuerpos de agua para fines energéticos, de riego o de acueducto, donde el uso recreativo es un plus, no habría necesidad de estimar el consumo de los mismos para fines recreativos, salvo que, para garantizar este uso, sea necesario establecer normas de regulación de niveles que impliquen un sacrificio de los usos principales.
Consumo	$C_{si} = G_i + P_i + C + K$	Gi: Consumo de diferentes sectores presentes en el área de estudio, sean grandes o pequeños

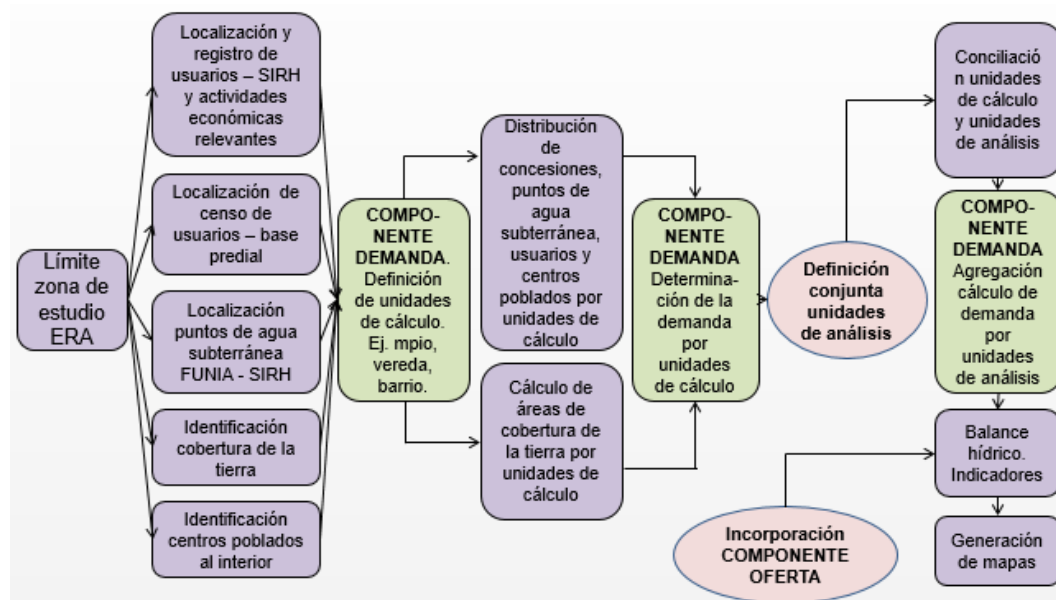
Sector	Fórmulas	Información necesaria y observaciones
industrial		(m³/año). C: Consumo en construcción K: Ajuste por cobertura Si la empresa de acueducto tiene registros de consumo de agua de la industria, se toma este dato. Si no tienen, se puede utilizar un % de Ch y adicionarlo con las pérdidas técnicas que le correspondan según el volumen utilizado. Lo mismo se aplica para la construcción. En los casos de industria rural, con concesiones de agua, el dato se debe tomar de la respectiva concesión, con verificación de campo. Este caso podría aplicarse en algunas grandes industrias urbanas con concesión de agua. En el caso de la construcción, un método alternativo es estimar el módulo de consumo de agua por metro cúbico de concreto, estimar la cantidad de concreto (incluido mortero) por metro cuadrado de construcción; y a partir de las estadísticas de metros cuadrados construidos en el año, estimar el consumo de agua en la industria. En todo caso, se debe tener cuidado en no duplicar el consumo, en los casos en que el concreto se fabrique en plantas industriales de concreto y su consumo de agua esté considerado en el uso industrial.
Consumo del sector energía	$C_e = V_{he} + V_{hf} + V_{ct}$	Se consideran tres casos: a) Centrales térmicas (Vct). En este caso el agua es empleada principalmente para fines de enfriamiento y el cálculo se realiza de forma similar a cualquier otra industria. b) Embalses de generación (Vhe). Estos se utilizan para regular el caudal y poderlo utilizar en generación en horas pico o cuando la demanda del sistema interconectado lo justifique. Una vez utilizado, el caudal es descargado en la fuente, aguas abajo, por lo cual, para fines del balance hídrico de una unidad de análisis en particular, se puede considerar como un trasvase. En caso de que la descarga se realice dentro de la misma unidad de análisis, se debe considerar como un caudal de retorno. No obstante, se deben considerar las pérdidas por evaporación en el embalse como parte del mismo. c) Centrales al filo del agua (Vhf). En este caso no hay embalse de regulación sino una bocatoma que lleva el agua hasta la central y luego la descarga en la misma fuente o en otras vecinas. Como en el caso de las plantas con embalse, si la descarga se realiza en otra unidad de análisis o cuenca, se debe considerar como un trasvase. Si se realiza dentro de la misma unidad de análisis, se considera como un retorno. En el caso de embalses de propósito múltiple, se debe tener cuidado de no contabilizar la misma demanda para cada uso. En tal caso, el caudal de descarga del embalse se debe repartir entre los diferentes usuarios.
Consumo de minería	$C_m = C_{pp} + C_{aux} + A_{Mex} + K$ $C_{pp} = C_{exr} + C_{exp} + C_b + C_t$	C_{pp}: Consumo en el proceso productivo (m³/año) C_{aux}: Consumo en actividades auxiliares (lavado de maquinaria, humectación de vías, etc) (m³/año) A_{Mex}: Agua de mina extraída (hace parte del agua extraída no consumida) (m³/año) K: Ajuste por cobertura C_{exr}: Consumo en la fase de exploración (m³/año) C_{exp}: Consumo en la fase de explotación (m³/año) C_b: Consumo en la fase de beneficio (m³/año) C_t: Transformación (m³/año) El cálculo del consumo se puede hacer mediante la utilización de estándares (módulos) de agua consumida por unidad de producto o por actividad. En cada fase, al agua consumida se debe adicionar el agua almacenada, el agua extraída de mina y la reinyección, según sea el caso. El consumo de agua en la actividad minera depende del producto explotado, la tecnología utilizada, el volumen de producción, el número de trabajadores y otros aspectos, por lo cual no conviene generalizar.
Consumo de pesca, maricultura y acuicultura	$C_{spma} = (P_1 \cdot CSC) + (P_2 \cdot CNC)$	En el caso de la acuicultura: P1: Producción de peces en sistemas confinados (ton/año) CSC: Coeficiente de rendimiento a densidades finales, en sistemas confinados en tierra (m³/kg). P2: Producción de peces en sistemas no confinados (ton/año) CNC: Coeficiente de rendimiento a densidades finales en sistemas no confinados (m³/kg). El coeficiente de rendimiento varía con la especie de pez, el tamaño de los estanques (diámetro) y el número de animales por estanque, toda vez que el cálculo se hace con base en el consumo de oxígeno. El agua extraída no consumida corresponde a pérdidas por infiltración y evaporación. Para pesca y maricultura no existe metodología adoptada para los ERA. No obstante, la demanda para pesca en ríos puede formar parte del caudal ambiental, mientras que en embalses y lagos constituye, al igual que para la recreación, un plus, a no ser que, para el mantenimiento de la pesca sea necesario establecer normas específicas de operación que reduzcan el agua disponible para otros usos.
Consumo para navegación y	$C_{nt} = f(\text{caudales, variabilidad, condiciones})$	La demanda de agua de agua para navegación implica la regulación del flujo y el mantenimiento de unas condiciones de sección (ancho y profundidad) que permita el desplazamiento de la nave de

Sector	Fórmulas	Información necesaria y observaciones
transporte acuático	físicas del cauce)	diseño por el canal. Dado que no todos los ríos son navegables, es importante, en primer lugar, determinar si en la unidad de análisis existen ríos navegables o con potencial navegable. En caso de que así sea, se debe establecer la capacidad del cauce para diferentes tipos de embarcaciones, en función de sus caudales y variabilidad (régimen) de los mismos, forma del cauce, y determinar la nave de diseño para el canal navegable. Sólo así será posible determinar la demanda mínima de agua para soportar la actividad de navegación y transporte.
NOTAS GENERALES: 1) La estimación de la demanda se debe empezar por los sectores, las áreas y los usuarios más representativos, hasta alcanzar en el mediano plazo, el 100% de la jurisdicción, el 100% de usuarios y el 100% del consumo de agua. 2) Se deben desarrollar procedimientos de captura de datos (encuestas, entrevistas, etc), para apoyar el cálculo o actualización de módulos de consumo adecuados a cada región y uso. 3) Se debe documentar, en lo posible, el proceso de evaluación de la demanda. 4) La unidad de medida es el consumo por usuario en la unidad de tiempo. El usuario es la persona, establecimiento, especie de unidad pecuaria, cultivo de unidad agrícola, etc. 5) La unidad de cálculo es una unidad menor que la unidad de análisis, sobre la cual se estiman las demandas que, posteriormente, se deben agregar a nivel de las unidades de análisis. 6) La unidad espacial de análisis es la cuenca, sector de cuenca o sistema acuífero. 7) Son básicas las siguientes fuentes de información: - Registros del censo de usuarios del agua - Reportes de usuarios continuos (en especial grandes usuarios) - Reportes del Formulario Único de Inventarios de Aguas Subterráneas FUNIAS - Mapas de usos del suelo - Reportes de consumo de agua por usuario - Población y tasas de crecimiento - Tendencias de crecimiento de la economía regional - Otros.		

2.3. TÉCNICAS DE ESPACIALIZACIÓN

La figura 23 muestra el procedimiento para la espacialización de la demanda. Se observa que, para el inicio del proceso, son muy importantes: el registro de usuarios del recurso hídrico debidamente georreferenciados, el mapa catastral y el mapa de coberturas de la tierra a una escala adecuada.

Figura 23. Procedimiento para la espacialización de la demanda (IDEAM; 2013)



2.4. PRODUCTOS

Los productos de la evaluación de la demanda son:

- Mapa de unidades de cálculo
- Mapa de usuarios y concesiones por actividad económica
- Procesos de reglamentación en la jurisdicción
- Localización de las actividades económicas principales
- Mapa de demanda hídrica agrícola total
- Mapa de demanda agrícola por cultivo relevante
- Mapa de demanda hídrica doméstica total
- Mapa de demanda hídrica pecuaria total
- Mapa de demanda hídrica industrial
- Mapa de demanda hídrica del sector eléctrico
- Mapa de demanda hídrica minera
- Mapa de demanda hídrica para otros sectores relevantes de la unidad de análisis
- Mapa de demanda hídrica total

La tabla 13 muestra las convenciones recomendadas por el IDEAM (2013) para los mapas de demanda.

Tabla 13. Convenciones para los mapas de demanda (valores en millones de m³) (IDEAM, 2013)

COLOR	DEMANDA HIDRICA TOTAL	DEMANDA HIDRICA POR SECTORES
	Menor de 20	Menor de 2
	20 a 50	2 a 5
	50 a 100	5 a 20
	100 a 200	20 a 50
	200 a 350	50 a 100
	350 a 500	100 a 200
	500 a 750	200 a 400
	750 a 1000	400 a 600
	Mayor a 1000	Mayor a 600

3. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO

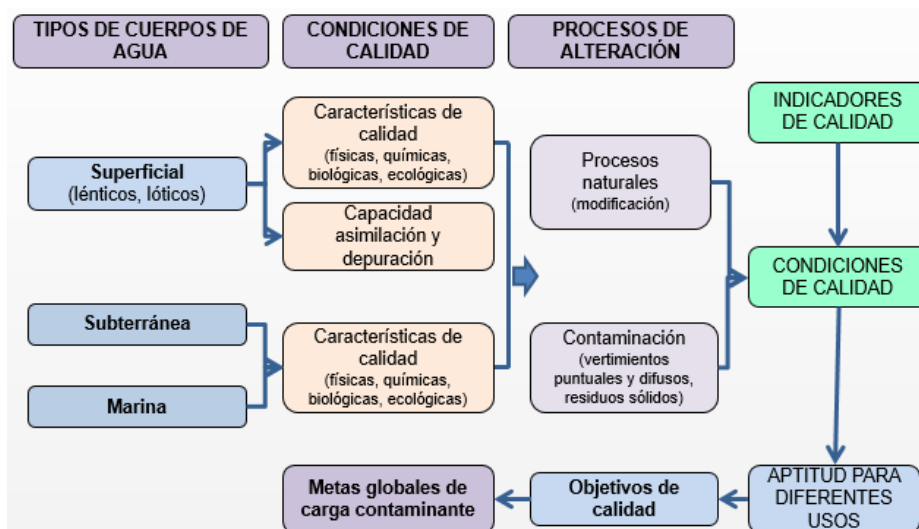
3.1. CONCEPTOS BÁSICOS

El objetivo de la evaluación de la calidad del agua en las ERA es lograr, mediante un proceso continuo y sistemático, conocimiento e información sobre la calidad del agua, su estado, dinámica, alteraciones y tendencias, que permitan mejorar la gestión integral del recurso hídrico. Para los fines de las ERA, conviene tener en cuenta los siguientes conceptos:

- **Calidad del agua:** Desde el punto de vista funcional, es la capacidad intrínseca que tiene el agua para responder a los usos que se podrían obtener de ella. Desde el punto de vista ambiental, es el conjunto de condiciones que deben darse en el agua para que ésta mantenga un ecosistema equilibrado y para que cumpla unos objetivos determinados de calidad (calidad ecológica) (OECD, 2001). Esto significa que la protección del agua se justifica como bien ambiental que es, y no como recurso explotable (Directiva 2000/60/CE), lo que implica que su caracterización no debe hacerse en función del uso, como se ha hecho tradicionalmente.
- **Marco conceptual.** La figura 24 muestra el marco conceptual para la evaluación de la calidad del agua.
- **Condiciones de calidad:** Están dadas por las características físicas, químicas, biológicas y ecológicas, y por la capacidad de asimilación de las corrientes (sistemas lóticos) y cuerpos de agua (sistemas lénticos) para los diferentes tipos de contaminantes. Esta capacidad está en relación estrecha con las condiciones climatológicas e hidrológicas y sus variaciones espacio-temporales.
- **Capacidad de asimilación y dilución:** Capacidad de un cuerpo de agua para aceptar y degradar sustancias, elementos o formas de energía, a través de procesos naturales, físicos, químicos o biológicos, sin que se afecten los criterios de calidad e impidan los usos asignados (Decreto 3930/2010).
- **Características ecológicas asociadas a la calidad ambiental o ecológica de las aguas:** Son aquellas que permiten definir un ecosistema sano, caracterizado por un alto nivel de biodiversidad, productividad y habitabilidad,

representado por unos indicadores concretos, propios de cada ecosistema (Directiva 2000/60/CE). La tabla 14 muestra una relación de los parámetros de calidad del agua mayormente utilizados.

