

Capítulo 3.6.

Fenómenos extremos y cambio climático



[3]	Contenidos y tareas para la elaboración de un plan hidrológico	1
[3.6]	Fenómenos extremos y cambio climático	1
[3.6.1]	Consideración de los fenómenos extremos: sequías e inundaciones	1
[3.6.2]	Consideración cambio climático	18

[3] Contenidos y tareas para la elaboración de un plan hidrológico

[3.6] Fenómenos extremos y cambio climático

[3.6.1] Consideración de los fenómenos extremos: sequías e inundaciones

Definición: Los fenómenos extremos son eventos climáticos inusuales en su frecuencia, intensidad y/o duración, tales como sequías prolongadas, inundaciones repentinas, olas de calor, tormentas intensas y ciclones. En el marco de la planificación hidrológica con visión GIRH, estos fenómenos se consideran perturbaciones que alteran significativamente la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos, superando la variabilidad normal de los sistemas hidrológicos, pudiendo inducir problemas ambientales, de seguridad pública o de salud.

Objetivo: El tratamiento de los fenómenos extremos dentro de los planes hidrológicos busca reducir riesgos, aumentar la resiliencia y garantizar la seguridad hídrica bajo escenarios de incertidumbre, a través de:

1. Prevenir y reducir impactos sobre la seguridad hídrica, los ecosistemas y las actividades socioeconómicas.
2. Anticipar riesgos mediante la evaluación de frecuencia, intensidad y probabilidad de ocurrencia de eventos extremos.
3. Incorporar estrategias de adaptación frente al cambio climático, fortaleciendo la resiliencia de los sistemas hídricos.
4. Garantizar flexibilidad en la planificación y en el diseño de infraestructuras hidráulicas, considerando escenarios de incertidumbre.

Esto permite que cada ciclo de planificación integre lecciones aprendidas y escenarios actualizados, en línea con la visión adaptativa de la GIRH.



Importante:

En la región, los fenómenos extremos, en sus diversas amenazas, pueden condicionar una **alta exposición y vulnerabilidad de bienes y personas**, debido a la variabilidad climática, la desigual capacidad institucional y la presión creciente sobre los recursos hídricos. Esto refuerza la necesidad de contar con estrategias de **resiliencia y adaptación**, apoyadas en monitoreo, modelización y gobernanza del agua.

Utilidad:

La consideración de los fenómenos extremos en la planificación hidrológica puede integrarse directamente en el plan hidrológico o, según la necesidad, desarrollarse en otros planes especiales complementarios, como son los Planes de Sequías o los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación. Por otra parte, el cambio climático incide en la intensidad y frecuencia de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, por lo que también se alude a ellos en los correspondientes planes de adaptación.

La inclusión de los fenómenos extremos en los planes hidrológicos es útil para:

1. **Seguridad hídrica:** Garantiza acceso al agua en cantidad y calidad adecuadas incluso en contextos de crisis (sequías o inundaciones).
2. **Gestión de riesgos:** Permite diseñar **planes específicos de sequías e inundaciones**, sistemas de alerta temprana y protocolos de respuesta eficientes.
3. **Infraestructura resiliente:** Orienta la actualización de criterios de diseño y periodos de retorno, adaptando presas, canales y sistemas urbanos a escenarios más extremos.
4. **Decisiones basadas en evidencia:** Mejora la priorización de inversiones y medidas preventivas, apoyándose en modelización hidrológica y monitoreo continuo.
5. **Enfoque integrado y participativo:** Fortalece la coordinación multisectorial, incorpora soluciones basadas en la naturaleza y promueve la participación comunitaria en la gestión del riesgo

Contenidos que deben incluirse en un plan hidrológico

El plan hidrológico debe reflejar **la evaluación y gestión de fenómenos extremos**, incluyendo sequías prolongadas, inundaciones súbitas y otros eventos hidrometeorológicos críticos. Este apartado debe presentar la caracterización de riesgos, la identificación de vulnerabilidades, la priorización de medidas de adaptación y los sistemas de alerta temprana asociados.

La integración de esta información es esencial para fortalecer la **seguridad hídrica**, proteger los ecosistemas, orientar la planificación de infraestructuras y reducir los impactos sociales y económicos de los eventos extremos.

El plan hidrológico debería considerar, idealmente, los siguientes aspectos:

1. **Inventario y caracterización de fenómenos extremos históricos**
2. **Evaluación de riesgos, vulnerabilidad y resiliencia**
3. **Modelización y proyecciones de cambio climático**
4. **Medidas de adaptación y mitigación**
5. **Sistemas de alerta temprana y respuesta**
6. **Seguimiento, indicadores y revisión adaptativa**

Inventario y caracterización de fenómenos extremos históricos

La gestión integrada de los recursos hídricos requiere de información precisa, continua y confiable sobre las distintas dimensiones del agua: su disponibilidad, calidad, uso y evolución en el tiempo. Para ello, el plan hidrológico debe apoyarse en un conjunto de **redes de monitoreo** que cubran diversos aspectos del ciclo hidrológico y las interacciones socioambientales asociadas.

La gestión eficaz de fenómenos extremos en el marco de la planificación hidrológica con enfoque **GIRH** requiere partir de un **conocimiento sólido del comportamiento histórico de la cuenca** frente a eventos como **sequías prolongadas, inundaciones súbitas, tormentas intensas, movilización de sedimentos, deslizamientos asociados y otros eventos hidrometeorológicos críticos**.

El **inventario de fenómenos extremos históricos** constituye la base para:

- Entender cómo ha respondido el sistema hídrico a situaciones de presión climática y ambiental.
- Reconocer los patrones temporales y espaciales de eventos que han generado impactos significativos en la disponibilidad, calidad y distribución del recurso hídrico.
- Diferenciar entre la **variabilidad climática natural** y las posibles tendencias de **intensificación asociadas al cambio climático**.

Este inventario integra información **hidrometeorológica, histórica, socioeconómica y ambiental**, lo que permite relacionar los eventos extremos no solo con su magnitud física, sino también con sus **efectos en los ecosistemas, la infraestructura y las comunidades**.

Asimismo, es un insumo útil para:

1. **Diagnosticar vulnerabilidades y riesgos hídricos actuales** en la cuenca.
2. **Sustentar modelos de simulación y escenarios futuros**, al proporcionar datos de calibración y validación.
3. **Diseñar medidas de adaptación y mitigación**, priorizando intervenciones donde el riesgo ha sido recurrente o severo.

El inventario de fenómenos extremos históricos tiene como finalidad **recopilar y organizar información detallada** sobre los eventos hidrometeorológicos que han afectado la cuenca, incluyendo sequías, inundaciones, tormentas intensas u otros sucesos relevantes. Este trabajo permite disponer de un registro sistemático que muestre **cuándo, dónde y con qué intensidad** ocurrieron los fenómenos, así como sus principales impactos sobre los recursos hídricos, la infraestructura y las actividades humanas.

Además, el análisis de esta información ayuda a **reconocer patrones de recurrencia y cambios en el comportamiento de los eventos extremos**, lo que facilita identificar si existen áreas de la cuenca que han sido afectadas de manera frecuente o que presentan condiciones de mayor exposición.

Este enfoque también permite **relacionar los fenómenos históricos con factores físicos y sociales**, como el uso del suelo, la distribución poblacional o la ubicación de infraestructuras sensibles.

Por último, los resultados de esta caracterización **pueden utilizarse para apoyar la planificación hidrológica y la gestión del riesgo**, ya que sirven como insumo para la modelización de escenarios futuros, la elaboración de mapas de vulnerabilidad y la priorización de medidas de prevención, mitigación o adaptación.

El inventario de fenómenos extremos históricos requiere combinar la recopilación sistemática de información con el análisis de sus características principales para obtener un panorama completo de los eventos ocurridos en la cuenca. Este trabajo se puede organizar en los siguientes componentes:

1. Recopilación y organización de la información histórica

El primer paso consiste en **reunir todas las fuentes disponibles** que permitan documentar los eventos extremos. Esto incluye:

- **Registros hidrometeorológicos oficiales**, como datos de precipitación, caudales máximos, niveles de ríos, niveles freáticos y temperaturas extremas.
- **Informes técnicos y estudios previos** elaborados por organismos de cuenca, universidades, institutos meteorológicos o agencias de protección civil.
- **Documentación histórica y comunitaria**, incluyendo registros periodísticos, crónicas locales, fotografías aéreas, informes de daños o relatos de las comunidades.
- **Fuentes complementarias** que amplían la cobertura espacial y temporal de la información, útiles en cuencas con escasos registros instrumentales.
 - **Datos satelitales**, como los proporcionados por **Copernicus, NASA o NOAA**, útiles para la identificación de inundaciones, sequías o cambios en la cobertura terrestre.
 - **Registros paleoclimáticos**, como análisis de sedimentos, anillos de crecimiento de árboles (dendrocronología) o indicadores glaciológicos, que permiten extender el conocimiento histórico en cuencas con escasos datos instrumentales.
 - **Recopilación participativa de información local y comunitaria**, mediante talleres, encuestas y mapeo colaborativo, para complementar los datos históricos y mejorar la comprensión de los impactos en zonas con baja densidad de observación.

Una vez reunida, la información debe **organizarse en una base de datos** que contenga la fecha del evento, su localización, duración, intensidad, magnitud de los impactos y fuentes de referencia.

2. Clasificación y caracterización de los eventos

Cada evento registrado debe ser **clasificado** para facilitar su análisis posterior. Algunas categorías habituales son:

- **Sequías**: meteorológicas, agrícolas e hidrológicas, indicando su duración, severidad y área afectada.
- **Inundaciones y avenidas**: crecidas súbitas, desbordamientos o anegamientos prolongados, registrando caudales máximos, niveles alcanzados y poblaciones afectadas.
- **Fenómenos asociados**: tormentas intensas, deslizamientos vinculados a lluvias extremas o ciclones tropicales.

Para cada tipo de evento se recomienda **describir sus características principales**, como intensidad, duración, recurrencia, estacionalidad y efectos sobre el sistema hídrico y el territorio.

3. Georreferenciación y elaboración cartográfica

La información recopilada debe **trasladarse a mapas de cuenca** para visualizar espacialmente:

- La localización de los eventos históricos y su distribución geográfica.
- Las zonas críticas con afectaciones recurrentes.
- Infraestructuras, asentamientos o ecosistemas que han estado expuestos.

Estos mapas pueden complementarse con capas de uso del suelo, topografía, hidrografía y población, para **relacionar los fenómenos extremos con los factores físicos y sociales** de la cuenca.

4. Análisis de recurrencia y tendencias históricas

El análisis de la información permite **evaluar la frecuencia y posible evolución** de los fenómenos extremos. Este proceso suele incluir:

- Cálculo de **periodos de retorno** y frecuencia de eventos relevantes.
- Identificación de **tendencias o cambios** en la magnitud o estacionalidad de los eventos.
- Comparación con series climáticas regionales y proyecciones de cambio de uso del suelo.

Estos resultados son útiles para **alimentar modelos hidrológicos y escenarios de riesgo**, así como para apoyar la planificación de medidas de gestión y adaptación.

En resumen, se debe aspirar a que con la realización de un inventario y caracterización de fenómenos extremos se genere:

- **Base de datos consolidada**, con la descripción de cada evento extremo registrado.
- **Mapas temáticos de fenómenos extremos**, con localización, intensidad y recurrencia.
- **Informe analítico** que resuma los patrones identificados y que pueda integrarse como insumo para la evaluación de vulnerabilidad, modelización y priorización de medidas.

Evaluación de riesgos, vulnerabilidad y resiliencia

La **evaluación de riesgos, vulnerabilidad y resiliencia** permite analizar de manera integrada cómo los fenómenos extremos pueden afectar a los sistemas hídricos y a los elementos dependientes de ellos. Este análisis considera tanto los factores **físicos e hidrológicos**, como los **sociales, económicos, ambientales e institucionales** que influyen en la capacidad de un territorio para enfrentar y recuperarse de eventos adversos.

Los riesgos hídricos se generan cuando existe la combinación de una amenaza (como sequías, inundaciones u otros fenómenos extremos) con elementos expuestos que pueden resultar afectados. Por ello, la evaluación no solo se centra en la probabilidad de ocurrencia de los eventos, sino también en su **impacto potencial sobre la población, la infraestructura, las actividades productivas y los ecosistemas**.

La **vulnerabilidad** describe el grado en que estos elementos pueden verse afectados, considerando factores como su ubicación, sensibilidad, nivel de protección y dependencia del recurso hídrico. En paralelo, la **resiliencia** se refiere a la capacidad de los sistemas naturales y sociales para **responder, adaptarse y recuperarse** después de un evento extremo, lo que puede estar influido por la existencia de planes de emergencia, infraestructuras adecuadas y prácticas de gestión sostenible.

Este tipo de evaluación **ayuda a identificar áreas prioritarias de intervención**, facilita la integración de medidas preventivas y adaptativas en la planificación hidrológica y **puede servir como base** para el diseño de programas de reducción de riesgos y fortalecimiento de la resiliencia en las cuencas hidrográficas.