Figura 24. Marco conceptual para la evaluación de la calidad del agua en las ERA (IDEAM; 2013)



- **Procesos de alteración de la calidad del agua:** La calidad de las aguas puede verse afectada por agentes naturales y de origen antrópico. La figura 25 muestra el mapa general de contaminantes del agua. No obstante, algunos contaminantes, dispersados ampliamente en el ambiente por la actividad humana, están ahora emergiendo en las aguas superficiales y subterráneas. Éstos, por lo general, aún no están regulados, aunque lo podrán ser en el futuro en función de sus efectos, tales como sustancias surfactantes, productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal, aditivos de gasolinas e industriales, retardantes del fuego, antisépticos, esteroides, hormonas y subproductos de la desinfección del agua, entre otros. Muchos de éstos no son persistentes (se transforman rápidamente), pero la cantidad que continuamente es vertida los hace presentes continuamente. Otros son persistentes, tóxicos y bioacumulativos (PTB), como ciertos plaguicidas y pesticidas. En general, las fuentes principales de contaminación acuática son: las aguas residuales domésticas e industriales, el escurrimiento de agua en zonas de producción agrícola y pecuaria, el arrastre por aguas lluvias de compuestos presentes en la atmósfera y las aguas procedentes de procesos de extracción minera.
- **Carga contaminante:** Es el producto de la concentración másica promedio de una sustancia por el caudal volumétrico promedio del líquido que la contiene, determinado en el mismo sitio. En un vertimiento, se expresa en kg/día (Decreto 3930/2010).
- **Presión ambiental:** Es la capacidad de generar un impacto ambiental, o, en otros términos, la contribución potencial de cada agente social o actividad humana a las alteraciones del ambiente, por consumo de recursos naturales, generación de residuos y transformación del medio físico.
- **Afectación potencial:** Es la capacidad de generar un grado de alteración debido a una presión ambiental; por ejemplo, el impacto potencial de un vertimiento, que puede depender de factores tales como el caudal de la fuente receptora, su grad actual de contaminación, etc.
- **Los procesos de alteración:** Los procesos de alteración pueden ser naturales, como la disolución o arrastre de los componentes de las rocas y formaciones superficiales terrestres, o de los gases y partículas contenidos en la atmósfera; o antropogénicos, causados por la acción humana a través de vertimientos.
- **Contaminación:** En general, se puede definir como la introducción directa o indirecta en el agua, el aire o el suelo, de sustancias o formas de energía, que puedan ser peligrosas para la salud humana, la calidad de los ecosistemas acuáticos o terrestres ligados a éstos, o que causen daños a los bienes materiales o deterioren el disfrute y uso del ambiente.
- **Vertimiento:** Es la descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido (Decreto 3930/2010). Puede ser puntual, cuando es posible precisar el punto exacto de la descarga, o difuso, cuando no es posible precisarlo, como los agroquímicos aplicados a los cultivos o el arrastre por la escorrentía.

Figura 25. Mapa de agentes de la contaminación del agua (IDEAM; 2013)



Tabla 14. Parámetros mínimos de calidad del agua para un programa de monitoreo

Parámetro	Unidad	Índices ERA			Aguas subte- rráneas	Agua potable	IRCA
		ICA	IACAL	IMA			
Parámetros para índices de calidad básicos							
Coliformes fecales	NMP/100ml	X			X	X	X
Conductividad eléctrica	µS/cm	X				X	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/l	X	X		X		
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	X			X		
Fósforo total	mg/l		X				
Macroinvertebrados acuáticos (bentos) (F)	Ind/m²			X			
Nitrógeno total NKT	mg/l		X				
% de saturación de oxígeno disuelto	%	X			X		
Oxígeno disuelto	mg/l						
pH	Unidad	X				X	X
Sólidos suspendidos totales	mg/l	X	X				
Otros muestreados o propuestos							
Alcalinidad total	mg/l				X	*	X
Antimonio	mg/l					X	
Arsénico	mg/l					X	
Bario	mg/l						
Calcio	mg/l				X		X
Carbonatos	mg/l				X		
Carbono orgánico total COT	mg/l					X	X
Cianuro libre y disociable	mg/l						
Cloro residual libre	mg/l					X	X
Cloruros	mg/l				X	*	X
Color aparente	UPC					X	X
Dureza total	mg/l				X	*	X
Fluoruros	mg/l					X	X
Fosfatos totales	mg/l	X			X	*	X
Fósforo soluble	mg/l						
Hidrocarburos aromáticos policíclicos HAP	mg/l					X	
Magnesio	mg/l				X	*	X
Molibdeno	mg/l					*	X
Nitratos	mg/l	X			X	X	X

Parámetro	Unidad	Índices ERA			Aguas subterráneas	Agua potable	IRCA
		ICA	IACAL	IMA			
Nitritos	mg/l					X	X
Nitrógeno amoniacal	mg/l						
Nitrógeno soluble	mg/l						
Olor y sabor	Ac-No ac					X	
Potasio	mg/l				X		
Potencial de oxidación-reducción					X		
Selenio	mg/l					X	
Sodio	mg/l				X		
Sólidos totales	mg/l	X			X		
Sólidos disueltos	mg/l	X			X		
Sulfatos	mg/l				X	*	X
Temperatura	°C	X			X		
Trihalometanos totales	mg/l					X	
Turbiedad	NTU	X			X	X	X
Metales pesados (agua y sedimentos)							
Aluminio	µg/l					*	X
Cadmio*	µg/l						
Cobre	µg/l					X	
Cromo total	µg/l					X	
Hierro total	µg/l					*	X
Manganeso	µg/l					*	X
Mercurio (sedimentos)	µg/l					X	
Níquel	µg/l					X	
Plomo	µg/l					X	
Zinc	µg/l					*	Z
Plaguicidas organoclorados							
Clorotalonil	ng/l					X	
Clorpirifos	ng/l					X	
Endosulfán alfa	ng/l					X	
Endosulfán beta	ng/l					X	
Propanil	ng/l					X	
Plaguicidas organofosforados							
Dimetoato	ng/l					X	
Malation	ng/l					X	
Metil paraoxon	ng/l					X	
Metil paration	ng/l					X	
Monocrotofos	ng/l					X	
Triazinas							
Ametrina	ng/l						
Atrazina	ng/l						
Dezetil atrazina	ng/l						
Hidrobiológicos							
Coliformes totales	NMP/100ml					X	X
Cryptosporidium	Ind/100cc					X	
Giardia	Ind/100cc					X	
Macroinvertebrados acuáticos (bentos)	Ind/m²						
Mesófilos	UFC/100cc					X	
Perifiton	Ind/l						
Macrófitas	Ind/m²						
Las frecuencias de muestreo serán las indicadas por la Autoridad Ambiental y, en caso de agua potable, por la resolución 2115 de 2007.							

Fuente: IDEAM, 2013. EPAM-IDEAM, 2010. *Agua potable: Resolución 2115/2007.

- **Usos del agua:** De acuerdo con el Decreto 3930 de 2010, corresponde a las Autoridades Ambientales Regionales clasificar las aguas superficiales, subterráneas y marinas, en función de su calidad, y asignar su destinación a diferentes usos y sus posibilidades de aprovechamiento, teniendo en cuenta la priorización establecida en el artículo 41 del Decreto 1541 de 1978.
- **Objetivos de calidad:** Son el conjunto de variables, parámetros o elementos, con su valor numérico, que se utiliza para definir la idoneidad del recurso hídrico para un determinado uso (Decreto 2667 de 2012). Según este mismo decreto, la autoridad ambiental competente deberá establecer cada 5 años la meta global de carga contaminante para cada tramo de los cuerpos de agua. Estas metas globales deben conducir a los usuarios al logro de los objetivos de calidad establecidos para cada curso o cuerpo de agua.

- **Usuarios:** Las ERA deben dimensionar y contextualizar la localización de los usuarios generadores de vertimientos, analizar la presión que ejercen sobre la calidad del agua, la carga contaminante vertida y los impactos generados sobre los cursos y cuerpos de agua. Los usos a tener en cuenta son: humano y doméstico, industrial (incluida la generación de energía, construcción, minería e hidrocarburos), agrícola, pecuario y pesca, maricultura y acuicultura.
- **Calidad de las aguas subterráneas:** La calidad de las aguas subterráneas depende también de múltiples factores, ligados a la naturaleza de las rocas o formaciones terrestres donde se encuentran, al clima (condiciones de recarga), a la escorrentía superficial (en recarga y calidad) y a los vertimientos provenientes de las actividades humanas (directos y difusos), entre otros. De acuerdo con Freeze y Cherry (1979, en IDEAM, 2013), los elementos presentes en las aguas subterráneas se pueden clasificar así:

Constituyentes mayoritarios o fundamentales:

Aniones: $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^{2-}

Cationes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+

Otros: CO_2 , SiO_2 , O_2

Constituyentes minoritarios o secundarios:

Aniones: F^- , S^{2-} , Br^- , NO_4^{2-} , PO_4^{2-}

Cationes: Mn , Fe , Li , Sr , Zn .

Los parámetros de mayor interés para la evaluación de la calidad de las aguas subterráneas son: pH, potencial redox, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos disueltos, cationes mayores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), aniones mayores (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^{2-}) y algunos elementos traza (Si , Fe , Mn , B), así como algunos parámetros hidrobiológicos como coliformes fecales. Para validar los resultados de laboratorio, se utiliza el **balance iónico** (Custodio y Llamas, 2001), el cual se puede expresar así:

$$\text{Error (\%)} = \frac{(\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones})}{(\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones})} \times 100$$

Normalmente, se acostumbra aceptar un error entre 2 y 5%. No obstante, el valor del error está en relación con la conductividad de la siguiente manera (tabla 15):

Tabla 15. Error admisible del balance iónico en relación con la conductividad eléctrica

Conductividad eléctrica	50	200	500	2000	>2000
Error aceptable (%)	±30	±10	±8	±4	±4

Fuente: Custodio y Llamas, 2001

Entre las fuentes de contaminación de origen antrópico de las aguas subterráneas, se destacan las indicadas en la tabla 16.

Tabla 16. Contaminantes y fuentes de contaminación (Foster et al, 2006; en IDEAM, 2013)

Fuente de contaminación	Tipo de contaminante
Actividad agrícola	Nitratos, amonios, pesticidas, microorganismos fecales
Saneamiento in situ	Nitratos, microorganismos fecales, trazas de hidrocarburos sintéticos
Gasolineras y talleres automotrices	Benceno, otros hidrocarburos aromáticos, fenoles, algunos hidrocarburos halogenados
Depósito final de residuos sólidos	Amonio, salinidad, hidrocarburos halogenados, metales pesados
Industrias metalúrgicas	Tri y tetracloroetileno, otros hidrocarburos halogenados, metales pesados, fenoles, cianuros
Talleres de pinturas y esmaltes	Alcalobencenos, tetracloroetileno, otros hidrocarburos halogenados, metales, algunos hidrocarburos aromáticos
Industria maderera	Pentaclorofenol, algunos hidrocarburos aromáticos
Tintorería	Tri y tetracloroetileno
Manufactura de pesticidas	Algunos hidrocarburos halogenados, fenoles, arsénico, metales pesados
Depósito final de lodos residuales domésticos	Nitratos, varios hidrocarburos halogenados, plomo, zinc
Curtidurías	Cromo, salinidad, algunos hidrocarburos halogenados, fenoles

Fuente de contaminación	Tipo de contaminante
Exploración y extracción de petróleo/gas	Salinidad (cloruro de sodio), hidrocarburos aromáticos
Minas de carbón y de metales	Acidez, diversos metales pesados, hierro, sulfatos

3.2. METODOLOGÍA

La figura 26 muestra el procedimiento general para la evaluación de la calidad del agua superficial. La modelación no es un objetivo de las ERA, pero se puede utilizar si ya existe para la corriente o cuerpo de agua, o recurrir a ecuaciones sencillas de balance de masas a nivel de tramos específicos. Mientras tanto, es importante fortalecer el sistema de monitoreo, empezando con el diseño de una red mínima que satisfaga los requerimientos del control.

La figura 27 muestra el procedimiento para la evaluación de calidad de las aguas subterráneas. Los análisis deben permitir determinar si el tipo de agua (facies hidrogeoquímica) está determinado por la geología regional, o si es debido a procesos de contaminación de origen antrópico. En estos casos, las técnicas hidrogeoquímicas y/o isotópicas pueden resultar de utilidad (figura 28). Estas mismas técnicas permiten validar los resultados de los análisis de zonas de recarga, trayectorias de flujo, conexiones entre acuíferos y relación entre aguas superficiales y subterráneas. Para el análisis de la variabilidad temporal de las aguas subterráneas, se debe contemplar por lo menos dos campañas de muestreo y análisis físico-químicos al año. Además, es necesario considerar la evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas, con el fin diseñar medidas adecuadas de protección, para lo cual se debe tener en cuenta las amenazas potenciales de contaminación, la vulnerabilidad del acuífero y el riesgo resultante de la combinación de amenaza y vulnerabilidad.

En función del riesgo de contaminación, es necesario diseñar y aplicar medidas de protección de los acuíferos vulnerables, las cuales incluyen el control del uso del suelo, la descarga de efluentes y la disposición de residuos, mediante la búsqueda de compromiso entre los distintos intereses. Los dos instrumentos básicos para la evaluación de los recursos de agua subterránea y sus condiciones de calidad son:

- Una red de monitoreo de cobertura acorde a las condiciones de cada acuífero y a su nivel de explotación.
- Unos protocolos de monitoreo que contemplen procedimientos homologados para la captura de datos, su procesamiento y análisis, su validación y difusión.

Figura 26. Procedimiento para evaluar la calidad del agua (IDEAM; 2013)

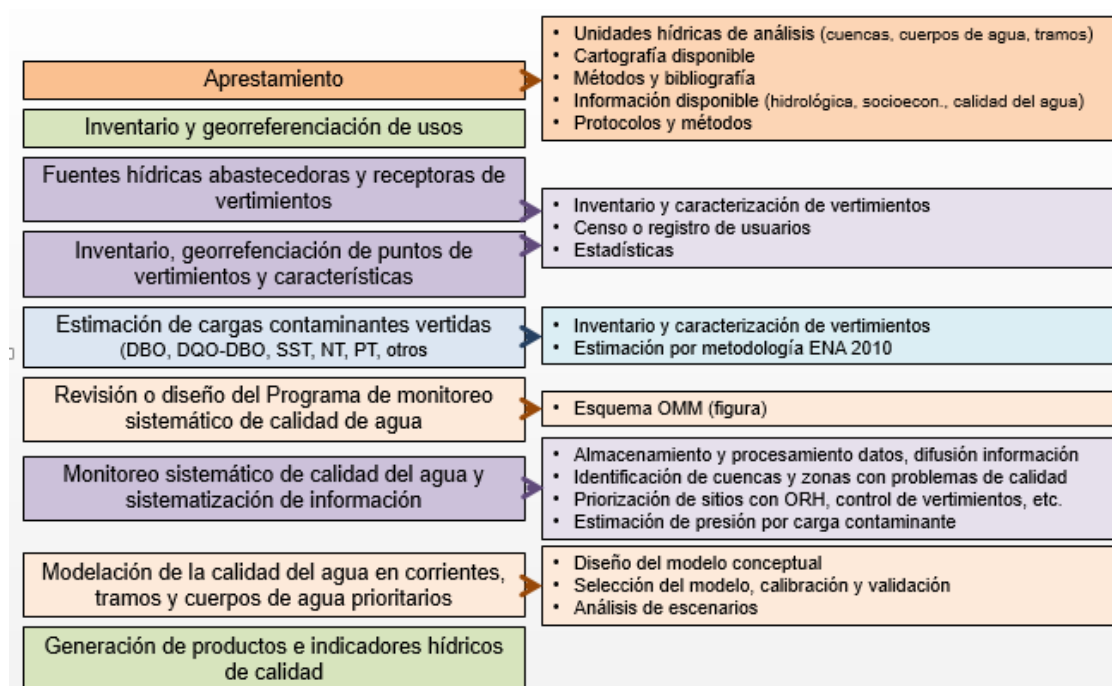


Figura 27. Procedimiento para evaluar la calidad del agua subterránea (IDEAM; 2013)

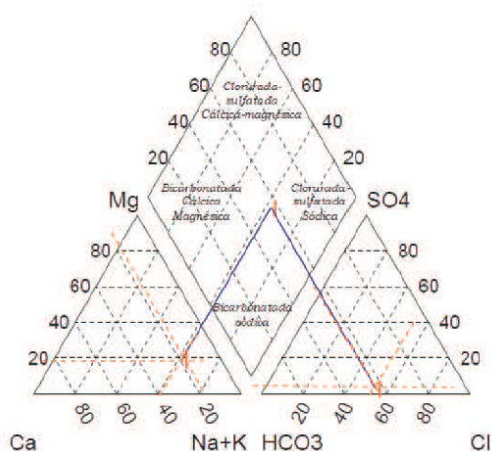
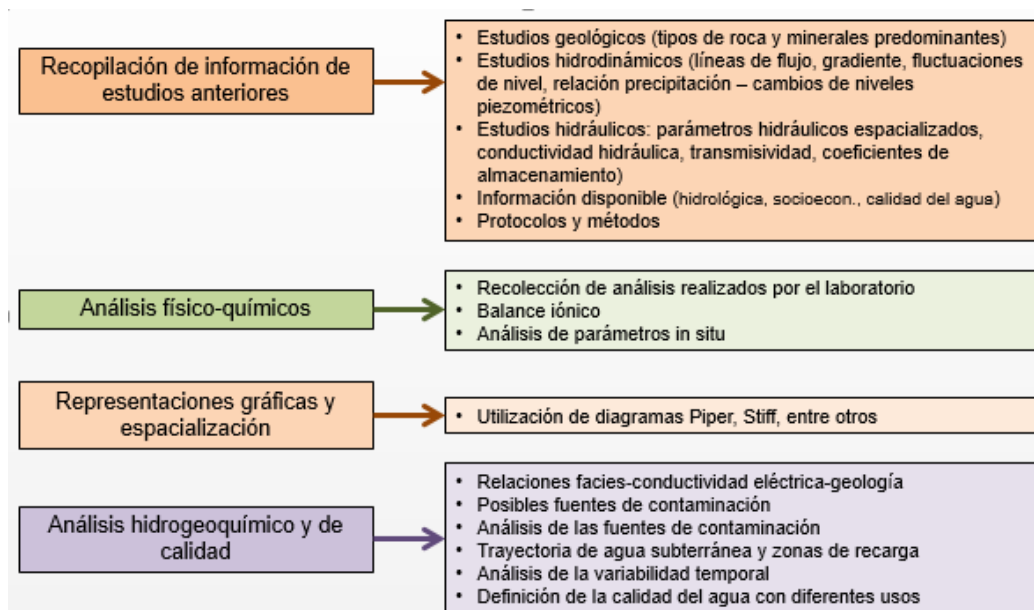


Figura 28. Diagrama de Piper

Con base en las características de las aguas de un acuífero, es posible clasificar su facies hidrogeoquímica en alguna de las categorías mostradas en la figura de la izquierda.

Fuente: Betancur, 2008, en IDEAM, 2013.

3.3. TÉCNICAS DE ESPACIALIZACIÓN

Entre las técnicas de espacialización de los datos de calidad del agua se pueden mencionar las siguientes:

- La *modelación* de la calidad de aguas superficiales, subterráneas o marinas. Esta es una técnica de análisis que permite reproducir en el espacio y en el tiempo una serie de eventos representativos de los componentes de la calidad del agua, mediante el manejo de expresiones matemáticas. La modelación contempla la evaluación de la carga contaminante, el transporte, la retención y el control de contaminantes. El transporte y la retención implican la simulación de los procesos de transformación o degradación que sufren los compuestos en el curso o cuerpo de agua y su interacción con otras sustancias presentes. Estos procesos, que constituyen la capacidad asimilativa de un cuerpo o curso de agua, dependen del caudal, la velocidad, el área transversal y el radio hidráulico en una corriente. Entre ellos, la dilución, debida al caudal o al volumen de agua del cuerpo receptor, reduce la concentración tanto de sustancias conservativas como no conservativas; el segundo es la transformación de sustancias no conservativas mediante reacciones químicas, interacción del material del cauce con la columna de agua y/o decaimiento por muerte, en caso de microorganismos. De acuerdo con el Decreto 3930 de 2010, las autoridades ambientales competentes deben aplicar y calibrar modelos de simulación de la calidad del agua, y/o

utilizar índices de calidad del agua, de acuerdo con la información disponible. La tabla 17 muestra algunas de las aplicaciones de la modelación.

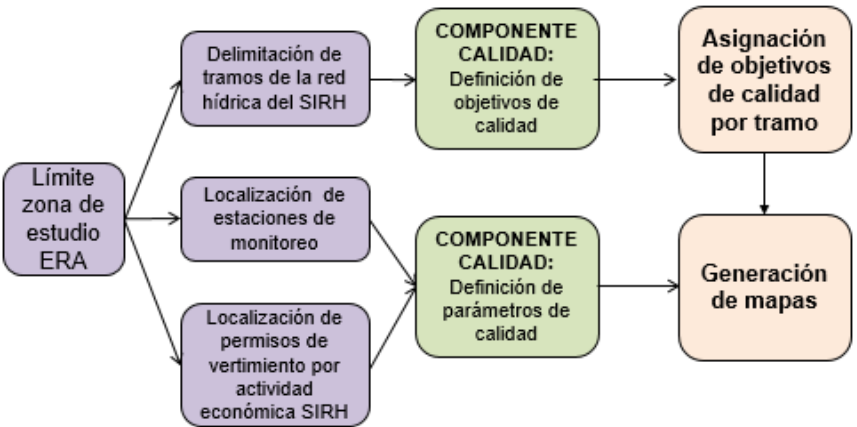
Existen muchos modelos disponibles en el mercado, los cuales, de todas formas, deben ser calibrados para las condiciones propias del curso o cuerpo de agua. También es posible elaborar modelos propios para condiciones o cuerpo de agua específicos. El Decreto 3930/2010 establece que los modelos deben permitir la utilización de los siguientes parámetros: DBO5, DQO, SST, pH, temperatura, OD, caudal, datos hidrobiológicos y coliformes totales y fecales. No obstante, la modelación, como herramienta predictiva aplicable a un medio continuo, no excluye el monitoreo, el cual es básico para conocer las condiciones reales de contaminación en puntos, tramos o áreas específicas.

- *Unidades de análisis:* Si bien la contaminación del agua se manifiesta en un tramo de una corriente o en un sector de un cuerpo de agua o de un acuífero, las fuentes de la contaminación pueden estar distribuidas en un área mayor, donde se encuentran los centros poblados o ciudades, las industrias, las minas, los cultivos, los ganados, etc. Por eso, en cada caso, se deben definir las unidades de análisis espaciales, que pueden corresponder a la cuenca hidrográfica en su conjunto, si bien para los fines del monitoreo de calidad y/o la definición de objetivos de calidad las unidades pueden ser lineales (tramos de corrientes) o areales (cuerpos de agua lénticos).
- *Proceso general de espacialización:* La figura 29 muestra el procedimiento general para la espacialización de la información de la calidad del agua en las ERA.

Tabla 17. Aplicaciones de la modelación de la calidad del agua (IDEAM; 2013)

Análisis de la situación actual con datos históricos	Predicción
Balance de masas contaminantes. Identificación de fuentes de contaminación. Evaluación de la capacidad asimilativa de los cuerpos de agua. Estudios estadísticos de exposición de la población a sustancias tóxicas. Interpretación de datos de monitoreo de calidad del agua. Verificación del cumplimiento de los objetivos de calidad a lo largo de una corriente. Identificación de la localización, extensión y magnitud de los incumplimientos. Identificación de los vertimientos que ocasionan mayores impactos.	Seguimiento a actividades de control de la contaminación. Análisis comparativo de escenarios de manejo y del efecto de diferentes tecnologías de tratamiento de agua residual. Definición de metas de reducción de cargas contaminantes de aquellos parámetros que no cumplan los criterios de calidad para los usos asignados. Definición de límites de vertimientos Evaluación del impacto de vertimientos específicos.

Figura 29. Procedimiento para la espacialización de la calidad del agua (IDEAM; 2013)



3.4. PRODUCTOS

De acuerdo con lo expuesto, los principales productos de la evaluación de calidad del agua son:

- Mapa de localización de la red de monitoreo de calidad del agua superficial y subterránea. Se deben considerar las estaciones de la red básica nacional (IDEAM) y de las redes regionales y locales (CARs, empresas de acueducto, otras).
- Mapa de localización de permisos vertimientos por actividad económica. Tablas de resumen de vertimientos.
- Mapa de índices de contaminación. Tablas y gráficas con estado de parámetros muestreados en las redes y evolución de los mismos.
- Mapa de objetivos de calidad (si existen) y parámetros de calidad, por tramo o cuerpo de agua.
- Mapas y gráficos de los modelos de calidad (en caso de que existan).