La evaluación de riesgos, vulnerabilidad y resiliencia dentro de un plan hidrológico debe contemplar un conjunto de análisis que permita comprender de manera integral cómo los fenómenos extremos afectan a la cuenca. Estos contenidos se pueden organizar en varios bloques temáticos complementarios, que facilitan una visión completa de la amenaza, la exposición y la capacidad de respuesta del territorio.

1. Identificación y caracterización de riesgos hídricos

El primer paso consiste en definir claramente cuáles son los fenómenos extremos entendidos como amenazas o peligros que pueden afectar la cuenca, considerando tanto los eventos históricos como los posibles escenarios futuros asociados al cambio climático. La caracterización del riesgo incluye el análisis de la probabilidad de ocurrencia, la magnitud de los impactos y la identificación de los elementos expuestos. Para ello, se recomienda:

- Elaborar un listado de amenazas relevantes (por ejemplo, sequías, avenidas e inundaciones, tormentas intensas, deslizamientos asociados a lluvias extremas) con una descripción de su comportamiento histórico y su posible evolución futura.
- Determinar la probabilidad de ocurrencia de los eventos, utilizando información proveniente de series hidrometeorológicas, modelos de simulación hidrológica o estudios climáticos.

- Identificar los elementos expuestos que podrían verse afectados, como poblaciones, infraestructuras hidráulicas, carreteras, redes de agua y saneamiento, áreas productivas, servicios ecosistémicos y hábitats sensibles.

El resultado de este primer análisis ofrece una imagen inicial de las amenazas más significativas de la cuenca y de las áreas que requieren mayor atención en la planificación.

2. Análisis de vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad permite evaluar en qué medida los elementos expuestos son susceptibles de sufrir impactos ante un evento extremo (amenaza o peligro). Esta evaluación debe integrar tanto variables físicas como socioeconómicas y ambientales. Entre los aspectos principales a considerar se encuentran:

- **Exposición física:** ubicación de poblaciones, infraestructuras críticas y áreas productivas en zonas de riesgo como llanuras de inundación, márgenes de ríos o sectores con suelos poco estables.
- **Sensibilidad social y económica:** nivel de dependencia de los recursos hídricos, grado de afectación que podrían sufrir las actividades económicas locales y servicios básicos ante una sequía o una inundación.
- **Condiciones ambientales y territoriales:** presencia de deforestación, cambios en el uso del suelo, degradación de humedales o pérdida de cobertura vegetal que puedan agravar la vulnerabilidad.
- **Factores institucionales:** existencia de planes de manejo, capacidades de respuesta de las autoridades y disponibilidad de información o alertas tempranas.

Este análisis permite clasificar sectores o localidades en distintos niveles de vulnerabilidad, lo que facilita la priorización de medidas preventivas y correctivas.

3. Evaluación de la resiliencia

La resiliencia se refiere a la capacidad del sistema hídrico, sus ecosistemas y las comunidades asociadas para enfrentar, adaptarse y recuperarse después de un fenómeno extremo. La evaluación de la resiliencia puede incluir:

- **Capacidad de anticipación y respuesta:** existencia de sistemas de alerta temprana, protocolos de actuación y coordinación interinstitucional ante sequías o inundaciones.
- **Infraestructura adaptativa:** disponibilidad de obras hidráulicas, almacenamiento de agua, drenajes urbanos o medidas de protección que faciliten la reducción de daños y la recuperación del sistema.
- **Rol de los ecosistemas:** presencia y estado de conservación de humedales, bosques ribereños o suelos con alta capacidad de infiltración que contribuyan a amortiguar los impactos.
- **Participación comunitaria y gobernanza:** nivel de organización social, conocimiento local sobre riesgos hídricos y articulación con las instituciones para implementar medidas de adaptación y recuperación.

Una vez evaluada la resiliencia, se puede elaborar un panorama de fortalezas y limitaciones del territorio para afrontar fenómenos extremos y definir estrategias de mejora.

Metodología para la evaluación de riesgos, vulnerabilidad y resiliencia

La metodología utilizada para evaluar riesgos, vulnerabilidad y resiliencia en el contexto de los planes hidrológicos se basa en los **marcos conceptuales desarrollados por el IPCC, la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y las Directrices Europeas de Gestión del Riesgo de Inundación (Directiva 2007/60/CE).**

Estos enfoques parten del principio de que **el riesgo surge de la interacción entre la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad**, incorporando también la capacidad de **resiliencia** de los sistemas naturales y sociales. Según este marco:

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Exposición} \times \text{Vulnerabilidad} - \text{Resiliencia}$$

- **Amenaza** es la probabilidad de que ocurra un fenómeno extremo, como una sequía, inundación o tormenta intensa.

Capítulo 3.6.

Fenómenos extremos y cambio climático

- **Exposición** se refiere a los elementos que pueden verse afectados, incluyendo poblaciones, infraestructura, ecosistemas y actividades económicas.
- **Vulnerabilidad** describe el grado de susceptibilidad de estos elementos frente a los impactos, dependiendo de factores físicos, sociales, ambientales e institucionales.
- **Resiliencia** indica la capacidad de los sistemas para anticipar, resistir y recuperarse después de un evento extremo.

La combinación de estos factores permite identificar y cuantificar los **riesgos hidrológicos**, generando productos como mapas de riesgo, índices de vulnerabilidad y análisis de resiliencia, que son útiles para apoyar la planificación de medidas estructurales y no estructurales dentro del plan hidrológico.

Esta metodología sigue un proceso estructurado de cinco fases: **definición del alcance, análisis de amenazas, evaluación de vulnerabilidad, análisis de resiliencia e integración de resultados**, respaldado por guías internacionales y aplicado en múltiples experiencias de gestión integrada de recursos hídricos.

La metodología empleada para la evaluación de riesgos, vulnerabilidad y resiliencia en el plan hidrológico se basa en marcos conceptuales y guías reconocidas internacionalmente. Las referencias incluidas en la siguiente tabla (**Guías metodológicas**) permiten vincular cada fase de la metodología con su fundamento científico o normativo, asegurando la coherencia con estándares aplicados en la gestión integrada de los recursos hídricos, la reducción del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático.

Etapas metodológicas	Descripción	Referencias científicas y normativas
1. Definición del alcance y recopilación de información	Determinación de la unidad de análisis (cuenca o subcuenca), periodo de estudio y fuentes de datos históricas, climáticas, socioeconómicas y ambientales.	• UNDRR, <i>National Disaster Risk Assessment Guidelines</i> (2017) • WMO, <i>Manual on Flood and Drought Management</i> (2019) • IPCC AR6, <i>Risk Framework</i> (2022)
2. Análisis de amenazas y probabilidad de ocurrencia	Identificación y caracterización de los fenómenos extremos (sequías, inundaciones, tormentas), análisis estadístico e hidrológico de frecuencia e intensidad, y elaboración de mapas de amenaza.	• IPCC, <i>Fifth/Sixth Assessment Report</i> – Riesgo = Amenaza × Vulnerabilidad × Exposición • EU Directive 2007/60/EC (Floods Directive)
3. Evaluación de exposición y vulnerabilidad	Localización de poblaciones, infraestructuras y ecosistemas expuestos, análisis de sensibilidad social y económica, e identificación de factores ambientales y territoriales que aumentan la vulnerabilidad.	• UNDRR, <i>Words into Action Guidelines</i> (2017) • IPCC AR6, WGII, Cap. 16 – <i>Risk and Vulnerability Assessment</i>
4. Evaluación de resiliencia	Análisis de la capacidad de los sistemas hídricos, ecosistemas y comunidades para anticipar, resistir y recuperarse de los eventos extremos. Incluye infraestructura, gobernanza y medidas de adaptación.	• WMO & GWP, <i>Integrated Flood Management Guidelines</i> (2017) • IPCC AR6 – Concepto de resiliencia en riesgos climáticos • UNISDR (2015) Marco de Sendai 2015–2030, Prioridad 3 (Reducción de vulnerabilidades)

5. Integración de resultados y generación de productos	Elaboración de mapas de riesgo, índices de vulnerabilidad, matrices de riesgo y síntesis narrativa que apoyen la planificación hidrológica y la priorización de medidas.	• EU Directive 2007/60/EC – Mapas de peligrosidad y riesgo • UNDRR, <i>Disaster Risk Reduction Guidelines</i> (2019)
---	--	---

Definición del alcance y recopilación de información

En esta fase se establecen los límites espaciales y temporales del análisis, así como las fuentes de información que se utilizarán. Se recomienda:

- Definir la **unidad de análisis**, que puede ser la cuenca hidrográfica completa o subdivisiones en subcuencas y zonas de gestión.
- Determinar el **periodo de referencia** para la evaluación, considerando datos históricos y la información más reciente disponible.
- Recopilar la **información necesaria**, incluyendo:
 - Series históricas hidrometeorológicas (precipitación, caudales, niveles freáticos, temperatura).
 - Registros de eventos extremos anteriores y sus impactos.
 - Datos de uso del suelo, cobertura vegetal, población, infraestructura y actividades productivas.
 - Estudios climáticos y proyecciones de cambio climático a nivel local o regional.

Análisis de amenazas y probabilidad de ocurrencia

El análisis de amenazas consiste en caracterizar los fenómenos extremos que pueden afectar a la cuenca y estimar su probabilidad de ocurrencia, lo que permite determinar el nivel de riesgo asociado a cada evento.

Esta fase incluye:

- **Identificación de los fenómenos extremos relevantes**, como sequías, avenidas, inundaciones, tormentas intensas o deslizamientos asociados a lluvias extremas.
- **Análisis de frecuencia y magnitud** de los eventos a partir de **series históricas** de datos hidrometeorológicos confiables, que permitan evaluar su comportamiento pasado y las zonas afectadas.
- **Uso de proyecciones climáticas regionalizados** para explorar posibles cambios en la ocurrencia de los fenómenos extremos bajo condiciones futuras de variabilidad y cambio climático, integrando las proyecciones RCP o SSP, según disponibilidad.
- **Estimación de periodos de retorno y probabilidades de ocurrencia**, combinando información histórica con resultados de modelización hidrológica e hidráulica, para clasificar los eventos en rangos de riesgo (bajo, medio, alto).
- **Representación espacial mediante mapas de amenaza**, que muestren las áreas más propensas a cada tipo de evento, incorporando tanto el comportamiento histórico como las proyecciones climáticas para identificar zonas de riesgo emergente.

Evaluación de exposición y vulnerabilidad

Una vez caracterizadas las amenazas, se procede a **identificar los elementos expuestos y analizar su vulnerabilidad**, considerando tanto factores físicos como sociales, económicos, ecológicos y de gobernanza. Esta evaluación permite comprender en qué medida los impactos potenciales pueden afectar a la población, la infraestructura y los ecosistemas. Pasos de la evaluación:

1. Identificación de elementos expuestos

- Localización en cartografía y Sistemas de Información Geográfica (SIG) de **poblaciones, infraestructuras, ecosistemas y áreas productivas** que puedan verse afectadas.
- Inclusión de **asentamientos informales en zonas de riesgo**, que suelen presentar alta vulnerabilidad por falta de planificación y servicios básicos.

2. Evaluación de vulnerabilidad

- Análisis de **condiciones físicas**: ocupación de áreas inundables, deforestación, degradación de suelos y presión sobre recursos hídricos.

- Consideración de **variables sociales y económicas**: densidad poblacional, pobreza, dependencia de actividades productivas vulnerables y acceso a servicios esenciales.
 - Integración de **variables ecológicas**: estado de conservación de humedales, bosques riparios y cobertura vegetal que puedan atenuar impactos.
 - Evaluación de **factores de gobernanza**: existencia de planes de ordenamiento territorial, capacidad institucional y mecanismos de respuesta ante emergencias.
 - Destacar los **cambios en el uso del suelo y la expansión urbana no planificada**, que incrementan la exposición y reducen la capacidad de absorción de impactos.
3. **Síntesis y representación**
- Elaboración de **índices de vulnerabilidad** que combinen exposición, sensibilidad y capacidad de respuesta, clasificando las zonas en baja, media o alta vulnerabilidad.
 - Generación de **mapas temáticos** que integren variables físicas, sociales, económicas y ambientales para identificar áreas críticas y priorizar medidas de gestión.

Evaluación de la resiliencia

La resiliencia se entiende como la **capacidad dinámica de los sistemas naturales y sociales para anticipar, resistir, adaptarse y recuperarse** de un evento extremo, y no como un atributo estático. Esta capacidad puede **fortalecerse progresivamente** a través de medidas que integren infraestructura, planificación, ecosistemas y gobernanza. La evaluación de la resiliencia se realiza considerando:

1. **Infraestructura y medidas adaptativas**
 - a. Revisión de la infraestructura hidráulica y de protección existente, como presas, embalses, sistemas de drenaje, defensas contra inundaciones o instalaciones de almacenamiento temporal.
 - b. Identificación de mejoras que permitan aumentar su flexibilidad y capacidad de respuesta ante eventos extremos.
2. **Soluciones basadas en la naturaleza**
 - a. Valoración del papel de humedales, bosques riparios, suelos con buena capacidad de infiltración y otras medidas naturales que ayudan a amortiguar impactos.
 - b. Promoción de proyectos de restauración ecológica que fortalezcan la resiliencia a largo plazo.
3. **Planes locales de emergencia y capacidades institucionales**
 - a. Identificación de planes y protocolos de respuesta ante sequías e inundaciones, sistemas de alerta temprana y mecanismos de evacuación.
 - b. Evaluación de la **coordinación interinstitucional** y de la preparación operativa para responder de forma rápida y eficaz.
4. **Gobernanza inclusiva y participación comunitaria**
 - a. Análisis de la organización social y la implicación de las comunidades en la gestión del riesgo.
 - b. Promoción de una gobernanza que integre distintos actores, fomente la transparencia y garantice el acceso a la información.
 - c. Inclusión de la población en procesos de planificación, simulacros y diseño de medidas de adaptación.