4. ANÁLISIS DEL RIESGO EN LA EVALUACIÓN REGIONAL DEL AGUA

4.1. CONCEPTOS BÁSICOS

El análisis de riesgos en la evaluación regional del agua tiene por objetivo evaluar la situación actual y las tendencias de: a) las amenazas y vulnerabilidad es del sistema hídrico natural, b) la vulnerabilidad del sistema hídrico al desabastecimiento y a la disponibilidad por calidad, y c) las amenazas a la población por efecto de la dinámica de las aguas superficiales. Para este efecto, es necesario tener en cuenta los siguientes conceptos (IDEAM, 2013):

- **Amenaza:** Es la probabilidad de que se presenten eventos de origen natural o antrópico, que puedan afectar de manera total o parcial, temporal o definitiva, los procesos naturales del agua y su aprovechamiento por el ser humano. La figura 30 muestra que las amenazas al sistema hídrico provienen tanto de condiciones naturales, como la variabilidad y el cambio climático, como de la pérdida de capacidad reguladora por la influencia humana.
- **Vulnerabilidad:** Se pueden distinguir tres tipos de vulnerabilidad:
 - Vulnerabilidad del sistema hídrico:** Es la susceptibilidad del sistema hídrico a la disminución de los caudales, la recarga de acuíferos, la capacidad de regulación hídrica y de depuración, determinada por sus características intrínsecas y el grado de exposición a eventos naturales o antrópicos.
 - Vulnerabilidad intrínseca:** Está determinada por la naturaleza o características propias de los sistemas hídricos, que condicionan el grado como pueden ser afectados por eventos externos. Por ejemplo, la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación derivada de eventos antrópicos o naturales, está determinada por el régimen hidrológico, al capacidad de autoepuración y el grado de humedad, en el caso de aguas superficiales; y por las características hidrológicas, hidráulicas, geológicas e hidrogeoquímicas del acuífero, en el caso de aguas subterráneas (ver figura 30).
 - Vulnerabilidad del recurso hídrico:** Es la susceptibilidad a presentar desabastecimiento por disminución de la oferta hídrica o por limitación de la disponibilidad al uso por efectos de la contaminación, determinada por las condiciones naturales que regulan la oferta y por la capacidad natural de asimilación, en relación con la demanda y/o el uso del recurso. En el caso de la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico se deben considerar por lo menos los siguientes escenarios: a) cuando la demanda es igual o superior a la disponibilidad, lo cual puede conducir al agotamiento del recurso; b) cuando la oferta natural sufre alteraciones importantes por cambio climático o actividades humanas, caso en el cual se reduce la oferta disponible y se desequilibra la relación oferta-demanda; c) cuando los regímenes hidrológicos e hidrogeológicos presentan fluctuaciones temporales que no concuerdan con una demanda más constante, lo cual lleva al desabastecimiento temporal (ver figura 40). La vulnerabilidad a la disponibilidad del agua depende de las condiciones de calidad requerida para los diferentes usos y de las condiciones en la captación; en este caso se deben contemplar los siguientes escenarios: a) cuando la carga sólida proveniente de inundaciones y avenidas torrenciales contamina en alto grado al agua; b) cuando los fenómenos de remoción en masa en la cuenca aportan a los cauces apreciables volúmenes de material que afectan la calidad del agua; c) cuando las cargas contaminantes vertidas a lo largo del cauce superan la capacidad de autoepuración del curso o cuerpo de agua, dificultando o impidiendo su uso en otras actividades (figura 31).
- **Riesgo:** Se pueden distinguir dos conceptos:
 - Riesgo del sistema hídrico:** Es la probabilidad de que se presenten daños o pérdidas en el sistema hídrico, que puedan afectar de manera total o parcial los procesos naturales del ciclo del agua a causa de un evento amenazante.
 - Riesgo del recurso hídrico:** Es la probabilidad de que se presenten afectaciones en el uso y aprovechamiento del recurso, a causa de una inadecuada relación entre la oferta y la demanda del mismo.
- **Inundaciones:** Son flujos de agua que sobrepasan las orillas naturales o artificiales de una corriente, y ocupan una porción de terreno que, en condiciones normales, permanece por encima del nivel de los cuerpos de agua que lo

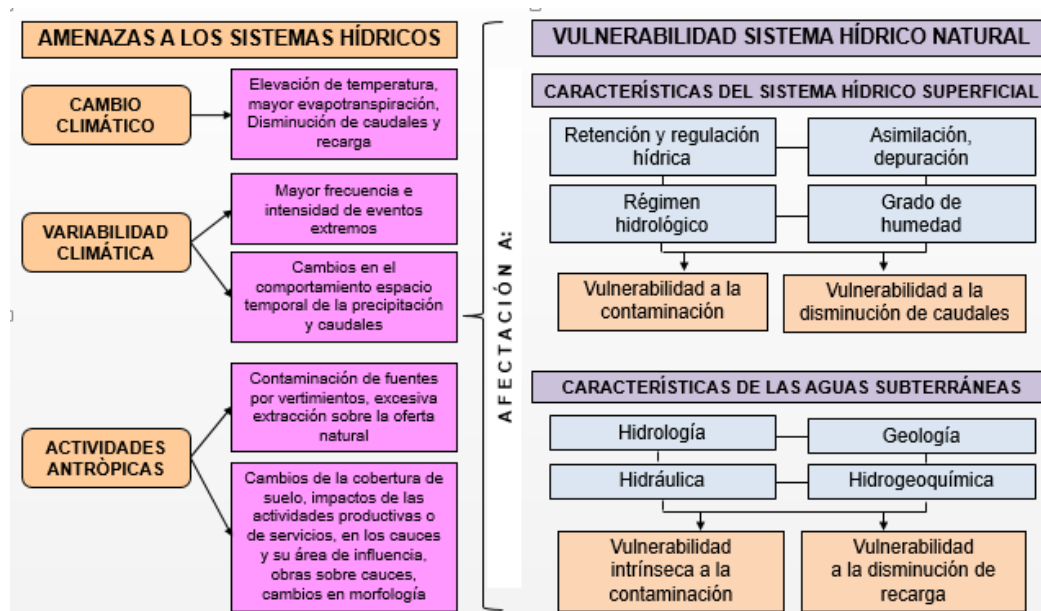
rodean (UNESCO & RAPCA, en IDEAM, 2013). Las inundaciones son fenómenos naturales ligados al régimen climático de una cuenca, como lluvias intensas, cambios estacionales de temperatura (descongelamiento del hielo), o a fenómenos naturales como tsunamis, rompimiento de presas generadas por deslizamientos o derrumbes sobre el cauce, lahares (causados por desprendimientos de masas de hielo que se mezclan en su recorrido con materiales de todo tipo, adquiriendo una gran potencia destructiva), u otros. Pero cuando el hombre construye sus viviendas o realiza sus actividades económicas en zonas de inundación natural de los cuerpos de agua, se expone a sufrir pérdidas o daños, es decir, se vuelve vulnerable a las inundaciones. Asimismo, dado que la vegetación natural (páramos y bosques) juega un papel de interceptación e infiltración del agua lluvia, la destrucción de estos tipos de vegetación en las laderas de las cuencas reduce el papel regulador de la vegetación e incrementa la potencia de las inundaciones. La construcción de canales de desvío, puentes y otras obras de infraestructura, puede igualmente generar inundaciones donde antes no se producían. Se pueden distinguir dos tipos de inundaciones (ver figura 32):

Inundaciones lentas: Se producen cuando se presentan lluvias persistentes y en forma generalizada dentro de una gran cuenca, generando un incremento paulatino de los caudales de los grandes ríos hasta superar la capacidad máxima de almacenamiento, produciendo el desbordamiento e inundación de las áreas planas aledañas al cauce principal. Las crecientes así producidas son inicialmente lentas y tienen una gran duración. En Colombia, se presentan en las partes bajas de las cuencas de los ríos Magdalena, Cauca, Sinú, San Jorge y en la Orinoquia y Amazonia (Epam, 2007).

Inundación súbita o torrencial: Producida en ríos de montaña y originada por lluvias intensas. El área de la cuenca aportante es reducida y tiene fuertes pendientes. El aumento de los caudales se produce cuando la cuenca recibe la acción de las tormentas durante determinadas épocas del año, por lo que las crecientes suelen ser repentinas y de corta duración. Estas inundaciones, por ser intempestivas, son generalmente las que causan los mayores estragos en la población. En Colombia se presentan con regularidad en las cuencas de la región Andina (Epam, 2007).

Otros fenómenos relacionados son los **encharcamientos** causados por la lluvia, principalmente en zonas planas o cubetas, y las inundaciones súbitas causadas por la ruptura de presas naturales o artificiales.

Figura 30. Marco conceptual para el análisis de amenazas y vulnerabilidades del sistema hídrico (IDEAM, 2013)



4.2. METODOLOGÍA

Para determinar la **amenaza al sistema hídrico por variabilidad y cambio climático**, el IDEAM ha desarrollado una metodología basada en la identificación de los cambios en los valores estadísticos que describen las distribuciones de probabilidad de las series mensuales de escurrimiento, como respuesta a los cambios de precipitación estimados por efecto del cambio climático para el período 2011-2040 (IDEAM & Caicedo, 2011; en IDEAM, 2013).

Para evaluar las **amenazas al sistema hídrico natural por pérdida de ecosistemas reguladores**, se emplean los Índices de Regulación Hídrica (IRH) y Aridez (IA). Estos indicadores se deben comparar con los datos sobre pérdida de coberturas vegetales de protección, determinados a partir de mapas multitemporales (cada 10 años por ejemplo). Los mapas deben ser acompañados con mapas de erosión y movimientos en masa, para determinar las zonas donde estos procesos tienen tendencia a aumentar. Las cuencas con IRH entre bajo y medio y con IA entre deficitario y moderado deben ser objeto de identificación para fines de manejo. Asimismo se debe determinar la vulnerabilidad de los ecosistemas reguladores.

Figura 31. Marco conceptual para el análisis de vulnerabilidad del recurso hídrico (IDEAM, 2013)

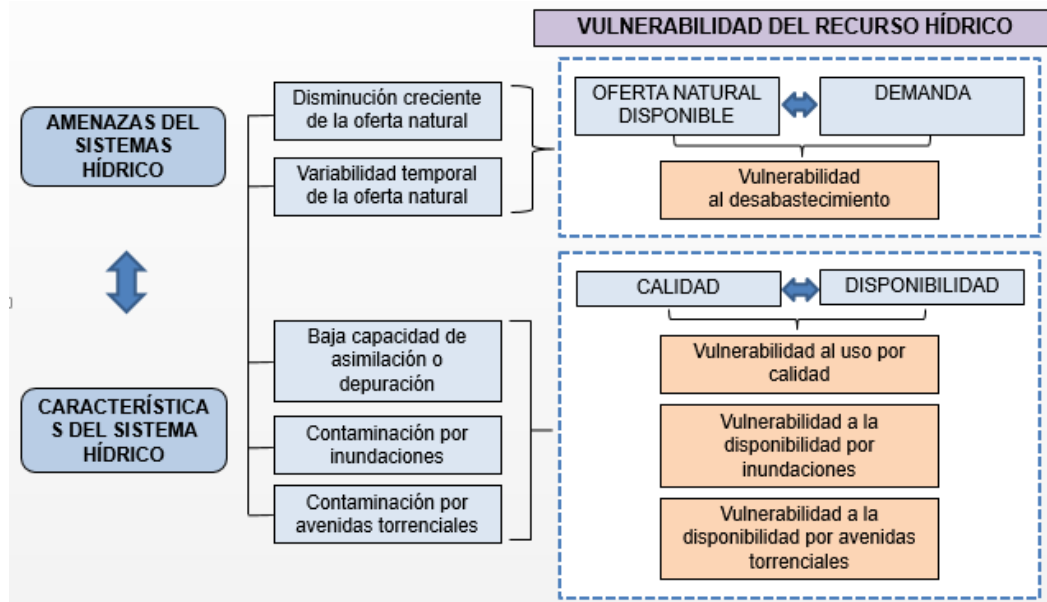
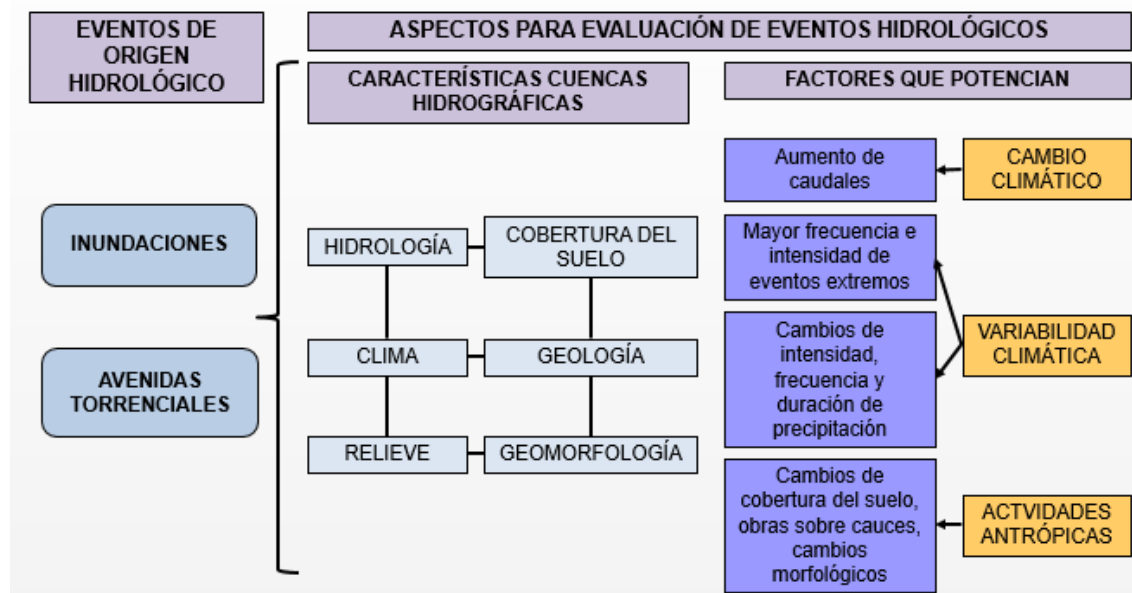


Figura 32. Marco conceptual para el análisis de amenazas en el territorio (IDEAM, 2013)



Para evaluar **la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos**, se debe determinar: a) la capacidad de atenuación de la carga contaminante que ocurre en el suelo, en la zona saturada y no saturada; b) la resistencia o la

inaccesibilidad en el sentido hidráulico a la penetración de los contaminantes; y c) los factores externos que puedan retardar o facilitar el impacto de las cargas contaminantes, como la pendiente del terreno y la recarga del acuífero (MADS y Vargas, 2010).

Para evaluar la **vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de aguas superficiales**, se debe evaluar la capacidad de asimilación y depuración de las fuentes hídricas, en función del régimen hidrológico y de las diferentes cargas a que están expuestas.

Para evaluar la **vulnerabilidad al desabastecimiento de agua**, se puede utilizar: a) el Índice de Uso del Agua (IUA), para identificar las cuencas con $IUA \geq 50$, caracterizadas por una demanda igual o superior a la oferta disponible con comportamiento estable y permanente; b) el Indicador de Vulnerabilidad a Efectos de la Variabilidad Climática (IDEAM & Caicedo, 2011), para determinar las cuencas o zonas donde la oferta natural presenta alteraciones importantes por cambio climático y actividades humanas, lo que ha producido disminución de la oferta disponible del recurso y desequilibrio de la relación oferta – demanda, de manera permanente; c) el Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico IVDH, para determinar las cuencas o zonas donde el comportamiento natural de los regímenes hidrológico e hidrogeológico presentan fluctuaciones temporales que no están acordes con la demanda más constante de la unidad.

Para evaluar la **vulnerabilidad a la disponibilidad de agua por calidad para consumo humano**, se debe utilizar el Indicador de Eventos Torrenciales IVET, el cual relaciona los índices morfométricos de la cuenca con la variabilidad de caudales.