Integración de resultados y elaboración de productos

La fase final consiste en **integrar los análisis de amenaza, exposición, vulnerabilidad y resiliencia** para generar un panorama completo de los riesgos hídricos de la cuenca. Esta integración permite traducir la información en productos útiles para la planificación hidrológica y la gestión de fenómenos extremos.

Productos recomendados:

1. **Mapas de riesgo**
 - Combinan la **probabilidad de los eventos extremos** con la **vulnerabilidad y exposición** de los elementos en la cuenca.
 - Permiten identificar **zonas críticas** y priorizar intervenciones.
2. **Índices y matrices de riesgo**

- Cruzan la **intensidad y probabilidad** de los fenómenos con los niveles de **vulnerabilidad y resiliencia**.
 - Pueden incluir indicadores sugeridos por el Grupo de Trabajo, como:
 - **Índice de resiliencia hídrica**, que refleja la capacidad de la cuenca y de sus sistemas para recuperarse tras un evento extremo.
 - **Índice de vulnerabilidad multisectorial**, que integra factores físicos, sociales, económicos, ecológicos y de gobernanza.
 - **Índice de riesgo compuesto**, útil para priorizar zonas y medidas en la planificación.
3. **Síntesis narrativa y gráfica**
- Describe los **riesgos identificados**, los sectores más expuestos y las **capacidades de respuesta actuales**.
 - Sirve de base para definir **medidas estructurales, no estructurales y basadas en la naturaleza**.
 - Puede integrarse en tableros o informes interactivos que faciliten la comprensión y el uso de la información por parte de los responsables de la gestión.

Consideraciones para su aplicación en sequías

La evaluación del riesgo por sequías en la cuenca debe identificar cómo, por esa amenaza, se afectan la disponibilidad de agua, los ecosistemas y las actividades socioeconómicas. Para ello, se recomienda aplicar la metodología general basada en análisis de amenazas, exposición, vulnerabilidad y resiliencia, adaptada a este fenómeno.

1. Análisis de la amenaza

- Identificar la frecuencia e intensidad de **sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas**.
- Analizar series históricas de precipitación, caudales y almacenamiento en embalses para determinar tendencias, y utilizar indicadores que, a partir de datos hidrológicos o meteorológicos, permitan establecer diagnósticos objetivos de la situación.
- Incorporar proyecciones climáticas para evaluar posibles cambios en la ocurrencia de sequías.

2. Exposición

- Localizar en la cuenca **poblaciones, actividades agrícolas, industrias y ecosistemas** que dependen de la disponibilidad de agua.
- Identificar **fuentes de agua vulnerables**, como ríos de caudal reducido, acuíferos sobreexplotados o embalses con baja capacidad de regulación.

3. Vulnerabilidad

- Evaluar la sensibilidad de los sistemas productivos y ecosistemas ante la disminución del recurso hídrico.
- Considerar factores como monocultivos de alta demanda, infraestructuras insuficientes de almacenamiento o ausencia de planes de ahorro.
- La información obtenida con los balances entre disponibilidad y demanda puede ayudar en la identificación de las zonas más vulnerables.

4. Resiliencia

- Analizar la capacidad de respuesta de la cuenca frente a sequías prolongadas:
 - Existencia de reservas estratégicas y embalses multipropósito.
 - Planes Especiales de Sequía y mecanismos de gestión de la demanda.
 - Participación social en la gestión del recurso durante emergencias.

5. Evaluación del riesgo final

Integrar amenaza, exposición, vulnerabilidad y resiliencia para **priorizar las zonas más críticas**, generar mapas de riesgo y apoyar la definición de medidas de adaptación.

Consideraciones para su aplicación en inundaciones

El análisis del riesgo por inundaciones debe considerar tanto **crecidas fluviales y avenidas** como **anegamientos urbanos y rurales**, que pueden generar daños a la infraestructura, la población y los ecosistemas.

1. Análisis de la amenaza

- Identificar las áreas de la cuenca históricamente afectadas por inundaciones y la frecuencia de eventos.

- Evaluar caudales máximos, periodos de retorno y efectos de tormentas extremas.
- Incorporar modelaciones hidráulicas y escenarios de cambio climático para proyectar eventos futuros.
- 2. Exposición**
 - Determinar **poblaciones, infraestructuras críticas, áreas agrícolas y ecosistemas** ubicados en zonas inundables.
 - Utilizar cartografía de riesgo y delimitación de llanuras de inundación para localizar los elementos expuestos.
- 3. Vulnerabilidad**
 - Analizar la capacidad de las infraestructuras y del territorio para resistir inundaciones:
 - Presencia y mantenimiento de diques, defensas o sistemas de drenaje.
 - Ocupación de áreas de riesgo por asentamientos informales o cultivos.
 - Falta de sistemas de evacuación o de protección ambiental en zonas ribereñas.
- 4. Resiliencia**
 - Evaluar la capacidad de anticipación y respuesta de la cuenca:
 - Sistemas de alerta temprana y protocolos de actuación.
 - Planes de gestión de avenidas y de gestión de los riesgos de inundación, y coordinación interinstitucional.
 - Capacidad comunitaria para organizar evacuaciones y recuperación post-evento.
- 5. Evaluación del riesgo final**
 - Combinar los resultados de amenaza, exposición, vulnerabilidad y resiliencia para **generar mapas de riesgo de inundación**.
 - Identificar **zonas prioritarias para medidas estructurales y no estructurales**, incluyendo restauración de ecosistemas, sistemas de drenaje y planificación territorial adaptativa.

Modelización y proyecciones de cambio climático

La modelización hidrológica aplicada a la gestión de fenómenos extremos en el plan hidrológico puede **aprovechar los modelos y evaluaciones ya desarrollados en otros apartados**, como el **Inventario de Recursos Hídricos** y el **Análisis de proyecciones climáticas (Consideración del Cambio Climático)**.

Estos modelos constituyen una base técnica que puede **adaptarse para evaluar el impacto de fenómenos extremos**, ya que ofrecen información sobre el comportamiento de caudales, balances hídricos, almacenamiento en embalses y recarga de acuíferos bajo distintas condiciones hidrológicas y climáticas.

En este contexto, la finalidad de este apartado es:

- **Integrar la modelización hidrológica existente** con el análisis de fenómenos extremos, maximizando la utilidad de los modelos ya empleados en otros capítulos del plan.
- **Aprovechar las proyecciones de cambio climático desarrolladas en el capítulo específico**, incorporándolos de manera aplicada al estudio de riesgos hidrológicos.
- **Evaluar cómo las sequías, inundaciones y otros eventos extremos podrían cambiar** bajo condiciones climáticas futuras, sin duplicar análisis ya realizados en otras secciones.
- **Proporcionar información específica para la gestión de riesgos** mediante mapas de riesgo prospectivos, series de caudales extremos y evaluaciones de impactos sobre infraestructura y ecosistemas.

Elementos y lineamientos técnicos

- 1. Integración de proyecciones climáticas, modelos de uso de suelo y dinámicas territoriales**
 - a. Vincular las proyecciones regionalizadas de precipitación, temperatura y evapotranspiración (SSP-RCP) con los modelos hidrológicos de la cuenca. (**Consideración del Cambio Climático**)
 - b. Incorporar los cambios previstos en el uso del suelo y la ocupación del territorio, incluyendo expansión urbana, deforestación o restauración de ecosistemas.
 - c. Analizar cómo estas dinámicas afectan la **frecuencia, intensidad y distribución espacial** de sequías e inundaciones.

2. **Uso de múltiples proyecciones y rangos de incertidumbre (Consideración del Cambio Climático)**
 - a. Emplear **diversos modelos climáticos regionales y globales** (CMIP6/CORDEX) para representar un rango de posibles condiciones futuras.
 - b. Explorar varios **horizontes temporales** (2030, 2050, 2100) y distintas trayectorias socioeconómicas (SSP1, SSP2, SSP5), para reflejar la incertidumbre asociada a la evolución de emisiones y del clima.
 - c. Generar **bandas de incertidumbre** en los resultados para facilitar la planificación robusta y adaptativa.
3. **Colaboración con universidades y centros científicos**
 - a. Establecer vínculos con instituciones especializadas para la **validación y mejora de modelos**.
 - b. Favorecer el acceso a bases de datos climáticas y herramientas de regionalización y downscaling.
 - c. Desarrollar capacidades locales para la actualización periódica de las proyecciones hidrológicas y climáticas.

Análisis de interacción con fenómenos extremos

A pesar de la incertidumbre que todo ello lleva asociada, el análisis de la interacción entre **proyecciones climáticas** y **modelos hidrológicos** permite anticipar cómo podrían evolucionar los fenómenos extremos en la cuenca, considerando tanto la variabilidad natural como el cambio climático y los cambios en el uso del suelo.

Este análisis tiene como objetivo **evaluar los impactos potenciales de sequías, inundaciones y otros eventos hidrometeorológicos** sobre los recursos hídricos, la infraestructura y los ecosistemas, y traducirlos en información útil para la planificación.

1. Proyecciones aplicadas a modelos hidrológicos

- Incorporación de las **proyecciones climáticas regionalizadas** (precipitación, temperatura, evapotranspiración) en los modelos hidrológicos calibrados de la cuenca.
- Simulación de **caudales máximos y mínimos** para distintos horizontes temporales (2030, 2050, 2100), considerando escenarios múltiples (SSP-RCP).
- Evaluación de **balances hídricos, recarga de acuíferos y niveles de embalses** bajo condiciones futuras.

2. Identificación de cambios en fenómenos extremos

- **Sequías:**
 - Proyección de cambios en la frecuencia, duración e intensidad de sequías meteorológicas e hidrológicas.
 - Evaluación del impacto sobre la disponibilidad de agua superficial y subterránea, así como sobre el almacenamiento en embalses.
- **Inundaciones y avenidas:**
 - Simulación de la evolución de caudales máximos y periodos de retorno ante precipitaciones extremas proyectadas.
 - Análisis de posibles **zonas de riesgo emergente** por incremento de avenidas o expansión urbana en áreas inundables.
- **Eventos combinados:**
 - Estudio de fenómenos extremos simultáneos o secuenciales, como lluvias intensas tras sequías prolongadas, que pueden aumentar la erosión y el riesgo de deslizamientos.

3. Integración con cambios territoriales

De acuerdo con las previsiones sobre evolución de las demandas y las presiones, establecidas en el propio plan hidrológico, se puede afrontar:

- Evaluación de cómo los **cambios de uso del suelo**, deforestación, urbanización o restauración ecológica pueden amplificar o reducir los efectos de los fenómenos extremos.
- Generación de escenarios integrados que combinen proyecciones climáticas, hidrología y dinámica territorial para identificar **hotspots de riesgo**.

4. Productos esperados

- **Mapas de riesgo prospectivo** de sequías e inundaciones, considerando múltiples proyecciones climáticas.

- **Series temporales de caudales extremos** y periodos de retorno actualizados para infraestructuras críticas.
- **Informes analíticos** que relacionen los cambios en el clima, el uso del suelo y la hidrología con la exposición y vulnerabilidad de la cuenca.

Medidas de adaptación y mitigación

La identificación de medidas de adaptación y mitigación tiene como finalidad **reducir la vulnerabilidad y el riesgo asociado a fenómenos extremos** en la cuenca, así como **fortalecer la resiliencia de los sistemas hídricos, sociales y ambientales**. Estas medidas se basan en los resultados de la evaluación de riesgos, vulnerabilidad y resiliencia, y se priorizan según su viabilidad técnica, eficacia y alineación con los objetivos del plan hidrológico. El necesario encaje de este tipo de medidas en el seno del programa general de medidas que acompaña al plan hidrológico debe tenerse presente desde las primeras fases del trabajo.

Las acciones propuestas se deberían estructurar en torno a **medidas estructurales y no estructurales**, incluyendo soluciones basadas en la naturaleza, para abordar tanto la **prevención y mitigación de impactos** como la **adaptación ante escenarios futuros de cambio climático**.

1. Medidas estructurales

- Obras y actuaciones físicas que buscan **reducir directamente los impactos de fenómenos extremos**, como:
 - Presas, embalses y sistemas de derivación para regulación de caudales y almacenamiento de agua en periodos de sequía.
 - Defensas ribereñas, diques y canales de alivio para mitigar el impacto de inundaciones.
 - Sistemas de drenaje urbano sostenible para disminuir la exposición de zonas urbanas a lluvias intensas.
- Evaluación de las necesidades de **mantenimiento y modernización** de la infraestructura existente para mejorar su desempeño ante eventos más intensos o frecuentes.