Para evaluar la **vulnerabilidad a la contaminación del agua durante los eventos de inundación lenta y por aportes sólidos debidos a remoción en masa y erosión**, se deberá desarrollar los indicadores e incorporarlos a la ERA. De igual forma se debe desarrollar e incorporar un indicador de la vulnerabilidad a la contaminación del agua por vertimientos a los largo del cauce.

Para **delimitar las zonas inundables** se debe seguir el siguiente procedimiento (IDEAM, 2013):

- 1) Determinar el nivel de resolución o escala del mapa, de acuerdo con la cartografía básica disponible, que no deberá ser inferior a 1:25.000 (aunque esta escala es muy imprecisa puesto que la distancia entre curvas de nivel es de 25 metros, por lo cual no es discriminante en llanuras aluviales).
- 2) Obtener imágenes de satélite o similares con pixel inferior a 10 m, o fotografías aéreas de escala mayor a 1:30.000.
- 3) Realizar el inventario de estaciones hidrometeorológicas con información aplicable (niveles y caudales, lluvias máximas de 24 horas).
- 4) Identificar los mecanismos predominantes de las inundaciones (fluvial, pluvial, costero, etc).
- 5) Revisar los eventos históricos y priorizar las áreas con mayor recurrencia de inundaciones. Identificar tipo y fecha de inundaciones, frecuencia de eventos y número de personas y viviendas afectadas.
- 6) Determinar huellas de las crecientes y, en caso de contar con información de estaciones hidrométricas, relacionarlas con los niveles registrados.
- 7) Elaborar información geomorfológica pertinente a la escala cartográfica seleccionada, para delimitar geoformas de la dinámica fluvial, antiguas y activas, y determinar la frecuencia cualitativas de inundaciones, e incluso inferir órdenes de magnitud de parámetros como profundidad, velocidad de la corriente y carga sólida transportada.
- 8) Definir las áreas susceptibles a inundación por efectos de la dinámica actual de las aguas superficiales mediante: a) mediante la elaboración de mapas de geomorfología fluvial, y b) inventario y registro actual de áreas inundables, que permita la zonificación de los cauces de acuerdo a su dinámica fluvial, y la delimitación y caracterización de las áreas susceptibles a inundarse de acuerdo al tipo de dinámica fluvial actual de los tramos zonificados.²

Para **delimitar las zonas afectables por avenidas torrenciales** se debe seguir el siguiente procedimiento (IDEAM, 2013):

² Las notas sobre valores de las escalas de los puntos 1) y 2) son de responsabilidad de EPAM. De igual manera, en caso de contar con series de caudales diarios y/o máximos mensuales o anuales, se recomienda realizar un análisis de frecuencia de crecientes, que permita determinar las crecientes para diferentes períodos de retorno (ver capítulo de oferta), y, luego, con ayuda de un modelo como HEC HMS y un mapa topográfico a escala adecuada, estimar las manchas de inundación para cada período de retorno. En caso de no disponer de series de caudales, otro procedimiento para estimar las crecientes para diferentes períodos de retorno es mediante un modelo lluvia – caudal.

- 1) Mediante la aplicación del Índice de Eventos Torrenciales IVET, se seleccionarán las cuencas que presenten una alta a muy alta susceptibilidad a eventos torrenciales.
- 2) En las cuencas seleccionadas se realizará la delimitación de las áreas de posible afectación mediante análisis morfológicos, inventario de procesos y análisis de fotografías aéreas o satelitales de escala adecuada.
- 3) Priorización de las cuencas o áreas así seleccionadas, para estudios de mayor detalle.³

Dado que la información necesaria para la evaluación del riesgo es la misma necesaria para la estimación de los indicadores de amenaza y vulnerabilidad, en el capítulo 5, Indicadores, se relacionan los requerimientos de información.

4.3. TÉCNICAS DE ESPACIALIZACIÓN

Además de las técnicas que han sido descritas en el marco conceptual y en la metodología, se sugieren las siguientes (Epam, 2014):

- Delimitar sobre mapas a escala adecuada las zonas con diferente grado de amenaza, determinadas como ha quedado explicado.
- Delimitar sobre mapas a la misma escala de los mapas de amenaza, las zonas con diferentes niveles de vulnerabilidad, determinadas como ha quedado explicado anteriormente.
- Diseñar un algoritmo que combine la amenaza y la vulnerabilidad, para determinar zonas con diferente nivel de riesgo.

El proceso puede ejecutarse fácilmente con ayuda de un SIG. En los casos en que la metodología ERA sólo requiera estimación de la amenaza o la vulnerabilidad, no es necesario estimar el riesgo.

4.4. PRODUCTOS

Los productos a obtener son los siguientes:

- Mapa de amenaza al sistema hídrico por variabilidad y cambio climático.
- Mapa de amenaza al sistema hídrico natural por pérdida de ecosistemas reguladores, según Índice de Regulación Hídrica (IRH).
- Mapa de amenaza al sistema hídrico natural por pérdida de ecosistemas reguladores, según Índice de Aridez (IA).
- Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos.
- Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de aguas superficiales.
- Mapa de la vulnerabilidad al desabastecimiento de agua.
- Mapa de vulnerabilidad a la disponibilidad de agua por calidad para consumo humano.
- Mapa de vulnerabilidad a la contaminación del agua durante los eventos de inundación lenta y por aportes sólidos debidos a remoción en masa y erosión.
- Mapa de zonas inundables.
- Mapa de zonas afectables por avenidas torrenciales.

5. INDICADORES DEL RECURSO HÍDRICO

El conjunto de indicadores hídricos regionales cubre dos aspectos: el sistema hídrico natural y la intervención antrópica sobre este sistema. Mediante estos indicadores se busca evaluar y comparar en forma permanente escenarios dinámicos, variables en el espacio y el tiempo, del sistema y recurso hídrico, que permitan apoyar el conocimiento y la optimización de la relación entre la oferta y la demanda del recurso, así como la protección de los ecosistemas asociados a las fuentes abastecedoras de agua y receptoras de residuos.

³ Un método alternativo es la delimitación de depósitos torrenciales (conos, abanicos) mediante fotointerpretación. Estas son las zonas de mayor susceptibilidad a eventos torrenciales; el tamaño del cono es indicador de la importancia de la susceptibilidad. En las quebradas o arroyos que no presenten conos a su salida al nivel de base local, se analizará las condiciones morfológicas, tales como la pendiente del cauce y su morfología (huellas de socavamiento e incisión lateral) para determinar el grado de actividad torrencial, menor en todo caso que cuando se presenten conos (Nota de Epam).

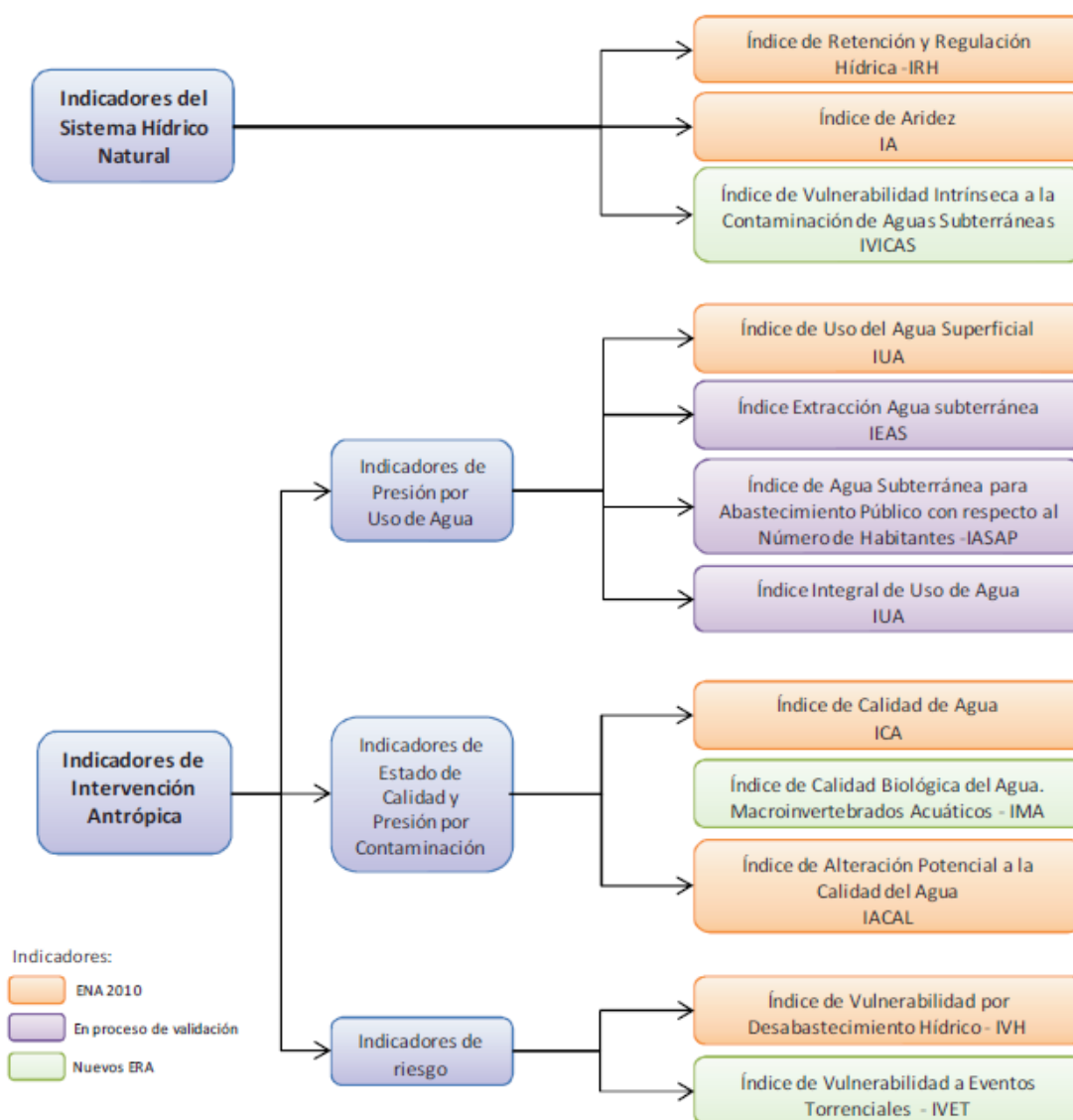
5.1. INDICADORES DEL SISTEMA HÍDRICO NATURAL

La figura 33 muestra el sistema de indicadores seleccionados por el SIAC. Las tablas 18 a 20 muestran la relación de los indicadores, su significado, la fórmula de cálculo, la información necesaria y la periodicidad de actualización, entre otros aspectos.

5.2. INDICADORES DE INTERVENCIÓN ANTRÓPICA

De acuerdo con la figura 33, hay tres categorías de indicadores de intervención antrópica: indicadores de presión por uso del agua, indicadores de estado de calidad y presión por contaminación.

Figura 33. Sistema de indicadores hídricos regionales (IDEAM, 2013)



5.2.1. Indicadores de presión por uso del agua

Se consideran cuatro índices: índice de uso del agua, índice de extracción de aguas subterráneas, índice de agua subterránea para abastecimiento público con respecto al número de habitantes, e índice integral de uso de agua

superficial y subterránea. Las tablas 21 y 22 muestran la relación de los indicadores, su significado, la fórmula de cálculo, la información necesaria y la periodicidad de actualización, entre otros aspectos.

Tabla 18. Indicadores del sistema hídrico natural (adaptado de IDEAM, 2013)

Indicador	Fórmula	Significado, información necesaria y otros aspectos
Índice de retención y regulación hídrica IRH	$IRH = V_p/V_t$ V_p = Área por debajo del caudal medio en la curva de frecuencias V_t = Área total bajo la curva de frecuencias acumuladas	<i>Significado:</i> Mide la capacidad de retención de humedad de las cuencas. Varía entre 0 y 1. Mientras más bajos menor regulación.
		<i>Información necesaria:</i> Curva de frecuencias acumuladas de caudales medios diarios (o mensuales), para estaciones con más de 15 años de registro. Cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 o mayor.
		<i>Forma de representación:</i> Mapa de isolíneas de IRH (tabla 19).
Índice de aridez IA	$IA = \frac{ETP - ETR}{ETP}$ ETP = Evapotranspiración potencial (mm) ETR = Evapotranspiración real (mm)	<i>Significado:</i> Mide el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región. Varía entre 0 y 1. Mientras más altos mayor déficit de precipitación.
		<i>Información necesaria:</i> Precipitación diaria, mensual y anual, para estaciones con más de 15 años de registro. Temperatura media diaria, mensual y anual, para estaciones con más de 15 años de registro. Parámetros necesarios para el cálculo de ETP. ETR se calcula por las fórmulas de Budyko o Turc. ETP se calcula por la fórmula de Penman-Monteith Cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 o mayor.
		<i>Forma de representación:</i> Mapa de isolíneas de IA (tabla 20).
Índice de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de aguas subterráneas IVICAS	Guía MVDI, 2010. "Propuesta metodológica para evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación". A criterio CARs, AAU. Se puede emplear algoritmo con variables ponderadas.	<i>Significado:</i> Mide la susceptibilidad de una acuífero o sistema acuífero a ser contaminado, en función de sus características propias. Es adimensional. Su calificación varía en tres categorías: baja o insignificante, moderada y alta.
		<i>Información necesaria:</i> Recarga neta (m³). Capacidad de atenuación del suelo (contenido de arcilla y MO, CIC, textura, grosor). Zona no saturada: litología, espesor y conductividad hidráulica vertical. Zona saturada: litología (consolidación y estratificación), conductividad hidráulica, tiempo de residencia de aguas subterráneas. Cartografía geológica a escala adecuada. Cartografía hidrogeológica (MHC, mapas de flujos, otros) Cartografía de suelos a escala adecuada. Cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 o mayor.
		<i>Forma de representación:</i> Mapa de áreas de iguales condiciones de vulnerabilidad.