2. Medidas no estructurales

- Acciones de planificación, regulación y gestión que buscan **reducir el riesgo sin necesidad de obras físicas**, como:
 - Ordenamiento territorial que evite la ocupación de zonas inundables y fomenta usos del suelo compatibles con el riesgo.
 - Sistemas de alerta temprana para sequías e inundaciones, integrados con planes de actuación de protección civil.
 - Protocolos de manejo de embalses y de explotación de acuíferos para optimizar la respuesta ante sequías.
 - Planes de gestión de la demanda de agua y campañas de uso eficiente en contextos de riesgo de sequía.

La participación comunitaria en las medidas no estructurales

La participación activa de las comunidades es un **elemento clave para la efectividad de las medidas no estructurales**, ya que potencia la apropiación local, facilita la implementación de estrategias preventivas y fortalece la resiliencia social.

- **Importancia de la participación comunitaria:**
 - Genera apoyo y aceptación social de las medidas.
 - Permite aprovechar el conocimiento local y la cercanía al territorio.
 - Promueve el empoderamiento comunitario y el aumento de la resiliencia.
 - Facilita la creación de redes de colaboración y alianzas locales.
- **Estrategias para involucrar a la comunidad:**
 - Aportar conocimiento mediante educación, sensibilización, talleres y campañas.
 - Incluir a la comunidad en la toma de decisiones (reuniones, consultas, encuestas).
 - Fomentar la transparencia, la comunicación clara y el diálogo constante.
 - Impulsar el voluntariado y la participación activa, con roles definidos.
 - Definir colectivamente estrategias de actuación en situaciones de riesgo.
 - Establecer coordinación con organizaciones sociales e instituciones locales implicadas.

3. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN)

- Medidas que **aprovechan o restauran funciones naturales de los ecosistemas** para la reducción del riesgo, como:
 - Recuperación de llanuras de inundación para laminar avenidas.
 - Restauración de humedales, bosques riparios y suelos con alta capacidad de infiltración.
 - Reforestación y manejo de cuencas altas para reducir la erosión y mejorar la regulación hídrica natural.
- Integración de estas soluciones en planes de adaptación, ya que pueden ofrecer beneficios múltiples (protección frente a extremos, biodiversidad, calidad de agua).

4. Medidas de adaptación al cambio climático

- Incorporación de **proyecciones climáticas** para dimensionar las medidas a largo plazo, considerando la evolución de la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos.
- Flexibilización de normas y criterios de diseño de infraestructura, con **periodos de retorno actualizados**.
- Estrategias de diversificación de fuentes de agua, recarga artificial de acuíferos y gestión integrada para aumentar la resiliencia de la cuenca.

5. Priorización y planificación de medidas

- Evaluación de las medidas en términos de **eficacia, coste, co-beneficios ambientales y sociales**.
- Integración de las acciones en un **programa de medidas del plan hidrológico**, vinculando cada medida con el riesgo que mitiga.
- Coordinación con otros instrumentos como planes de sequías, planes de gestión del riesgo de inundación y programas de adaptación al cambio climático.

El siguiente cuadro muestra a modo de ejemplo, algunas medidas de adaptación y mitigación, organizadas por tipo de fenómeno extremo, diferenciando entre medidas estructurales, no estructurales y soluciones basadas en la naturaleza.

Tipo de fenómeno extremo	Medidas estructurales	Medidas no estructurales	Soluciones basadas en la naturaleza (SbN)
Sequías	- Presas y embalses para almacenamiento de agua - Sistemas de interconexión de fuentes y trasvases - Infraestructuras de recarga artificial de acuíferos	- Planes de gestión de sequías - Optimización de la explotación de acuíferos - Gestión de la demanda y campañas de ahorro	- Restauración de humedales para retención de agua - Reforestación en cabeceras para mejorar la infiltración
Inundaciones	- Diques y defensas ribereñas - Canales de desvío y laminación de avenidas - Sistemas de drenaje urbano sostenible	- Ordenamiento territorial evitando ocupación de llanuras de inundación - Sistemas de alerta temprana y planes de emergencia - Normas de construcción adaptadas a riesgo	- Recuperación de llanuras de inundación- Restauración de bosques riparios - Mejoras en la conectividad fluvial para disipar caudales

Capítulo 3.6.

Fenómenos extremos y cambio climático

Tormentas intensas y eventos combinados	- Mejora de desagües pluviales y alcantarillado - Tanques de tormenta y zonas de almacenamiento temporal - Refuerzo de infraestructuras críticas	- Protocolos de protección de infraestructuras - Planes de mantenimiento preventivo - Coordinación con sistemas meteorológicos y de alerta	- Gestión de suelos para aumentar la infiltración - Franjas vegetadas y barreras naturales - Protección de áreas costeras y estuarios vulnerables
--	--	--	---

En resumen, se debe aspirar a que con el desarrollo de las medidas de adaptación y mitigación se genere:

- Listado de **medidas estructurales, no estructurales y basadas en la naturaleza**, clasificadas según el tipo de riesgo y fenómeno extremo al que responden.
- **Mapa de medidas propuestas**, que muestre su ubicación y relación con las áreas de mayor vulnerabilidad.
- **Síntesis técnica de adaptación y mitigación**, que sirva de base para el programa de medidas del plan hidrológico.

Metodología de priorización de medidas de adaptación y mitigación

La priorización de medidas permite **seleccionar las acciones más eficaces y sostenibles** para reducir riesgos por fenómenos extremos, optimizando recursos y asegurando la coherencia con los objetivos del plan hidrológico. Esta metodología sigue un enfoque **sistemático, transparente y participativo**, compuesto por cuatro fases:

1. Identificación del riesgo y de las necesidades de intervención

- **Definir el tipo de fenómeno extremo** al que responde cada medida (sequía, inundación, eventos combinados).
- **Localizar las zonas de riesgo prioritarias**, basándose en el análisis de exposición, vulnerabilidad y resiliencia.
- **Relacionar medidas preliminares con los riesgos identificados**, incluyendo medidas estructurales, no estructurales y SbN.

Resultado esperado: Lista inicial de medidas asociadas a riesgos específicos de la cuenca.

2. Evaluación multicriterio de medidas

Cada medida se evalúa considerando criterios técnicos, ambientales, sociales y económicos:

- **Impacto y efectividad:** Capacidad de reducir riesgo y daños esperados.
- **Coste-efectividad:** Relación entre beneficio esperado y recursos requeridos.
- **Co-beneficios ambientales y sociales:** Beneficios adicionales como conservación de biodiversidad, mejora de calidad de agua o valor social para las comunidades.
- **Viabilidad técnica y operativa:** Disponibilidad de tecnología, facilidad de implementación y mantenimiento.
- **Compatibilidad con la planificación territorial y el cambio climático:** Alineación con políticas existentes y resiliencia futura.

Prioridad especial: Se recomienda dar **preferencia a Soluciones basadas en la Naturaleza** siempre que cumplan los criterios de efectividad, ya que proporcionan beneficios múltiples y mayor sostenibilidad a largo plazo.

Resultado esperado: Matriz multicriterio con puntuación y clasificación preliminar de medidas.

3. Validación participativa

- **Talleres y mesas técnicas** con autoridades, comunidades locales, gestores de cuenca y actores clave.

- Presentación de la matriz de priorización y ajustes según la experiencia y percepción local del riesgo.
- Inclusión de **conocimiento tradicional y comunitario**, útil para validar la factibilidad de medidas SbN y no estructurales.

Resultado esperado: Lista de medidas consensuada, ajustada a la realidad social, ambiental y económica de la cuenca.

4. Selección final y programación

- Seleccionar las **medidas priorizadas** para su incorporación al **programa de medidas del plan hidrológico**.
- Asignar e identificar **responsables, plazos y fuentes de financiación**, diferenciando medidas estructurales, no estructurales y SbN.
- Garantizar la **coherencia con otros planes especiales** (Planes de Sequías, Gestión del Riesgo de Inundación, Programas de Adaptación al Cambio Climático).

Resultado esperado: Programa de medidas priorizadas con justificación técnica y documentación de la metodología de priorización para asegurar transparencia y trazabilidad.

Sistemas de alerta temprana y respuesta

Los sistemas de alerta temprana y respuesta son componentes fundamentales para reducir los impactos de los fenómenos extremos, ya que permiten **detectar con antelación condiciones críticas y coordinar acciones preventivas**. Estos sistemas combinan monitoreo hidrometeorológico, modelización predictiva, protocolos de comunicación y planes de actuación, lo que los convierte en herramientas estratégicas para proteger tanto a la población como a la infraestructura y los ecosistemas.

El desarrollo de sistemas de alerta temprana requiere **un alto nivel de instrumentación y disponibilidad de datos confiables**, ya que su efectividad depende de la capacidad para medir y procesar información en tiempo real sobre lluvias, caudales, niveles de ríos y variables climáticas. A pesar de estas exigencias, avanzar hacia su implementación es una meta deseable, especialmente en **zonas con alta vulnerabilidad**, donde los impactos de sequías, inundaciones o tormentas pueden ser más severos.

Estos sistemas, además de mejorar la capacidad de anticipación, contribuyen a fortalecer la **resiliencia del territorio**, integrando la información técnica con la respuesta institucional y comunitaria, y asegurando que las decisiones se tomen de manera oportuna.

Lineamientos básicos para el diseño y fortalecimiento de un Sistema de Alerta Temprana (SAT)

El diseño de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) eficaz requiere abordar aspectos técnicos, organizativos y operativos que permitan **detectar, comunicar y actuar** ante fenómenos extremos de manera coordinada.

A continuación, se presentan lineamientos fundamentales:

1. Diagnóstico y planificación inicial

- Identificar los **riesgos prioritarios** de la cuenca (sequías, inundaciones, tormentas, deslizamientos asociados).
- Evaluar la **disponibilidad de datos y capacidades existentes**: redes de monitoreo, estaciones hidrometeorológicas, sensores remotos y sistemas de pronóstico.
- Determinar los **niveles de vulnerabilidad** de las poblaciones, infraestructura y ecosistemas para priorizar áreas críticas.
- Definir los **objetivos específicos del SAT**, vinculados a la protección de la vida, los bienes y el ambiente.

2. Infraestructura de monitoreo e instrumentación

- Instalar y/o fortalecer **redes hidrometeorológicas** (pluviómetros, estaciones hidrológicas, sensores de humedad y niveles).

- Asegurar **transmisión de datos en tiempo real**, con redundancia en comunicación para evitar interrupciones durante eventos extremos.
- Integrar **imágenes satelitales y radares meteorológicos** para mejorar la anticipación de lluvias intensas y tormentas.
- Establecer **sistemas de almacenamiento y gestión de datos** centralizados y compatibles con herramientas SIG.

3. Modelización y análisis predictivo

- Calibrar **modelos hidrológicos e hidráulicos** que permitan prever crecidas, avenidas e impactos de lluvias extremas (**herramientas**).
- Implementar **índices y umbrales de sequía e inundación**, definidos a partir de datos históricos y proyecciones.
- Desarrollar escenarios de **alerta anticipada** según distintos niveles de riesgo, con actualización continua de pronósticos.

4. Protocolos de alerta y comunicación

- Definir **niveles de alerta escalonados** (informativa, preventiva, de emergencia) basados en umbrales medibles.
- Establecer un **flujo de comunicación clamediro y jerarquizado**, desde el sistema de monitoreo hasta las autoridades y la población.
- Utilizar **múltiples canales de comunicación** (mensajes SMS, sirenas, radio, aplicaciones móviles, medios digitales) para garantizar alcance efectivo.
- Coordinar con **protección civil y comités de cuenca (Planes especiales)** para asegurar la reacción inmediata ante la activación de alertas.

5. Planes de respuesta y operatividad

- Integrar el SAT con los **Planes de Gestión de Sequías, Planes de Inundación y Protocolos de Protección Civil**.
- Definir **responsables, roles y tiempos de reacción** para cada nivel de alerta.
- Realizar **simulacros periódicos** para comprobar la efectividad de los protocolos y ajustar procedimientos.
- Establecer mecanismos para la **gestión de emergencias en infraestructuras críticas**, como presas, estaciones de bombeo y defensas ribereñas.

6. Mantenimiento, evaluación y mejora continua

- Implementar un **programa de mantenimiento preventivo** de estaciones, sensores y sistemas de comunicación.
- Evaluar periódicamente la **eficacia del sistema** mediante indicadores de desempeño, analizando tiempos de detección, aviso y reacción.
- Incorporar **lecciones aprendidas tras cada evento extremo** para actualizar protocolos, umbrales y herramientas tecnológicas.
- Promover la **formación y participación comunitaria** para aumentar la efectividad de la respuesta local.

Seguimiento, indicadores y revisión adaptativa

El seguimiento y la revisión adaptativa son componentes esenciales para garantizar que las medidas de gestión de fenómenos extremos sean **efectivas a lo largo del tiempo** y puedan ajustarse ante nuevos escenarios de riesgo.

Este apartado establece cómo los resultados obtenidos en el análisis de **riesgo, vulnerabilidad y resiliencia** podrían integrarse en el sistema de **seguimiento del plan hidrológico** mediante **indicadores periódicos**, permitiendo evaluar la eficacia de las medidas implementadas y la evolución de la seguridad hídrica.

1. Integración de resultados en el seguimiento del plan

- Incorporar los **resultados del análisis de riesgos y fenómenos extremos** dentro de los mecanismos de monitoreo del plan hidrológico.
- Actualizar periódicamente los indicadores que reflejen:
 - **Riesgo**: evolución de áreas críticas, frecuencia e intensidad de eventos extremos.

- **Vulnerabilidad:** cambios en la exposición física, social y ambiental, así como en la sensibilidad de las actividades productivas.
- **Resiliencia:** capacidad de respuesta de infraestructuras, ecosistemas y comunidades.
- Vincular el seguimiento con la **información de redes de monitoreo, datos satelitales y reportes locales**, para mantener una línea base actualizada.

2. Indicadores recomendados

Con carácter ilustrativo, se sugieren los siguientes indicadores:

- **Indicadores de riesgo:**
 - Número y extensión de zonas bajo amenaza recurrente.
 - Frecuencia de activación de sistemas de alerta temprana.
- **Indicadores de vulnerabilidad:**
 - Población o infraestructuras críticas en zonas de riesgo.
 - Porcentaje de superficie degradada o deforestada en áreas sensibles.
- **Indicadores de resiliencia:**
 - Capacidad de almacenamiento de embalses y nivel de redundancia en el suministro de agua.
 - Cobertura de ecosistemas protectores (humedales, bosques riparios).
 - Número de planes locales de emergencia actualizados.

3. Revisión adaptativa

- Establecer un **ciclo de revisión periódica** (por ejemplo, cada 6 o 10 años, coincidiendo con la actualización del plan hidrológico).
- Evaluar la **eficacia de las medidas de adaptación y mitigación** implementadas y ajustar las estrategias cuando sea necesario.
- Incorporar nuevas **proyecciones climáticas, cambios de uso del suelo y lecciones aprendidas** tras la ocurrencia de eventos extremos.
- Fomentar la **participación de comunidades, autoridades y centros científicos**, asegurando que la revisión sea técnica, inclusiva y transparente.

Guías y referencias

GUIA 1: European Commission (2007). *Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council on the assessment and management of flood risks*. Official Journal of the European Union, L 288/27.

<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj/eng>

GUIA 2: IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf

GUIA 3: IPCC (2022). *Sixth Assessment Report (AR6), Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

GUIA 4: UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (2017). *National Disaster Risk Assessment: Governance System, Methodologies, and Use of Results*. Geneva, Switzerland.

https://www.unisdr.org/files/52828_nationaldisasterriskassessmentwiagu.pdf

GUIA 5: UNDRR (2019). *Words into Action Guidelines: National Disaster Risk Assessment*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva, Switzerland.

<https://www.undrr.org/publication/words-action-guidelines-national-disaster-risk-assessment>

GUIA 6: UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction) (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. Geneva, Switzerland.

<https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>

GUIA 7: WMO (World Meteorological Organization) (2019). *Hydrology and water resources manuals*.

<https://community.wmo.int/en/activity-areas/hydrology-and-water-resources/publications>

GUIA 8: WMO & GWP (Global Water Partnership) (2017). *Integrated Flood Management Guidelines*. Associated Programme on Flood Management (APFM), Geneva, Switzerland.

<https://wmo.int/activities/associated-programme-flood-management-apfm>

[3.6.2] Consideración cambio climático

Definición: Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el cambio climático se define como “un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”.

La consideración del cambio climático en la planificación hidrológica consiste en **integrar los posibles impactos de la deriva inducida por el cambio climático** en la gestión de los recursos hídricos. Esto incluye la evaluación de los cambios en las variables hidrometeorológicas y la frecuencia de fenómenos extremos (tratado en un capítulo independiente: (**Consideración de los fenómenos extremos**), hechos que pueden afectar a los ecosistemas y la disponibilidad, calidad y distribución del agua en el tiempo y en el espacio.

Objetivo: El objetivo principal de la incorporación del cambio climático en el plan hidrológico es **garantizar la seguridad hídrica y aumentar la resiliencia** de los sistemas hídricos, ecosistemas y comunidades frente a escenarios futuros. Específicamente, se busca:

1. **Identificar riesgos y tendencias** derivados del cambio climático en la cuenca.
2. **Anticipar impactos sobre la disponibilidad, calidad y demanda de los recursos hídricos.**
3. **Integrar medidas de adaptación** en la planificación hidrológica para prevenir, mitigar o reducir los efectos adversos.
4. **Promover la flexibilidad y la revisión adaptativa** del plan hidrológico, alineada con la mejor información científica disponible.

Utilidad: La inclusión del cambio climático en el proceso de planificación hidrológica es útil, porque:

- **Mejora la gestión del riesgo hídrico** al prever fenómenos extremos más frecuentes o intensos.
- **Facilita la planificación de infraestructuras resilientes** adaptadas a futuros escenarios de caudales y demandas.
- **Optimiza la priorización de medidas preventivas y de adaptación**, incluyendo Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN).
- **Asegura coherencia con compromisos internacionales** y políticas nacionales de cambio climático.
- **Fortalece la toma de decisiones basada en evidencia**, con respaldo en modelos hidrológicos y proyecciones climáticas.

Contenidos que deben incluirse en un plan hidrológico

El plan hidrológico debe **integrar la consideración del cambio climático** para anticipar sus efectos sobre la **disponibilidad, calidad y demanda del agua**, así como sobre los **balances hídricos y la protección de los ecosistemas acuáticos** a largo plazo.

Aunque esta consideración **no suele formar parte del cuerpo principal** del plan, es recomendable la elaboración de un **documento anexo específico**, que desarrolle (según los criterios establecidos en el apartado correspondiente del capítulo 2: **Consideración del cambio climático en la Planificación con visión de GIRH**) en detalle:

- Las **proyecciones climáticas regionalizadas** y sus implicaciones para la cuenca.
- La generación de **series ajustadas mediante coeficientes de afección**, para representar la posible reducción o aumento de aportaciones.
- La **evaluación de tendencias y vulnerabilidades** de los recursos hídricos, demandas y caudales ecológicos, más que la obtención de valores exactos.

Capítulo 3.6.

Fenómenos extremos y cambio climático

- Cómo estos cambios pueden afectar la **planificación de medidas** incorporadas en el plan hidrológico.

Este anexo permite contar con un **análisis técnico detallado y actualizado**, mientras que el plan hidrológico incorpora **síntesis y referencias cruzadas** para garantizar la coherencia general del documento.

Asimismo, este componente debe **coordinarse estrechamente con el capítulo de consideración los fenómenos extremos**, de modo que la información sobre **sequías, inundaciones y eventos combinados** se utilice como **insumo técnico, sin duplicar el contenido** ya desarrollado en dicho capítulo.

El plan hidrológico debería considerar, idealmente, los siguientes aspectos:

1. **Marco conceptual y normativo**
2. **Modelos y proyecciones climáticas**
3. **Evaluación de los efectos del cambio climático**

Marco conceptual y normativo

La integración del cambio climático en la planificación hidrológica requiere un **marco conceptual y normativo sólido**, que permita vincular la gestión de los recursos hídricos con los compromisos climáticos internacionales y las políticas nacionales y regionales de adaptación. En el contexto latinoamericano, este marco debe contemplar las particularidades de la región: alta diversidad climática, vulnerabilidad socioambiental, dependencia de recursos hídricos y desigual capacidad institucional.

Según la **Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)**, el cambio climático se define como:

“Un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.”

El **IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático)** amplía este concepto para incluir tanto los **factores naturales como antrópicos**, con el fin de **facilitar el análisis científico de los impactos** en los sistemas ambientales y socioeconómicos. Esta definición más amplia permite evaluar:

- Los **cambios naturales del sistema climático**, como los ciclos oceánicos o volcánicos.
- Los **efectos inducidos por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)** y los cambios de uso del suelo generados por la actividad humana.

En el ámbito de la **planificación hidrológica**, esta distinción es relevante porque permite identificar si los cambios observados en la hidrología de una cuenca responden a **variabilidad climática natural** o se suman a **tendencias asociadas al cambio climático antropogénico**.

En la Región, los recursos hídricos presentan una **alta sensibilidad a las variaciones climáticas**, debido a la diversidad geográfica y climática de la región, la concentración de poblaciones en áreas vulnerables y la dependencia de sectores productivos como agricultura, energía hidroeléctrica y abastecimiento urbano, directamente vinculados al uso del agua.

Otros conceptos importantes asociados al cambio climático son la **adaptación y resiliencia** que, en el contexto de la planificación hidrológica, se entienden como:

- **Adaptación** significa **ajustar la gestión del agua** para minimizar los impactos negativos del cambio climático y, cuando sea posible, aprovechar oportunidades como mejoras en almacenamiento, diversificación de fuentes o restauración de ecosistemas.
- **Resiliencia hídrica** se refiere a la **capacidad de las cuencas, ecosistemas y comunidades** para anticipar, resistir, adaptarse y recuperarse frente a impactos climáticos.

Marco normativo internacional y regional

La integración del cambio climático en la planificación hidrológica en la Región debe apoyarse en un marco normativo que combina **compromisos internacionales, estrategias nacionales y agendas regionales**, orientadas a fortalecer la adaptación y la resiliencia hídrica.

En el ámbito **internacional**, la **Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)** constituye la base del marco legal global. Esta convención reconoce que el cambio climático tiene efectos directos sobre los recursos hídricos y establece compromisos para la mitigación y, especialmente, para la **adaptación**. América Latina, como región altamente vulnerable, ha incorporado estos compromisos en sus políticas de agua, avanzando hacia una integración progresiva de la adaptación en la gestión de cuencas y planes hidrológicos.

El **Acuerdo de París (2015)** refuerza esta línea, colocando la **adaptación** al mismo nivel que la mitigación. Este acuerdo promueve la elaboración de **Planes Nacionales de Adaptación (NAPs)** y de **Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCs)**, que en muchos países latinoamericanos incluyen medidas explícitas para la gestión de sequías, inundaciones y disponibilidad hídrica. Su implementación implica que los planes hidrológicos deben alinearse con los compromisos climáticos de cada país, asegurando coherencia con las estrategias de adaptación.

En el ámbito **nacional**, la mayoría de los países de la región cuentan con **Planes Nacionales de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)**, que definen las prioridades de adaptación por sectores, incluyendo agua, agricultura, energía e infraestructura. La integración de los PNACC con los **planes hidrológicos** es esencial para garantizar que las decisiones sobre gestión del agua respondan a escenarios climáticos futuros y que las inversiones se orienten a medidas sostenibles y resilientes. Por ello, a la hora de trabajar en la planificación hidrológica de un determinado territorio será importante la toma en consideración de estos instrumentos nacionales para atender y alinearse con sus previsiones.

Finalmente, existe una **agenda regional y sectorial** que refuerza la cooperación técnica y la alineación de políticas. Organismos como la **CEPAL**, la **CAF** y el **Banco Interamericano de Desarrollo (BID)** impulsan programas de **resiliencia hídrica y climática** en cuencas estratégicas. Asimismo, redes como la **Red Latinoamericana de Agua y Saneamiento (RALAS)** y los programas de la **UNESCO en Hidrología (PHI-LAC)** apoyan el desarrollo de capacidades, el acceso a datos climáticos y el intercambio de experiencias para una gestión adaptativa del agua.

Este marco normativo permite que los planes hidrológicos se elaboren **alineados con los compromisos internacionales**, conectados con las políticas nacionales de adaptación y fortalecidos por la cooperación regional, facilitando así una **planificación hídrica proactiva y resiliente**.



Importante:

El marco conceptual y normativo permite **alinear el plan hidrológico con las políticas climáticas nacionales e internacionales**, garantizando que:

1. Las proyecciones climáticas se integren en la modelización hidrológica.
2. Las medidas de adaptación se incluyan en el **programa de medidas** del plan.
3. Se coordine con otros instrumentos, como los **planes de sequía** o los **planes de gestión de inundaciones**, para asegurar coherencia sin duplicaciones.

Modelos y proyecciones climáticas

La incorporación del cambio climático en la planificación hidrológica requiere contar con herramientas que permitan **anticipar la evolución de las condiciones climáticas y su efecto sobre los recursos hídricos, las demandas de agua y otros elementos del plan**. Los modelos climáticos y las proyecciones constituyen la **base técnica y científica** para transformar la información global sobre cambio climático en insumos prácticos para la gestión de cuencas y la definición de medidas de adaptación.

Estos modelos permiten **simular el comportamiento futuro del clima**, considerando interacciones complejas entre la atmósfera, los océanos, la criosfera y la superficie terrestre. Gracias a ellos, es posible proyectar **cambios en variables clave** como precipitación, temperatura, evapotranspiración y, en consecuencia, su influencia sobre la disponibilidad de agua, la recarga de acuíferos, los caudales de los ríos y la aparición de fenómenos hidrometeorológicos extremos.

En el contexto de América Latina, donde la **variabilidad climática natural** es elevada y la **vulnerabilidad hídrica** es significativa, el uso de proyecciones climáticas **regionalizadas** resulta fundamental. Estas proyecciones permiten capturar con mayor detalle las diferencias locales de

topografía, cobertura vegetal y usos del suelo, ofreciendo información relevante para los planes hidrológicos y para los documentos anexos dedicados específicamente a la evaluación del cambio climático.