Tabla 19. Categorías de índice de retención y regulación hídrica IRH (IDEAM, 2013)

RANGO DE VALORES IRH	CATEGORÍA	CARACTERÍSTICAS
> 0.85	MUY ALTO	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy alta
0.75 - 0.85	ALTO	Capacidad de la cuenca para retener y regular alta
0.65 - 0.75	MEDIO	Capacidad de la cuenca para retener y regular media
0.50 - 0.65	BAJO	Capacidad de la cuenca para retener y regular baja
< 0.50	MUY BAJO	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy baja

Tabla 20. Categorías del índice de aridez IA (IDEAM, 2013)

RANGO DE VALORES ÍNDICE DE ARIDEZ	CATEGORÍA	CARACTERÍSTICAS
< 0.15		Altos excedentes de agua
0.15 - 0.19		Excedentes de agua
0.20 - 0.29		Entre moderado y excedentes de agua
0.30 - 0.39		Moderado
0.40 - 0.49		Entre moderado y deficitario de agua
0.50 - 0.59		Deficitario de agua
> 0.60		Altamente deficitario de agua

Tabla 21. Indicadores de presión por uso del agua (adaptado de IDEAM, 2013)

Indicador	Fórmula	Significado, información necesaria y otros aspectos
Índice de uso del agua IUA	$IUA = (Dh/OHRD) \cdot 100$ Dh = Σ(volumen de agua extraída para usos sectoriales en un período determinado) OHRD = Oferta hídrica superficial regional disponible	Significado: Mide la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, con respecto a la oferta hídrica regional disponible neta, en un período determinado (mensual, anual) y en una unidad dada de análisis. Varía entre 0 y 100%. Mientras más alta mayor presión de la demanda.
		Información necesaria: Demanda total de agua superficial por los diferentes sectores usuarios (m³) (ver capítulo de demanda) Oferta hídrica superficial disponible: Se puede calcular por balance hídrico, por modelo lluvia – caudal, o a partir de datos de caudal de la estación hidrométrica (ver capítulo de oferta). La OHRD se debe calcular para condiciones medias y secas (año típico seco), según las series de caudales medios y mínimos mensuales de más de 15 años de registro. Cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 o mayor.
		Forma de representación: Mapa de áreas de iguales condiciones de IUA (tabla 22).
Índice de extracción de agua subterránea IEAS	$IEAS = \text{Extracción total de agua subterránea} / \text{Recarga} \cdot 100$	Significado: Indicador de estado que mide el nivel actual de intensidad de uso que se hace de la oferta renovable de aguas subterráneas de un acuífero o sistema acuífero. Varía entre 0 y 100%. Mientras más alto mayor la intensidad de uso. Se calcula con periodicidad anual.
		Información necesaria: Recarga media anual del acuífero o sistema acuífero, u oferta renovable de agua subterránea (ver capítulo de oferta). La recarga se puede estimar por métodos tales como: balance hídrico, simulación numérica de la infiltración vertical, ley de Darcy para calcular rata recarga/descarga, mediciones de campo con pozos de observación, y modelo hidráulicos de flujo de aguas subterráneas, entre otros (ver capítulo de oferta). Extracción total de agua subterránea para los diferentes usuarios (ver capítulo de demanda) Delimitación unidad de análisis debe ser muy cuidadosa, porque normalmente no coinciden las profundidades y tomas de captación con los límites de las unidades geológicas. Cartografía geológica a escala adecuada. Cartografía hidrogeológica (MHC, mapas de flujos, otros) Cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 o mayor.
		Forma de representación: Mapa de acuíferos de iguales condiciones de IEAS
Índice de agua subterránea para abastecimiento público con respecto al número de habitantes IASAP	$IASAP = \text{Agua subterránea para abastecimiento público} / \text{Número habitantes}$	Significado: Indicador de estado que mide la cantidad de agua subterránea por habitante. Se expresa en unidades de volumen o caudal por habitante. Mientras más alto mayor la intensidad de uso. Se calcula con periodicidad anual.
		Información necesaria: Volumen anual de agua subterránea consumido para abastecimiento público, transformado en caudal por día. Población total abastecida con agua subterránea en la unidad Cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 o mayor.
		Forma de representación: Mapa de unidades de análisis de iguales condiciones de IASAP
Índice integral de uso del agua IIUA	$IIUA = \frac{D}{O_{rg} + O_d}$ D = Demanda total sectorial O_{rg} = Oferta renovable de aguas subterráneas (recarga). O_d = Oferta de agua superficial disponible	Significado: Mide la presión por uso en relación con la oferta disponible de aguas superficiales y la oferta renovable de aguas subterráneas. Se expresa en unidades de volumen o caudal por habitante. Mientras más alto mayor la presión de uso. Se calcula con periodicidad anual.
		Información necesaria: Demanda total de agua de los diferentes sectores usuarios (m³) (ver capítulo de demanda) Oferta hídrica superficial disponible: Se puede calcular por balance hídrico, por modelo lluvia – caudal, o a partir de datos de caudal de la estación hidrométrica (ver capítulo de oferta). Recarga media anual del acuífero o sistema acuífero, u oferta renovable de agua subterránea (ver capítulo de oferta). La recarga se puede estimar por métodos tales como: balance hídrico, simulación numérica de la infiltración vertical, ley de Darcy para calcular rata recarga/descarga, mediciones de campo con pozos de observación, y modelo hidráulicos de flujo de aguas subterráneas, entre otros (ver capítulo de oferta). Delimitación unidad de análisis para agua subterránea debe ser muy cuidadosa, porque normalmente no coinciden las profundidades y tomas de captación con los límites de las unidades geológicas. Cartografía geológica a escala adecuada. Cartografía hidrogeológica (MHC, mapas de flujos, otros) Cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 o mayor.
		Forma de representación: Mapa de unidades de análisis de iguales condiciones de IIUA

Tabla 22. Categorías del índice de uso del agua IUA (IDEAM, 2013)

Rango (Dh/Oh)*100 IUA	Categoría IUA	Significado
>50	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
20.01 - 50	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
10.01 - 20	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
1 - 10	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
≤ 1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

5.2.2. Indicadores de estado de la calidad del agua y presión por contaminación

Se consideran tres indicadores: dos sobre el estado de la calidad del agua (índice de calidad del agua ICA, e índice de calidad biológica del agua por macroinvertebrados acuáticos IMA), y un indicador de presión (índice de alteración potencial de la calidad del agua IACAL). Las tablas 23 a 26 muestran la relación de los indicadores, su significado, la fórmula de cálculo, la información necesaria y la periodicidad de actualización, entre otros aspectos.

Tabla 23. Indicadores de estado de la calidad del agua y presión por contaminación (adaptado de IDEAM, 2013)

Indicador	Fórmula	Significado, información necesaria y otros aspectos
Índice de calidad del agua ICA	$ICA = \Sigma(0,16 OD + 0,14 SST + 0,14 DQO + 0,14 CE + 0,14 N/P + 0,14 pH + 0,14 CF)$ Los coeficientes representan la ponderación de cada componente del ICA	Significado: Representa las condiciones de calidad física, química y bacteriológica de un curso o cuerpo de agua. Varía entre 0 y 1. Mientras más alto mejor es la calidad del agua. Se calcula con periodicidad anual.
		Información necesaria: Concentraciones y/o valores medios de los siguientes parámetros en cada estación de monitoreo de calidad (ver capítulo de calidad): Oxígeno disuelto OD (% de saturación) Sólidos en suspensión SST (mg/l) Demanda química de oxígeno DQO (mg/l) Conductividad eléctrica CE (μS/cm) Nitrógeno total N (mg/l) Fósforo total P (mg/l) Relación N total/P total pH (unidades de pH) Coliformes fecales CF (UFC/100 ml) Cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 o mayor.
		Forma de representación: Mapa de tramos (cursos de agua) o áreas (cuerpos de agua lénticos) de iguales condiciones de ICA (tabla 24).
Índice de calidad biológica del agua por macroinvertebrados acuáticos IMA	$IMA = \Sigma(F_i \cdot P_i)$ Fi = Familia de macroinvertebrados presente Pi = Puntaje de cada familia (entre 1 y 10)	Significado: Representa las condiciones de calidad biológica de un curso o cuerpo de agua. Varía entre menos de 15 y más de 150. Mientras más alto mejor es la calidad del agua. Se calcula con periodicidad anual o la que determine la autoridad regional.
		Información necesaria: Muestreo e identificación de macroinvertebrados acuáticos (bentos) a nivel de familia, con anotación de presencia/ausencia en cada muestreo. Clasificación de las familias encontradas de acuerdo con su nivel de tolerancia a la contaminación, en una escala de 1 a 10. Por ejemplo: familias sensibles, no tolerantes a la contaminación, como Perlidae, Oligoneuridae, tienen un puntaje de a10; y familias altamente tolerantes, que viven en aguas muy contaminadas, como Tubificidae, tienen un puntaje de 1. La suma de los puntajes de todas las familias presentes proporciona el puntaje total BMWP/Col (método desarrollado por el Biological Monitoring Working Party – BMWP-, adaptado para Colombia por G. Roldán -BMWP/Col). Cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 o mayor.
		Forma de representación: Mapa de tramos (cursos de agua) o áreas (cuerpos de agua lénticos) de iguales condiciones de IMA (tabla 25).
Índice de alteración	1) Cálculo de carga para DBO ₅ , DQO- DBO ₅ , SST, NT, PT y otros	Significado: Mide la presión por contaminantes sobre la calidad del agua superficial. Se expresa en unidades adimensionales. Mientras más alto mayor la presión de

Indicador	Fórmula	Significado, información necesaria y otros aspectos
potencial de la calidad del agua IACAL	de interés: $K_P = (1 - X_{RT}) * \sum (F_{IP} * PS) - (F_{IP} * PPS)$ $K_C = (PC * X_{BE} * F_i) + (PC * X_A * X_{PC} * X_{BNE} * F_i)$ $K_{IND} = ((PI * F_i) + (CMP * F_i)) * (1 - X_{RT})$ $K_{SG} = ((WGVP * I_i) + (WGPP * I_i))$ $K_Z = ((P_z * I_i) + (CMP * I_i)) * (1 - X_{RT})$ 2) Cálculo de la carga municipal: $K = K_P + K_C + K_{IND} + K_{SG} + K_Z$ 3) Categorización de presión según cargas DBO ₅ , DQO- DBO ₅ , SST, NT, PT y otros de interés (en ton/año), a nivel municipal, en 5 categorías: 1: baja, 2: moderada, 3: media alta, 4: alta y 5: muy alta (percentiles 65, 75, 85, 95 y >95) 4) Agregación de cargas DBO ₅ , DQO- DBO ₅ , SST, NT, PT y otros de interés (en ton/año), a nivel de la unidad de análisis, y recategorización en 5 categorías: 1: baja, 2: moderada, 3: media alta, 4: alta y 5: muy alta (K ₁) (mismos percentiles) 5) Sumatoria jerarquías: IACAL = K ₁ / Oferta (carga en ton/año y oferta en MMC para año medio y año seco). Recategorización en las mismas 5 categorías de percentiles.	contaminación. Se calcula con periodicidad anual. <i>Información necesaria:</i> Población municipal (P). Fracción de población conectada al alcantarillado (X _{PS}). Población conectada al alcantarillado (PS). Población conectada a pozo séptico (PPS) F _{IP} = Factor de emisión de DBO ₅ por persona, según si está conectada a alcantarillado o pozo séptico (18,1 y 6,9 kg/hab.año, según ENA 2010). X _{RT} = Fracción de remoción de materia orgánica, sólidos y nutrientes, en función del tipo de tratamiento del agua residual doméstica. PC = Producción municipal de café, en número de sacos de 60 kg de café pergamino seco (por cada 62,5 kg de café en cereza -cc-, se producen 12,5 kg de café pergamino seco -cps-, según Cenicafé, 2005) X _{BE} = Fracción de beneficio ecológico nacional de café (31% de fincas según Cenicafé, 2005). X _{BNE} = Fracción de beneficio no ecológico nacional de café. PI = Producción industrial (cantidad) para las actividades económicas de interés de la unidad de análisis. CMP = Consumo de materias primas para una industria determinada. X _{RT} = Fracción de remoción de vertimientos según tecnología prototipo de cada subsector. F _i = Factor de emisión para una unidad productiva específica en kg DBO ₅ , DQO, SST, NT y PT por tonelada de producto final o de materia prima consumida. WGVP = Tonelada de animal vacuno en pie. WGPP = Tonelada de animal porcino en pie. K _P = Carga de DBO ₅ proveniente de la población en ton/año. K _C = Carga de DBO ₅ proveniente del beneficio del café en ton/año. K _{IND} = Carga de DBO ₅ proveniente de la industria (actividades de interés) en ton/año. K _{SG} = Carga de DBO ₅ proveniente del sacrificio de ganado en ton/año. K = Carga municipal de DBO ₅ en ton/año. K _Z = Carga de otra variable de interés de otras actividades económicas de la unidad de análisis. Cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 o mayor.
		<i>Forma de representación:</i> Mapa de unidades de análisis de iguales condiciones de IACAL (tabla 26)

Tabla 24. Categorías del índice de calidad del agua ICA (IDEAM, 2013)

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0,00 – 0,25	Muy mala	Rojo
0,26 – 0,50	Mala	Naranja
0,51 – 0,70	Regular	Amarillo
0,71 – 0,90	Aceptable	Verde
0,91 – 1,00	Buena	azul

Tabla 25. Categorías del índice de calidad biológica del agua IMA (Roldán, 2003; en IDEAM, 2013)

CLASE	CALIDAD	BMWP/Col	SIGNIFICADO	COLOR
I	Buena	>150, 101 -120	Aguas muy limpias	AZUL
II	Aceptable	61 – 100	Se evidencian efectos de la contaminación	VERDE
III	Dudosa	36 – 60	Aguas moderadamente contaminadas	AMARILLO
IV	Crítica	16 – 35	Aguas muy contaminadas	NARANJA
V	Muy crítica	< 15	Aguas fuertemente contaminadas situación crítica	ROJO

Tabla 26. Categorías del índice de alteración potencial de la calidad del agua IACAL (IDEAM, 2013)

IACAL	
PROMEDIO CATEGORIA (NT + PT + SST + DBO + (DQO – DBO) / 5	
Categoría	Valor
Baja	1
Moderada	2
Media Alta	3
Alta	4
Muy Alta	5

5.2.3. Indicadores de riesgo en la evaluación regional del agua

Se consideran dos indicadores: el índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH) y el índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET). Las tablas 27 a 32 muestran la relación de los indicadores, su significado, la fórmula de cálculo, la información necesaria y la periodicidad de actualización, entre otros aspectos.