Al integrar **modelos globales, regionales y escenarios socioeconómicos**, los planes hidrológicos pueden **anticipar riesgos, evaluar incertidumbres y planificar medidas de adaptación** con un enfoque proactivo y resiliente.

El uso combinado de **Modelos Climáticos Globales (GCMs)**, **Modelos Climáticos Regionales (RCMs)** y **escenarios de proyecciones climáticas (SSP-RCP)** permite construir una visión más completa del futuro climático y su posible impacto sobre los sistemas hídricos. Los GCMs proporcionan una visión general de las tendencias globales, los RCMs permiten capturar el detalle regional y local necesario para la gestión de cuencas, y los escenarios climáticos ofrecen distintos horizontes y trayectorias de emisiones que ayudan a manejar la incertidumbre. La integración de estos componentes en la planificación hidrológica asegura que los planes puedan **anticipar riesgos, evaluar su probabilidad y magnitud, y priorizar medidas de adaptación** basadas en la mejor evidencia científica disponible.

Modelos Climáticos Globales

Los **Modelos Climáticos Globales (Global Climate Models, GCMs)** son la principal herramienta científica para **simular el comportamiento del sistema climático de la Tierra** y proyectar su evolución futura ante diferentes escenarios de emisiones y cambios en la atmósfera. Estos modelos representan de manera numérica los procesos físicos y químicos que ocurren en la **atmósfera, los océanos, la criosfera, la biosfera y la superficie terrestre**, permitiendo evaluar cómo interactúan entre sí para determinar el clima global.

A continuación, se enumeran algunas de las principales características de los GCMs:

1. **Simulación física y numérica del sistema climático**
 - a. Los GCMs resuelven ecuaciones que describen el movimiento de la atmósfera, los intercambios de energía, el ciclo del agua, la circulación oceánica y los procesos de la superficie terrestre.
 - b. Incluyen componentes para representar la vegetación, el hielo, los suelos y la absorción de carbono, lo que permite analizar de forma integrada las interacciones del sistema climático.
2. **Resolución espacial y temporal**
 - a. Trabajan con una **mallla global** que divide la superficie de la Tierra en celdas (generalmente de 100 a 250 km por lado en CMIP6).
 - b. Simulan periodos pasados, presentes y futuros, generando series de datos de **décadas y hasta siglos**, útiles para análisis de tendencias a largo plazo.
3. **Cobertura global y coherencia con los informes del IPCC**
 - a. Son la base de los ejercicios internacionales **CMIP (Coupled Model Intercomparison Project)**, actualmente en su sexta fase (**CMIP6**).
 - b. Sus resultados alimentan los **informes de evaluación del IPCC**, incluyendo proyecciones utilizadas en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCs) y en los Planes Nacionales de Adaptación (NAPs).

Relevancia para la planificación hidrológica

Aunque los GCMs funcionan a escala planetaria, su uso es relevante en la planificación hidrológica porque:

- **Proporcionan las tendencias climáticas globales y regionales** que determinan cambios en precipitación, temperatura y evapotranspiración.
- Permiten identificar **patrones de variabilidad climática de gran escala** que afectan América Latina, como **El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)**, la Oscilación del Atlántico y cambios en la circulación atmosférica.
- Sirven como **punto de partida** para generar proyecciones climáticas regionales (downscaling), que luego se integran en **modelos hidrológicos de cuencas**.
- Apoyan la **evaluación de riesgos y vulnerabilidades hídricas**, ya que permiten anticipar tendencias a largo plazo en la disponibilidad de agua y la ocurrencia de **fenómenos extremos**.

Limitaciones y consideraciones

- **Resolución limitada:** los GCMs no capturan directamente procesos locales, como lluvias orográficas en cuencas pequeñas.
- **Necesidad de reducción de escala (downscaling):** para uso operativo en planificación hidrológica, es imprescindible ajustar la información mediante técnicas estadísticas o modelos climáticos regionales (RCMs).
- **Incertidumbre inherente:** distintos GCMs pueden producir variaciones significativas, por lo que se recomienda usar **conjuntos de modelos (ensembles)** para obtener rangos de proyección más robustos.

En conclusión, los GCMs proporcionan la **base científica global** para evaluar el cambio climático en los planes hidrológicos. Aun cuando requieren ajustes para aplicaciones locales, su integración es clave para **anticipar riesgos, definir escenarios de gestión adaptativa y apoyar la toma de decisiones basada en evidencia**.

Modelos Climáticos Regionales (RCMs)

Los **Modelos Climáticos Regionales (Regional Climate Models, RCMs)** son herramientas numéricas que permiten **refinar la información generada por los Modelos Climáticos Globales (GCMs)** para obtener proyecciones con mayor resolución espacial y capacidad de representar procesos locales. Su principal aporte es traducir la visión global del clima en **información climática útil para el ámbito regional y de cuenca**, lo que resulta crítico en la planificación hidrológica.

A continuación, se enumeran algunas de las principales características de los RCMs:

1. **Alta resolución espacial y temporal**
 - a. Alcanzan resoluciones de **10 a 50 km**, frente a los 100-250 km de los GCMs.
 - b. Capturan mejor la influencia de la **topografía, cuerpos de agua, vegetación y uso del suelo**, que son determinantes para el ciclo hidrológico en cuencas.
2. **Dependencia de los GCMs**
 - a. Los RCMs utilizan como **condiciones de contorno** los resultados de los GCMs, lo que les permite **heredar la coherencia climática global** y, al mismo tiempo, añadir detalle regional.
 - b. Generalmente, se aplican dentro de **dominios regionales específicos**, por ejemplo, América Central, Andes Tropicales o Cuenca del Amazonas.
3. **Producción de proyecciones regionalizadas**
 - a. Permiten analizar **variaciones espaciales más precisas** de temperatura, precipitación y evapotranspiración.
 - b. Facilitan la detección de **zonas de riesgo hídrico**, considerando efectos locales como lluvias orográficas, sequías focalizadas o tormentas intensas.

Ejemplos y aplicaciones en la Región

- **CORDEX-Latin America & Caribbean (LAC)**
 - Es la iniciativa más utilizada para generar proyecciones regionalizadas en la región.
 - Proporciona simulaciones de variables climáticas bajo diferentes escenarios **SSP-RCP**, útiles para cuencas estratégicas.
- Aplicaciones típicas en planificación hidrológica:
 - **Balance hídrico y proyecciones de caudales** en ríos y embalses.
 - **Identificación de áreas críticas** para sequías e inundaciones, en coordinación con el capítulo de fenómenos extremos.
 - **Apoyo al diseño de medidas de adaptación**, desde Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) hasta infraestructura resiliente.

Relevancia para la planificación hidrológica

El uso de RCMs es esencial para trasladar la información climática al ámbito de la gestión del agua, ya que:

- Proporciona **datos regionalizados** aptos para alimentar **modelos hidrológicos de cuenca**.
- Permite **analizar escenarios de riesgo hídrico con mayor precisión**, mejorando la planificación de obras y medidas no estructurales.

- Ayuda a **priorizar zonas y medidas de adaptación**, ya que identifica con mayor detalle la vulnerabilidad de las áreas productivas, ecosistemas y poblaciones.
- Facilita la **evaluación de la resiliencia hídrica** frente a diferentes trayectorias climáticas, contribuyendo a una gestión adaptativa.

Limitaciones y consideraciones

- **Dependencia de los GCMs**: cualquier error o sesgo en los modelos globales puede trasladarse a los RCMs.
- **Incertidumbre**: no todos los modelos coinciden en la magnitud de los cambios, por lo que se recomienda utilizar **conjuntos de modelos (ensembles)**.
- **Necesidad de datos locales**: para mejorar la confiabilidad, los RCMs requieren ser validados con **series observadas** de estaciones hidrometeorológicas.

En síntesis, los RCMs permiten transformar la información climática global en **insumos prácticos para la gestión del agua**, facilitando la **planificación hidrológica proactiva y adaptativa** en América Latina.

Proyecciones climáticas (SSP-RCP)

Las **proyecciones climáticas**, son representaciones de posibles futuros del sistema climático terrestre, generadas a partir de hipótesis sobre la evolución de las **emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)**, los **cambios socioeconómicos** y el **uso del suelo**. En la planificación hidrológica, los escenarios climáticos permiten **anticipar cómo podrían variar la disponibilidad y calidad del agua, así como la frecuencia de fenómenos extremos**, proporcionando una base para diseñar medidas de adaptación y gestión resiliente.

Tipos de proyecciones climáticas

1. RCP (Representative Concentration Pathways)

Los **RCP (Trayectorias Representativas de Concentración)** son **escenarios de concentración de gases de efecto invernadero (GEI)** diseñados para evaluar cómo la evolución de emisiones y la respuesta del sistema climático podrían afectar la temperatura y el forzamiento radiativo del planeta hacia el año 2100.

Fueron utilizados principalmente en el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC, y sirvieron como base para el diseño de proyecciones climáticas globales y regionales en el proyecto CMIP5 (**Guía metodología 1**).

Los **RCP** representan trayectorias plausibles del clima futuro definidas por el **incremento del forzamiento radiativo en 2100**, medido en vatios por metro cuadrado (W/m^2) respecto a los niveles preindustriales. Este forzamiento refleja el **desequilibrio energético del planeta** provocado por la acumulación de gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera, que determinan cuánto se calentará la superficie terrestre en las próximas décadas.

A diferencia de los escenarios más recientes basados en **SSP (Shared Socioeconomic Pathways)**, los RCP **no incorporan directamente trayectorias socioeconómicas** ni cambios detallados de uso del suelo. En lugar de ello, describen **futuros climáticos plausibles** que podrían alcanzarse bajo diferentes combinaciones de crecimiento económico, políticas de mitigación y avances tecnológicos. Esta característica los hace versátiles para análisis climáticos, pero requiere complementarlos con otros marcos para considerar aspectos sociales o de gestión territorial.

En la **planificación hidrológica**, los RCP son especialmente útiles para **evaluar impactos a mediano y largo plazo** sobre los recursos hídricos. Al integrarse en modelos hidrológicos de cuenca, permiten simular cómo distintos niveles de emisiones podrían alterar caudales, recarga de acuíferos y almacenamiento en embalses. Su empleo facilita explorar un rango amplio de riesgos, desde escenarios de mitigación fuerte hasta situaciones de altas emisiones, lo que resulta clave para diseñar **medidas de adaptación robustas y resilientes**.

- **RCP2.6 (Escenario de mitigación fuerte)**
 - Forzamiento radiativo: $\sim 2.6 W/m^2$ en 2100.

- Supone **reducciones drásticas de emisiones** y una neutralidad de carbono alcanzada en la segunda mitad del siglo XXI.
- **Implicaciones hidrológicas:**
 - Cambios moderados en temperatura y precipitación.
 - Baja probabilidad de aumento significativo en la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos.
 - Escenario útil para **planificación de infraestructura resiliente de largo plazo**.
- **RCP4.5 (Escenario intermedio)**
 - Forzamiento radiativo: $\sim 4.5 \text{ W/m}^2$ en 2100.
 - Representa un **escenario de estabilización**, con políticas de mitigación moderadas y emisiones que comienzan a declinar hacia mediados de siglo.
 - **Implicaciones hidrológicas:**
 - Cambios notables en patrones de lluvia y temperatura, afectando caudales, recarga de acuíferos y calidad del agua.
 - Riesgo intermedio de sequías prolongadas e inundaciones más intensas.
 - Es el **escenario más utilizado en planificación a mediano plazo** por su plausibilidad.
- **RCP8.5 (Escenario de altas emisiones)**
 - Forzamiento radiativo: $\sim 8.5 \text{ W/m}^2$ en 2100.
 - Corresponde a un **escenario de crecimiento dependiente de combustibles fósiles**, sin esfuerzos significativos de mitigación.
 - **Implicaciones hidrológicas:**
 - Aumento marcado de la temperatura y cambios extremos en la distribución de la precipitación.
 - Alta probabilidad de intensificación de **eventos hidrometeorológicos extremos** (sequías, tormentas e inundaciones).
 - Escenario recomendado para **evaluar riesgos máximos y diseñar medidas de adaptación robustas**.

2. SSP (Shared Socioeconomic Pathways)

Los **SSP**, o **Trayectorias Socioeconómicas Compartidas**, son un conjunto de escenarios introducidos por el **AR6 del IPCC** para mejorar la comprensión de cómo los factores sociales, económicos y tecnológicos pueden influir en la evolución del clima (**Guía metodología 2 y 3**). A diferencia de los antiguos RCP, que solo describían trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero, los SSP **combinan las proyecciones de emisiones con escenarios socioeconómicos y cambios en el uso del suelo**, proporcionando una visión más integrada del futuro.