Tabla 27. Indicadores de riesgo en la ERA

Indicador	Fórmula	Significado, información necesaria y otros aspectos
Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH)	Matriz de decisión con base en la relación de rangos del índice de regulación hídrica (IRH) y el índice de uso del agua (IUA) (ver tabla 28)	<i>Significado:</i> Representa el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua, que, ante amenazas como largos períodos de estiaje o eventos como el Fenómeno Cálido del Pacífico /El Niño), podría generar riesgo de desabastecimiento. El IVH varía cualitativamente según la matriz de la tabla 28. Se calcula con periodicidad anual.
		<i>Información necesaria:</i> Mapa y resultados tabulares del índice de regulación hídrica IRH. Mapa y resultados tabulares del índice de uso del agua IUA. Variables y parámetros necesarios para el cálculo de IRH y del IUA (ver tablas 18 y 21) Cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 o mayor.
		<i>Forma de representación:</i> Mapa de áreas con iguales condiciones de IVH (tabla 28).
Índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales IVET	Matriz de decisión entre el índice morfométrico y el índice de variabilidad (tabla 32) El índice de variabilidad (IV) se estima así: $IV = (\log Q_i - \log Q_f) / (\log X_i - \log X_f)$ Q_i y Q_f = Dos caudales tomados de la curva de duración de caudales. X_i y X_f = Porcentajes de tiempo en que se exceden los caudales Q_i y Q_f (ver clases del índice en tabla 29). El índice morfométrico se estima mediante las matrices mostradas en las tablas 30 y 31.	<i>Significado:</i> Representa el grado de susceptibilidad de una cuenca a presentar eventos de carácter torrencial. Varía cualitativamente desde vulnerabilidad baja a muy alta, según tabla 32. Se calcula con periodicidad anual.
		<i>Información necesaria:</i> Índice de variabilidad, para cuyo cálculo se requiere la siguiente información: - Caudales diarios con series mayores de 15 años - Precipitaciones diarias de estaciones cercanas, con series mayores de 15 años, en caso de que no existan series de caudal (para estimación de caudales por modelos lluvia – caudal). - Temperaturas diarias (si se emplean modelos lluvia – caudal) - Evaporación diaria en estaciones cercanas (si se emplean modelos lluvia – caudal) - Mapa de geología (si se emplean modelos lluvia – caudal) - Mapa de geomorfología (si se emplean modelos lluvia – caudal) - Mapas de suelos (para uso de modelos lluvia – caudal) - Mapa de cobertura vegetal (para uso de modelos lluvia – caudal) - Curva de duración de caudales en papel logarítmico - Caudales mínimos y % tiempo de excedencia - Caudales máximos y % tiempo de excedencia - La tabla 29 muestra la clasificación del índice de variabilidad (a mayor índice, mayor torrencialidad) Índice morfométrico, para cuyo cálculo se requiere la siguiente información (ver clases de cada factor en tabla 30): - Pendiente de compacidad o de forma - Pendiente media de la cuenca - Densidad de drenaje de la cuenca - La tabla 31 muestra las clases del índice morfométrico en función de estos tres factores (mientras más alto el índice, mayor torrencialidad). Cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 o mayor. DEM 30 (NASA)
		<i>Forma de representación:</i> Mapa de cuencas y subcuencas con similares condiciones de torrencialidad IVET, dentro de la unidad de análisis (tabla 32).

Tabla 28. Matriz de decisión para cálculo del IVH (IDEAM, 2010)

Índice de uso de agua	Índice de regulación	Categoría Vulnerabilidad
Muy bajo	Alto	Muy bajo
Muy bajo	Moderado	Bajo
Muy bajo	Bajo	Medio
Muy bajo	Muy bajo	Medio
Bajo	Alto	Bajo
Bajo	Moderado	Bajo
Bajo	Bajo	Medio
Bajo	Muy bajo	Medio
Medio	Alto	Medio
Medio	Moderado	Medio
Medio	Bajo	Alto
Medio	Muy bajo	Alto
Alto	Alto	Medio
Alto	Moderado	Alto
Alto	Bajo	Alto
Alto	Muy bajo	Muy alto
Muy alto	Alto	Medio
Muy alto	Moderado	Alto
Muy alto	Bajo	Alto
Muy alto	Muy bajo	Muy alto

Tabla 29. Clasificación del índice de variabilidad (IDEAM, 2013)

Índice de variabilidad	Vulnerabilidad
< 10°	Muy baja
10.1° - 37°	Baja
37.1° - 47°	Media
47.1° - 55	Alta
>55°	Muy alta

Tabla 30. Relaciones para categorías del índice morfométrico (Rivas y Soto, 2009; en IDEAM, 2013)

Índice morfométrico	Escala	Área cuenca km²	Categorías				
			1	2	3	4	5
Densidad de drenaje (km/km²)	1:10.000	<15	<1,50	1,51-2,00	2,01-2,50	2,51-3,00	>3,00
	1:25.000	16 - 50	<1,20	1,21-1,80	1,81-2,00	2,01-2,50	>2,50
	1:100.000	>50	<1,00	1,01-1,50	1,51-2,00	2,01-2,50	>2,50
			Baja	Moderada	Moderada alta	Alta	Muy alta
Pendiente media de la cuenca (%)	1:10.000	<15	<20	21-35	36-50	51-75	>75
	1:100.000	>50	<15	16-30	30-45	46-65	>65
			Accidentado	Fuerte	Muy fuerte	Escarpado	Muy escarpado
Coeficiente de compacidad			<1,625	1,375-1,500	1,251-1,375	1,126-1,250	1,000-1,125
			Oval oblonga a rectangular oblonga	Oval redonda a oval oblonga		Casi redonda a oval redonda	

Tabla 31. Relaciones entre variables para el índice morfométrico (Rivas y Soto, 2009; en IDEAM, 2013)

		Pendiente media de la cuenca						
		1	2	3	4	5		
Densidad de drenaje	1	111	121	131	141	151	1	Coeficiente de forma
		112	122	132	142	152	2	
		113	123	133	143	153	3	
		114	124	134	144	154	4	
		115	125	135	145	155	5	
	2	211	221	231	241	251	1	
		212	222	232	242	252	2	
		213	223	233	243	253	3	
		214	224	234	244	254	4	
		215	225	235	245	255	5	
	3	311	321	331	341	351	1	
		312	322	332	342	352	2	
		313	323	333	343	353	3	
		314	324	334	344	354	4	
		315	325	335	345	355	5	
	4	411	421	431	441	451	1	
		412	422	432	442	452	2	
		413	423	433	443	453	3	
		414	424	434	444	454	4	
		415	425	435	445	455	5	
	5	511	521	531	541	551	1	
		512	522	532	542	552	2	
		513	523	533	543	553	3	
		514	524	534	544	554	4	
		515	525	535	545	555	5	

Muy Alta

Alta

Baja

Moderada

Muy Baja

Tabla 32. Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales IVET (IDEAM, 2013)

Índice de Variabilidad	Índice morfométrico de torrencialidad				
	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Muy Baja	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
Baja	Baja	Media	Media	Alta	Muy alta
Media	Baja	Media	Alta	Alta	Muy alta
Alta	Media	Media	Alta	Muy alta	Muy alta
Muy alta	Media	Alta	Alta	Muy alta	Muy alta

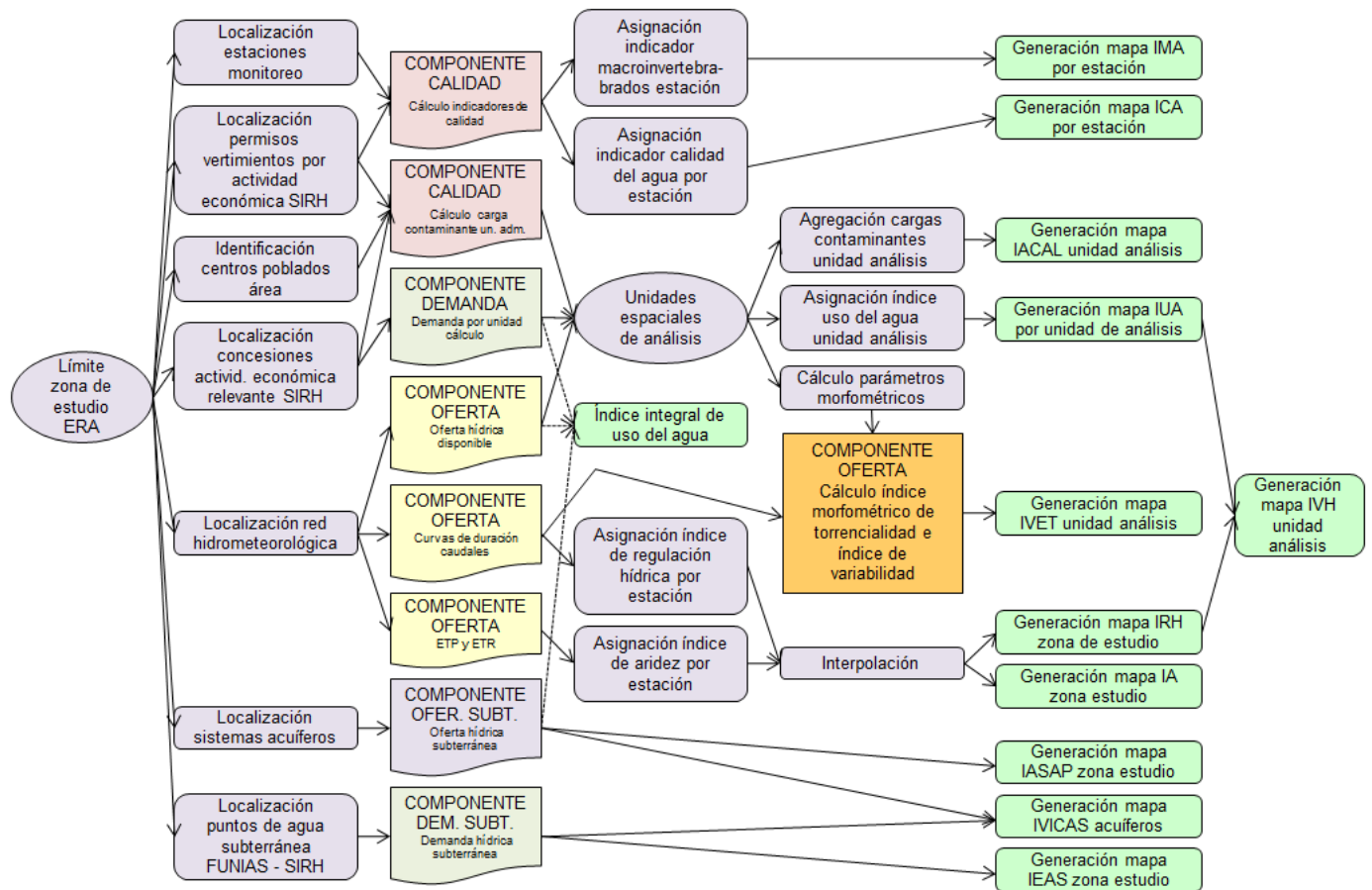
5.3. TÉCNICAS DE ESPACIALIZACIÓN

La figura 43 muestra el procedimiento general para espacializar los indicadores. Tal como se indicó en la descripción de cada indicador, es importante determinar las unidades de análisis, es decir, si son áreas, puntos (estaciones) o líneas (tramos de una corriente), aunque en algunos casos se realice interpolación entre puntos con base en valores puntuales.

5.4. PRODUCTOS

Los productos con los mapas y tablas de todos y cada uno de los indicadores que aparecen en verde en la figura 34.

Figura 34. Procedimiento de espacialización de indicadores (IDEAM, 2013)



6. SISTEMA DE INFORMACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO SIRH

6.1. CONCEPTOS BÁSICOS

De acuerdo con el Decreto 1323 de 2007, el Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH, es un conjunto de elementos que integra el acopio, manejo y consulta de datos, bases de datos, estadísticas, sistemas, modelos, información documental y bibliográfica, reglamentos y protocolos, que facilita la gestión integral del recurso hídrico. En la construcción de este sistema intervienen, fundamentalmente, el MADS, el IDEAM, quien lo coordina, y las CARs y AAU. La figura 35 muestra la síntesis de los elementos conceptuales del SIRH. De igual forma, la figura 36 muestra los componentes principales del sistema de información. Como se observa, los componentes básicos son: a) las fuentes de información (redes de monitoreo, investigaciones, estudio, inventarios de usuarios y permisos, entidades que suministran datos de población, consumo, etc); dentro de éstos, juegan un papel esencial los sistemas de información de las entidades, que, mediante proceso de intercambio, pueden alimentar el SIRH; b) el sistema de información del IDEAM, que centraliza toda la información; c) los usuarios internos del IDEAM; d) los usuarios específicos, dentro de los cuales se pueden mencionar las autoridades ambientales, empresas de servicios públicos, sistema de atención de gestión del riesgo; y e) público en general.

6.2. METODOLOGÍA GENERAL

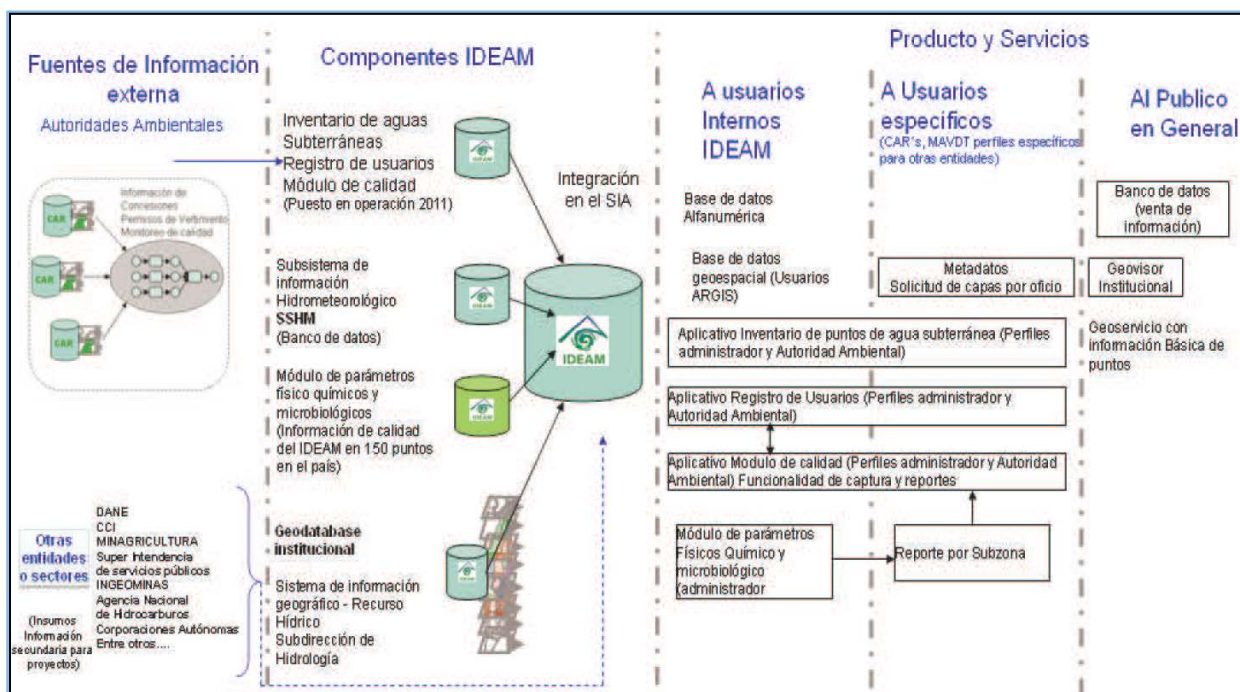
La figura 37 muestra el proceso general de documentación de la información del SIRH, desde la generación de información en la fuente hasta la determinación y control del uso y la calidad del recurso. De igual manera, la figura 38 muestra los requerimientos de información geográfica de las ERA, indispensable para la estimación y la distribución

espacial de las variables hídricas y de los indicadores. Ésta se puede dividir en dos grupos: la información general, de carácter topográfico, hidrográfico, político administrativo y catastral; y la información temática, correspondiente a los mapas especializados que son necesarios para el cálculo de los diferentes indicadores (geología, geomorfología, cobertura vegetal, etc).

Figura 35. Elementos conceptuales del SIRH (MADS & IDEAM, 2011b)



Figura 36. Componentes del sistema de información del recurso hídrico SIRH (MADS & IDEAM, 2011b)



Una vez con la información necesaria obtenida, el SIRH puede proceder a su procesamiento. La figura 39 muestra el procedimiento general para el procesamiento de la información, tanto hidrometeorológica como cartográfica y temática.

Se observa que el sistema debe procesar la información básica, validarla y generar los parámetros en la forma requerida para la estimación de los indicadores.

Figura 37. Fases de documentación de información en el SIRH (IDEAM, 2011)

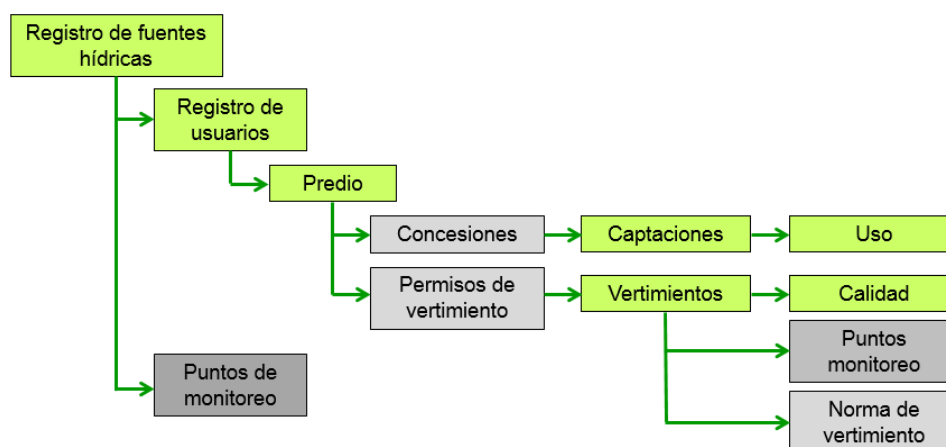
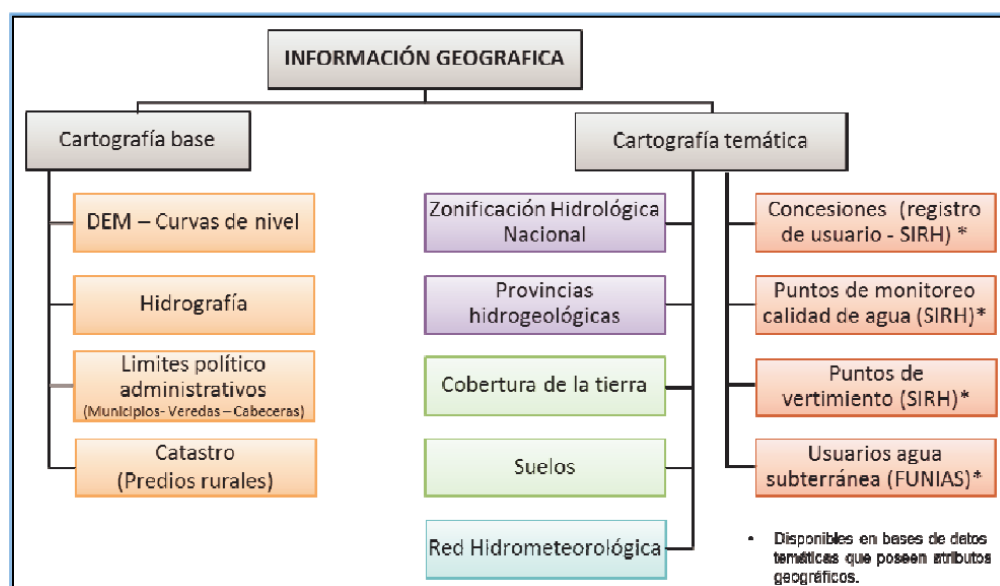


Figura 38. Requerimientos de información geográfica de las ERA (IDEAM, 2013)



6.3. TÉCNICAS DE ESPACIALIZACIÓN

La figura 40 muestra el procedimiento general para el modelamiento espacial de las ERA. Con base en la informa requerida, se debe proceder a su recopilación o generación, a su homologación y validación y a la conformación de la base de datos alfanuméricas y espaciales. Luego se procede a la delimitación y compatibilización de las unidades de análisis territorial, a la caracterización y cuantificación de los componentes de la oferta, demanda, calidad y riesgos del sistema hídrico y, finalmente, a la generación de los indicadores y de los mapas de representación de las variables de análisis y de los indicadores.

Figura 39. Procesamiento de la información geográfica (IDEAM, 2013)

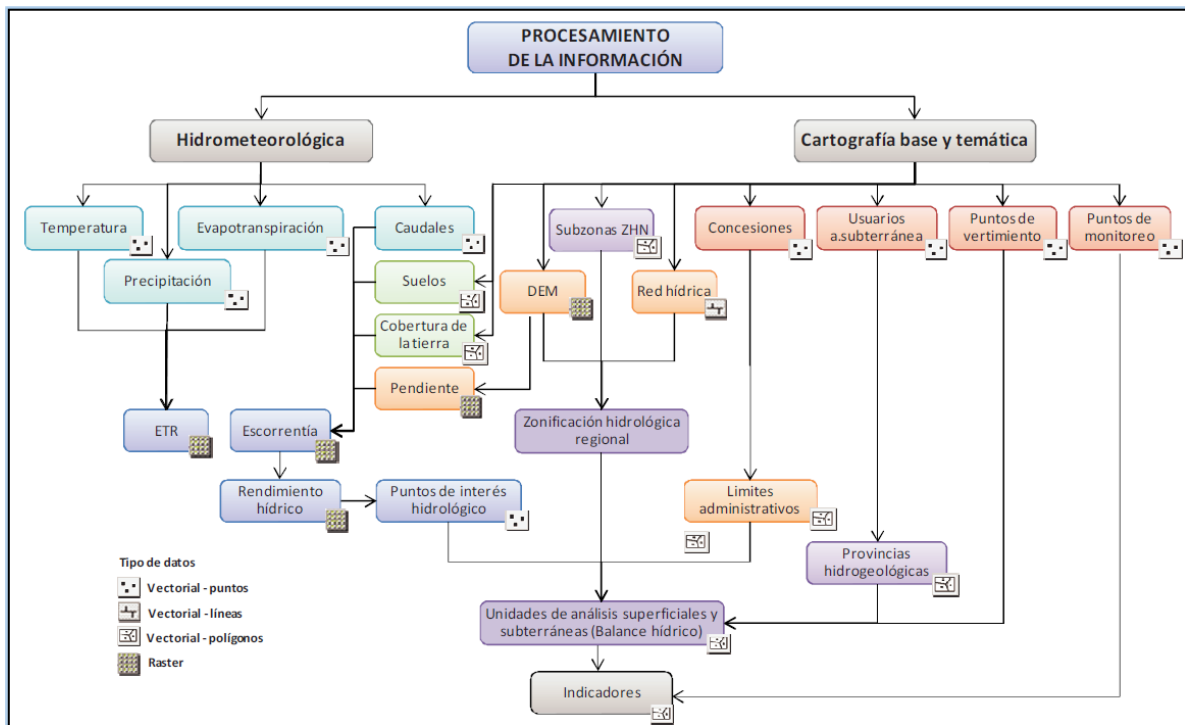
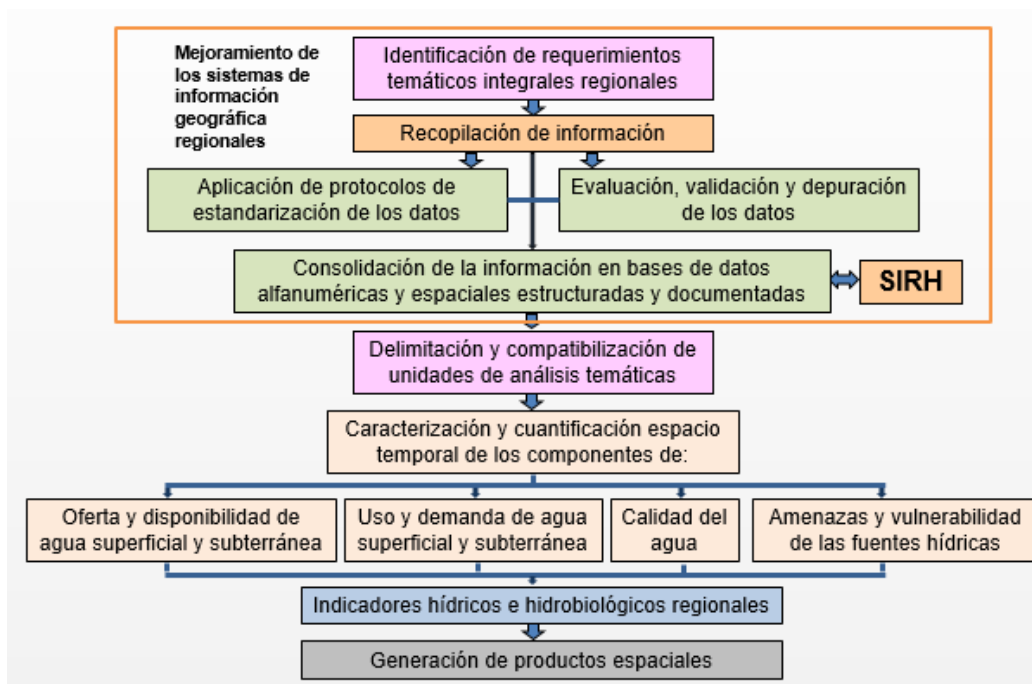


Figura 40. Procedimiento metodológico para el modelamiento espacial de las ERA (IDEAM, 2013)



6.4. PRODUCTOS

Los principales productos del SIRH son:

- Registros georreferenciados y mapas de usuarios de concesiones de aguas, permisos de vertimiento, puntos de extracción de aguas subterráneas (FUNIAS) y otros relacionados.
- Mapas y bases de datos georreferenciadas de las redes hidrometeorológicas y de calidad.
- Base de datos general hidrometeorológica y de calidad del agua a nivel diario, mensual y anual validada.
- Base de datos para la estimación de los indicadores.
- Mapas temáticos necesarios para la estimación de cada uno de los indicadores.
- Mapas de cada uno de los indicadores del sistema y recurso hídrico actuales y los que en el futuro se adopten por las autoridades competentes.

DOCUMENTACIÓN CONSULTADA

Para la elaboración de esta síntesis se utilizaron los siguientes documentos:

- 1) IDEAM, 2013. Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. MADS. Bogotá.
- 2) IDEAM, 2010. Estudio Nacional del Agua. MAVDT. Bogotá.
- 3) EPAM, 2011. Ajuste del programa nacional de monitoreo del recurso hídrico y la determinación de la estrategia de su implementación respondiendo a los indicadores ambientales de seguimiento del recurso hídrico y un estudio de reingeniería de la red, el cual debe definir la red básica nacional para el monitoreo del recurso hídrico y las necesidades de infraestructura para llevar a cabo su implementación. Contrato 214 de 2010. IDEAM. Bogotá.