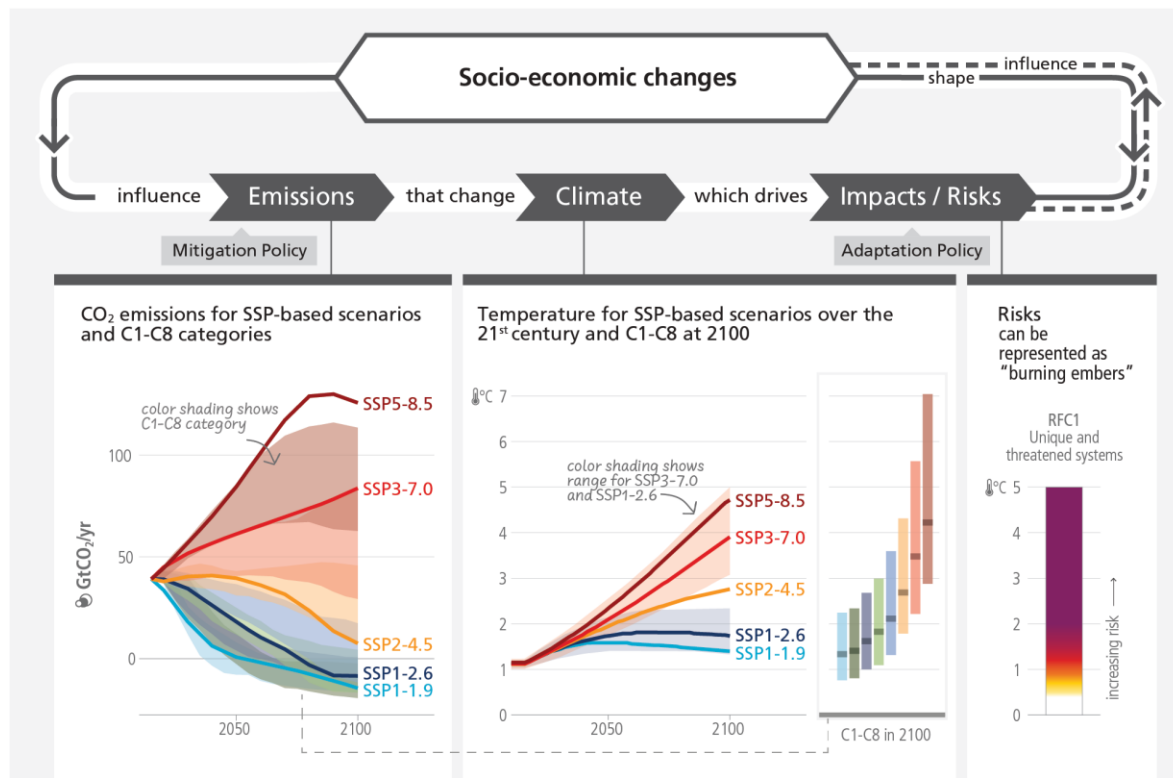
Estos escenarios permiten explorar cómo distintos **patrones de desarrollo humano** pueden determinar el nivel de riesgo climático global y regional. Factores como la **urbanización acelerada**, la **deforestación**, la **presión sobre los recursos hídricos**, la **cooperación internacional** o la **transición energética hacia fuentes bajas en carbono** se reflejan en cada trayectoria. En el contexto de la planificación hidrológica, esto resulta esencial, ya que las demandas de agua, la degradación ambiental y la vulnerabilidad social están profundamente vinculadas al desarrollo socioeconómico.

Cada SSP se asocia a una **trayectoria de emisiones y forzamiento radiativo (SSP-RCP)**, lo que permite evaluar simultáneamente la evolución del clima y las condiciones sociales que determinan la capacidad de adaptación. Algunos ejemplos clave son:

- **SSP1-2.6:** Representa un mundo de **desarrollo sostenible**, con cooperación internacional, uso racional de los recursos y bajas emisiones de gases de efecto invernadero. En términos hidrológicos, implica menores riesgos de cambio drástico en caudales y una mayor capacidad para implementar medidas de adaptación.
- **SSP2-4.5:** Corresponde a un **escenario intermedio**, donde el desarrollo avanza de manera desigual, con políticas climáticas moderadas. Es considerado el **más plausible** para la planificación regional en América Latina, pues combina riesgos significativos con cierto margen de adaptación.
- **SSP5-8.5:** Representa un mundo de **crecimiento intensivo en combustibles fósiles y altas emisiones**, con escasa atención a la sostenibilidad. Para la planificación hidrológica, es el escenario más desafiante, ya que proyecta cambios severos en temperatura y precipitación, con un aumento sustancial en la probabilidad de fenómenos extremos y presión sobre los recursos hídricos.

Scenarios and warming levels structure our understanding across the cause-effect chain from emissions to climate change and risks

a) AR6 integrated assessment framework on future climate, impacts and mitigation



b) Scenarios and pathways across AR6 Working Group reports

Category in WGIII	Category description	GHG emissions scenarios (SSPx-y*) in WGI & WGII	RCPy** in WGI & WGII
C1	limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot	Very low (SSP1-1.9)	
C2	return warming to 1.5°C (>50%) after a high overshoot		
C3	limit warming to 2°C (>67%)	Low (SSP1-2.6)	RCP2.6
C4	limit warming to 2°C (>50%)		
C5	limit warming to 2.5°C (>50%)		
C6	limit warming to 3°C (>50%)	Intermediate (SSP2-4.5)	RCP 4.5
C7	limit warming to 4°C (>50%)	High (SSP3-7.0)	
C8	exceed warming of 4°C (>50%)	Very high (SSP5-8.5)	RCP 8.5

c) Determinants of risk



Esquema integrado SSP-RCP del IPCC AR6

En los planes hidrológicos, el uso de los SSP permite **evaluar la resiliencia de las cuencas y la efectividad de las medidas de adaptación** en diferentes contextos socioeconómicos. Por ejemplo, una misma infraestructura o estrategia de gestión del agua puede comportarse de forma muy distinta en un mundo altamente cooperativo y sostenible (SSP1) respecto a otro caracterizado por crecimiento acelerado y emisiones altas (SSP5).

La integración de los SSP con los modelos hidrológicos permite **construir escenarios más realistas**, no solo considerando el clima físico, sino también el **comportamiento social y económico** que condiciona la demanda de agua, la degradación ambiental y la capacidad institucional para responder al cambio climático.



Importante:

Los **RCP (Representative Concentration Pathways)** fueron la base del **Quinto Informe de Evaluación (AR5)** del IPCC y continúan utilizándose, especialmente en estudios hidrológicos y climáticos iniciados antes del **AR6**. Estos escenarios describen cómo podrían evolucionar las **concentraciones de gases de efecto invernadero** hasta 2100, expresadas en términos de **forzamiento radiativo**. Su utilidad radica en mostrar distintos futuros climáticos, desde escenarios de **mitigación fuerte (RCP2.6)** hasta **altas emisiones (RCP8.5)**, aunque no incluyen de forma explícita los cambios socioeconómicos ni de uso del suelo que influyen en la capacidad de adaptación de los territorios.

Con la publicación del **Sexto Informe (AR6)**, el IPCC adoptó un marco más completo basado en los **SSP (Shared Socioeconomic Pathways)**, que describe **futuros socioeconómicos plausibles** como mundos sostenibles, intermedios o intensivos en el uso de combustibles fósiles. Cuando se combinan con un nivel de emisiones o de forzamiento radiativo, estos escenarios forman los **SSP-RCP**. Por ejemplo, **SSP1-2.6** corresponde a un mundo cooperativo y de bajas emisiones, **SSP2-4.5** representa un desarrollo intermedio, y **SSP5-8.5** refleja un futuro de altas emisiones y gran presión sobre los recursos hídricos.

En la planificación hidrológica actual, lo recomendable es **trabajar con escenarios SSP-RCP**, ya que ofrecen una visión más realista al integrar la evolución del clima con las dinámicas socioeconómicas que condicionan la demanda de agua, la degradación ambiental y la capacidad de adaptación de las comunidades. Sin embargo, los **RCP** siguen siendo útiles para **comparaciones históricas** y para mantener la **coherencia con estudios previos**, ya que muchos análisis de riesgos hídricos aún se presentan con estas trayectorias clásicas.

Escenarios climáticos (RCP y SSP-RCP) en la planificación hidrológica

La integración de escenarios RCP y SSP-RCP en los planes hidrológicos permite:

- **Simular la disponibilidad de agua futura**, incorporando proyecciones climáticas en los **modelos hidrológicos de cuenca**.
- **Evaluar tendencias** en la recarga de acuíferos, caudales mínimos y máximos, almacenamiento en embalses y balances hídricos.
- **Identificar riesgos hídricos emergentes**, sin duplicar el análisis de fenómenos extremos que se aborda en su capítulo específico.
- **Diseñar y priorizar medidas de adaptación**, combinando infraestructura resiliente, Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) y medidas no estructurales.
- **Definir horizontes de planificación** (2030, 2050, 2100) coherentes con los ciclos de revisión de los Planes Nacionales de Adaptación al Cambio Climático (PNACC/NAP).

Aspectos a considerar en su uso:

- **Evaluar múltiples escenarios**: incluir al menos uno de bajas emisiones, uno intermedio y uno de altas emisiones para abarcar el rango de posibles impactos.
- **Analizar la incertidumbre**: trabajar con **conjuntos de modelos (ensembles)** y reportar rangos de proyección, no solo valores puntuales.
- **Reducción de escala y corrección de sesgos**: ajustar las proyecciones con **modelos climáticos regionales (RCMs)** y series observadas locales.
- **Vincular con la planificación adaptativa**: traducir los resultados directamente en priorización de medidas estructurales, no estructurales y SbN.

El uso de escenarios climáticos en los planes hidrológicos proporciona una **base sólida para la gestión adaptativa**, ya que permite:

- Proteger la **seguridad hídrica** de poblaciones y sectores productivos.
- Reducir la vulnerabilidad de **infraestructuras críticas** como presas, hidroeléctricas y sistemas de riego.
- Garantizar la **coherencia con políticas nacionales e internacionales** de adaptación al cambio climático y con el Acuerdo de París.

En síntesis, trabajar con escenarios climáticos RCP y, preferentemente, SSP-RCP permite que los planes hidrológicos evolucionen hacia una **gestión proactiva y resiliente**, considerando no solo la variabilidad climática física, sino también los factores sociales y económicos que determinan la capacidad real de adaptación.

Evaluación de los efectos del Cambio Climático

La evaluación de los efectos del cambio climático en la planificación hidrológica tiene como objetivo identificar **cómo las variaciones proyectadas en temperatura, precipitación y evapotranspiración** pueden modificar la disponibilidad y la calidad de los recursos hídricos, afectar las demandas de agua y comprometer el cumplimiento de los caudales ecológicos.

En línea con las recomendaciones del documento base, el análisis debe ser **integral, gradual y enfocado en tendencias**, más que en valores exactos, debido a la incertidumbre inherente a los modelos climáticos y a la respuesta hidrológica de las cuencas. El propósito principal es anticipar vulnerabilidades y orientar medidas de adaptación para fortalecer la resiliencia de los sistemas hídricos, sociales y ambientales.

Marco metodológico

Para que la evaluación sea consistente y útil para la planificación hidrológica, se recomienda aplicar un **proceso metodológico estructurado en cinco fases**, que combine análisis técnico, participación institucional y revisión adaptativa.

Fase 1. Definición del alcance y recopilación de información

- **Delimitación del área de estudio:** establecer las cuencas o subcuencas a analizar.
- **Identificación de elementos del plan a evaluar:** Esencialmente, recursos hídricos en régimen natural, demandas de agua y régimen de caudales ecológicos.
- **Recopilación de información base:**
 - Series históricas hidrometeorológicas y de caudales.
 - Proyecciones climáticas regionalizadas (SSP-RCP) y modelos hidrológicos existentes.
 - Información sobre demandas de agua, usos del suelo, infraestructura y vulnerabilidad social.
- **Definición de horizontes temporales de análisis** (ej. 2030, 2050, 2100).

Fase 2. Integración de proyecciones climáticas en modelos hidrológicos

1. Seleccionar **GCMs y RCMs** más representativos para la región y escenarios SSP-RCP de referencia.
2. Aplicar **downscaling y corrección** de sesgos para ajustar los datos a la escala local.
3. Usar **coeficientes de afección** para generar series de caudales ajustadas representando la posible reducción o aumento de aportaciones; o, si es posible **simular balances hídricos**: caudales, recarga de acuíferos y niveles de embalses bajo escenarios futuros.

Fase 3. Evaluación de impactos por componente

1. **Recursos hídricos en régimen natural**
 - a. Cuantificar cambios en la oferta hídrica, la recarga de acuíferos y la calidad del agua.
 - b. Evaluar estacionalidad y riesgo de déficit en cuencas vulnerables.
 - c. Generar series ajustadas y mapas de reducción o incremento de aportaciones.
2. **Demandas de agua**
 - a. Mantener demandas urbanas e industriales salvo en casos críticos.
 - b. Ajustar demandas agrícolas aplicando dotaciones netas derivadas de escenarios climáticos.
 - c. Identificar desequilibrios oferta-demanda y sectores vulnerables.
3. **Régimen de caudales ecológicos**
 - a. Mantener como referencia los caudales establecidos en el plan vigente.
 - b. Evaluar la compatibilidad de estos caudales con las aportaciones proyectadas.
 - c. Valorar cualitativamente el riesgo para ecosistemas y servicios ambientales.

Fase 4. Integración de resultados y priorización

1. Elaborar **mapas temáticos y matrices de impacto** para cada componente evaluado.
2. Clasificar impactos en **bajo, medio y alto**, integrando riesgo y vulnerabilidad.
3. Identificar **zonas y sectores prioritarios** para la adaptación, sin duplicar el análisis detallado de fenómenos extremos (**Consideración fenómenos extremos**).
4. Vincular los resultados con la **planificación de medidas estructurales, no estructurales y basadas en la naturaleza (SbN)**.

Fase 5. Comunicación, seguimiento y revisión adaptativa

1. Incorporar la evaluación en el **plan hidrológico y su documento anexo de cambio climático**.
2. Definir **indicadores de seguimiento** para recursos hídricos, ecosistemas e infraestructura.
3. Establecer **mecanismos de actualización periódica** ante nueva información climática o cambios en el uso del suelo.
4. Garantizar la **participación de actores locales y autoridades de cuenca** para validar resultados y reforzar la gobernanza.

Una vez definida la metodología general para la evaluación de los efectos del cambio climático, es necesario **analizar de forma sistemática los distintos elementos del sistema hídrico y su entorno** que pueden verse afectados. La evaluación de los efectos del cambio climático en el plan hidrológico debe centrarse en los **tres elementos fundamentales** (Establecidos en el apartado correspondiente del capítulo 2: **Consideración del cambio climático en la Planificación con visión de GIRH**): recursos hídricos en régimen natural, demandas de agua y régimen de caudales ecológicos. Esta aproximación permite **detectar tendencias, evaluar la robustez del sistema y priorizar medidas de adaptación** sin perder de vista la incertidumbre inherente de los escenarios climáticos. La consideración de estos componentes facilita la generación de diagnósticos integrales y comparables, que orientan la priorización de medidas de adaptación y la actualización continua de los planes hidrológicos frente a escenarios climáticos cambiantes.

Elementos para el análisis de los efectos del Cambio Climático

Una vez definida la metodología general, la evaluación de los efectos del cambio climático en el plan hidrológico debe centrarse en **tres componentes principales** (Establecidos como criterios en el capítulo 2: **Consideración del cambio climático en la Planificación con visión de GIRH**), que son los que determinan el balance hídrico y la resiliencia del sistema:

1. **Recursos hídricos en régimen natural.**
2. **Demandas de agua.**
3. **Régimen de caudales ecológicos.**

Cada uno de estos elementos debe analizarse de forma sistemática para detectar **tendencias, vulnerabilidades y necesidades de adaptación**, más que para obtener valores exactos, debido a la incertidumbre inherente de las proyecciones climáticas.

1. Recursos hídricos en régimen natural

Los recursos hídricos en régimen natural son la base para los balances de oferta y demanda en el plan hidrológico, ya que determinan la disponibilidad real de agua superficial y subterránea en condiciones sin regulación ni usos antrópicos (**Inventario de recursos hídricos**). **La evaluación de este componente bajo escenarios de cambio climático** tiene como finalidad identificar cómo podrían variar las aportaciones de ríos, arroyos y la recarga de acuíferos en distintos horizontes temporales, permitiendo anticipar riesgos de déficit hídrico y planificar medidas de adaptación.

El análisis no busca establecer valores exactos, sino **detectar tendencias y vulnerabilidades**, debido a la incertidumbre inherente a los modelos climáticos y a la respuesta hidrológica de las cuencas. Esta aproximación permite elaborar estrategias flexibles y robustas frente a escenarios cambiantes.

Para una evaluación completa de los recursos en régimen natural frente al cambio climático, se debe considerar:

- **Variaciones climáticas proyectadas**
 - Cambios en la **precipitación anual y estacional**, incluyendo su intensidad y distribución temporal.

- Incremento o disminución de la **temperatura media**, que influye en la fusión nival, la evaporación y la evapotranspiración potencial.
- Efectos sobre la **evapotranspiración real**, que condiciona la recarga de acuíferos y la escorrentía.
- **Impactos sobre caudales**
 - Modificaciones en **caudales medios, máximos y mínimos**, fundamentales para evaluar balances y garantizar caudales ecológicos.
 - Cambios en la **estacionalidad**, como desplazamientos de los picos de caudal o prolongación de periodos secos.
 - Posible **aumento de sequías prolongadas** y reducción de aportaciones hídricas en cuencas vulnerables.
- **Distribución espacial y temporal de la oferta**
 - Identificación de **zonas de la cuenca más sensibles** a la disminución de aportaciones.
 - Evaluación de **diferencias entre subcuencas** por condiciones climáticas y geológicas.

La metodología para evaluar este componente combina análisis de datos históricos, proyecciones climáticas y modelización hidrológica:

1. **Recopilación y análisis de series históricas**
 - a. Seleccionar **series representativas de caudales naturales** y niveles freáticos.
 - b. Detectar tendencias históricas de reducción o aumento de aportaciones.
2. **Proyecciones y ajuste de series**
 - a. Incorporar **proyecciones climáticas regionalizadas (SSP-RCP)** generadas por GCM y RCM.
 - b. Aplicar **coeficientes de afección** para ajustar las series históricas o bien **aplicar modelos hidrológicos** para obtener escenarios de caudales futuros.
 - c. Considerar diferentes horizontes temporales (2030, 2050, 2100) para análisis prospectivo.
3. **Evaluación espacial y temporal**
 - a. Identificar **zonas críticas** donde se prevén mayores reducciones de aportaciones o estrés hídrico.
 - b. Evaluar los impactos sobre la **estacionalidad y la variabilidad interanual** de los recursos.

La evaluación de los recursos hídricos en régimen natural bajo cambio climático debe generar:

- **Series de caudales ajustadas** para cada escenario SSP-RCP y horizonte temporal.
- **Mapas de oferta hídrica futura**, identificando áreas con variación significativa de recursos.
- **Diagnóstico de vulnerabilidad** de las cuencas y subcuencas frente a sequías y disminución de aportaciones.
- Información de base para **balances recursos-demandas**, evaluación de riesgos y priorización de medidas de adaptación.

2. Demandas de agua

Las **demandas de agua** representan una de las principales presiones que las actividades humanas ejercen sobre los recursos hídricos, y son un componente esencial en la planificación hidrológica. En el contexto del cambio climático, su evaluación permite anticipar **desequilibrios entre oferta y demanda**, identificar los sectores más vulnerables y priorizar medidas de adaptación. (**Descripción general de usos y demandas de agua**).

El impacto del cambio climático sobre las demandas **no es uniforme**: algunos usos muestran una sensibilidad limitada, mientras que otros son altamente dependientes de las condiciones climáticas y pueden cambiar de forma significativa. Por ejemplo, la **demanda de abastecimiento urbano y rural** suele mantenerse relativamente estable, aunque puede verse afectada por sequías prolongadas que requieran restricciones o mejoras de eficiencia. En cambio, la **demanda agrícola** es mucho más sensible, ya que depende directamente de la precipitación, la evapotranspiración y la temperatura, que determinan las necesidades netas de riego.

La evaluación de demandas no busca predecir con exactitud un valor único, sino **analizar tendencias y posibles escenarios de estrés hídrico**, reconociendo la incertidumbre asociada a las proyecciones climáticas y a la respuesta adaptativa de los usuarios del agua.

Para una evaluación efectiva de las demandas de agua bajo cambio climático, se deben considerar:

- **Abastecimiento urbano y rural**
 - Cambios en el consumo asociados a variaciones en la disponibilidad de agua.
 - Posible incremento temporal durante olas de calor o periodos secos prolongados.
 - Evaluación de la resiliencia de las fuentes de suministro frente a escenarios de déficit.
- **Demanda agrícola y de riego**
 - Variación en las **dotaciones netas** debido a cambios en precipitación y evapotranspiración.
 - Aumento de la **duración de los periodos de riego** por desplazamientos estacionales.
 - Potencial implementación de **medidas de eficiencia y adaptación** (tecnificación, cambio de cultivos).
- **Usos industriales, energéticos y recreativos**
 - Evaluación de la **dependencia de caudales mínimos y calidad de agua** para su operación.
 - Riesgos de reducción de producción o de costes adicionales en épocas de escasez.

La evaluación de demandas frente al cambio climático se basa en integrar los datos actuales de consumo con escenarios climáticos y proyecciones hidrológicas:

1. **Definir demandas actuales y proyectadas**
 - a. Establecer la línea base de demandas de cada sector a partir del plan hidrológico.
 - b. Determinar cómo se espera que evolucionen sin considerar el cambio climático (escenario tendencial).
2. **Ajuste de demandas por efecto climático**
 - a. Mantener inalteradas las **demandas urbanas e industriales**, salvo en situaciones críticas.
 - b. Ajustar la **demanda agrícola** calculando nuevas dotaciones netas de riego bajo escenarios SSP-RCP.
 - c. Evaluar la sensibilidad de cada sector mediante coeficientes de ajuste basados en balances hídricos proyectados.
3. **Análisis de balance y vulnerabilidad**
 - a. Comparar la oferta proyectada de recursos en régimen natural con las demandas ajustadas.
 - b. Identificar **zonas y sectores con riesgo de déficit** o de conflictos de uso.
 - c. Generar escenarios de gestión que consideren la implementación de medidas de eficiencia y priorización de usos.

La evaluación de las demandas de agua bajo cambio climático debe generar:

- **Curvas de demanda ajustadas** por sector y horizonte temporal.
- **Mapas de vulnerabilidad hídrica**, mostrando sectores y regiones con riesgo de déficit.
- **Matrices de compatibilidad oferta-demanda**, para identificar posibles desequilibrios futuros.
- Información clave para la **planificación de medidas adaptativas**, como eficiencia en riego, diversificación de fuentes y gestión prioritaria de recursos.

3. Régimen de caudales ecológicos

El **régimen de caudales ecológicos** garantiza la **conservación de los ecosistemas acuáticos y sus servicios ambientales**, asegurando que los ríos, humedales y cuerpos de agua mantengan los flujos necesarios para sostener la biodiversidad y los usos ambientales (**Caudales Ecológicos**). En el contexto del cambio climático, su evaluación adquiere relevancia porque **cualquier reducción significativa en los caudales naturales o cambios en su estacionalidad** pueden afectar la capacidad de mantener estos caudales mínimos, poniendo en riesgo la funcionalidad ecológica de la cuenca. Por otra parte, distintos impactos del cambio climático como, por ejemplo, el incremento de temperatura de las aguas puede llevar a cambios en las distribuciones de la fauna acuática y, consecuentemente, aconsejar una reestimación de los regímenes de caudales ecológicos para esos escenarios futuros.

Sin embargo, este es uno de los elementos **más complejos de evaluar**, debido a la falta de modelos biológicos específicos para condiciones climáticas futuras y a la escasez de series diarias que permitan analizar alteraciones detalladas en el régimen de caudales. Por ello, las recomendaciones habituales proponen **mantener como referencia los caudales ecológicos actuales** y complementarlos con un **análisis cualitativo** de su sostenibilidad frente a los escenarios climáticos proyectados.

En la evaluación del régimen de caudales ecológicos frente al cambio climático se deben considerar:

- **Reducción de caudales medios y mínimos**
 - Riesgo de no cumplir los caudales ecológicos durante periodos secos prolongados.
 - Posible reducción de aportaciones en estaciones críticas para la reproducción de especies acuáticas.
- **Alteraciones en la estacionalidad**
 - Desplazamiento de picos de caudal y modificación de los pulsos de inundación que sostienen humedales y llanuras aluviales.
 - Impacto sobre especies dependientes de ciclos hidrológicos específicos.
- **Efectos sobre ecosistemas y servicios ambientales**
 - Pérdida de hábitats acuáticos y conectividad ecológica.
 - Reducción de la capacidad de regulación natural de la calidad y disponibilidad de agua.

Para evaluar este componente, se recomienda un enfoque **gradual y adaptativo**, que combine información hidrológica con análisis ecológico:

1. **Línea base**
 - a. Utilizar los **caudales ecológicos establecidos en el plan vigente** como referencia.
 - b. Integrar series históricas de caudales diarios para identificar la estacionalidad y los mínimos actuales.
2. **Análisis prospectivo**
 - a. Comparar los **caudales proyectados bajo escenarios SSP-RCP** con los caudales ecológicos establecidos.
 - b. Identificar periodos y subcuencas donde pueda haber incumplimiento de caudales mínimos.
3. **Evaluación cualitativa de sostenibilidad**
 - a. Valorar el riesgo para ecosistemas y servicios ambientales si las reducciones proyectadas persisten.
 - b. Explorar medidas complementarias como **restauración de humedales, conectividad fluvial y Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)**.

La evaluación del régimen de caudales ecológicos debe proporcionar:

- **Informe de compatibilidad** entre los caudales ecológicos y los escenarios climáticos proyectados.
- **Mapa de vulnerabilidad ecológica** de ríos y humedales frente a reducciones de caudal o alteraciones estacionales.
- **Recomendaciones de gestión adaptativa**, que incluyan medidas de restauración, conservación y refuerzo de la resiliencia ecológica.

Guías y referencias

GUIA 1: IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf

GUIA 2: IPCC (2021). The Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report, Climate Change 2021: The Physical Science Basis.

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

GUIA 3: IPCC (2022). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC*.

<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>