

**La variabilidad climática y el calentamiento global antropogénico (CGA) en el contexto de
reordenamiento territorial y los planes reguladores en Costa Rica**
(Documento de apoyo para el protocolo)

Autores:

Dr. Sergio Mora Castro

MSc. Javier Saborío

MSc. María del Mar Saborío

MSc. Juan Pablo González

Marzo, 2018

La variabilidad climática y el calentamiento global antropogénico (CGA) en el contexto de reordenamiento territorial y los planes reguladores en Costa Rica

Introducción

Al situarse Costa Rica en una de las áreas más expuestas a las amenazas hidro-meteorológicas y climáticas, tomando en cuenta el crecimiento socioeconómico derivado de las actividades productivas de bienes y servicios, y la expansión de la infraestructura urbana y rural, muchas veces no planificadas, tanto en el ámbito cantonal y de la Zona Marítimo-Terrestre, es necesario analizar los efectos e impactos posibles que se pueden presentar en el futuro.

La gestión del riesgo y el re-ordenamiento territorial, sobre todo mediante los planes reguladores municipales, son las medidas más apropiadas, actualmente disponibles, para contrarrestar los efectos e impactos y reducir los daños y pérdidas que podrían suceder, según los horizontes temporales con los que se realicen los análisis del riesgo derivado de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas.

En esta sección, se sugiere una serie de procedimientos para considerar los efectos previsibles derivados de los modelos y escenarios para estudiar los efectos e impactos del CGA sobre los extremos de la variabilidad climática (VC) y que deberían ser considerados a lo largo del proceso de la planificación territorial. Por medio de este protocolo, se consideran los siguientes conceptos y criterios:

Variabilidad Climática (VC). Conjunto de procesos atmosféricos y su relación con los océanos y continentes, cuyo comportamiento se materializa, de manera cíclica, en el corto plazo (i.e. períodos inter-estacionales, hasta decenas de años). Se relaciona con los procesos sinópticos, fisiográficos, oceanográficos e hidrometeorológicos. Es posible describirla física y matemáticamente (i.e. estadística, probabilidades, estocástica) mediante los aspectos y parámetros que regulan el clima y sus variaciones interanuales, individualidades y diferencias espacio-temporales. La variabilidad depende de los cambios en el comportamiento periódico de, por ejemplo: i) Ciclones tropicales (i.e. depresiones, tormentas, huracanes), es decir, de los vórtices de baja presión que varían, cada temporada, en su intensidad, número y trayectoria; ii) Variaciones interanuales y espaciales de la pluviometría, vientos, presión barométrica y temperaturas; iii) Gestación y materialización de los episodios de El Niño/La Niña-Oscilación Sur, la posición de la Zona de Convergencia Intertropical, avances de los frentes polares, los cambios en las corrientes El Chorro (e.g. “*Jet-stream*”), etc. De esta manera se determinan los límites dentro de los cuales los valores medios, desvíos o frecuencias se ubican entre los límites establecidos y si pueden o no ser considerados como “normales” o “anómalos”. Los eventos, fuera de estos límites, pueden ser vistos como extremos según los umbrales, sus niveles y el significado socioeconómico, territorial y ambiental (e.g. huracanes, vendavales, sequías, etc.) respectivo.

Cambio climático (CC) y calentamiento global antropogénico (CGA). El clima de un lugar o región cambia a lo largo de períodos extensos (i.e. décadas, siglos, milenios, o incluso tiempos más largos) y desarrolla tendencias evolutivas mensurables, desde el punto de vista estadístico, que se reflejan por medio de sus indicadores vectoriales, espacio-temporales y de su intensidad. Los cambios se pueden derivar tanto a partir de los procesos naturales, como de los antropogénicos; ambos causales ejercen su influencia de manera persistente sobre el equilibrio termodinámico de la atmósfera y su relación con los océanos y continentes. Hay que tomar en cuenta que la definición del cambio climático, utilizada dentro del Convenio de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, es más limitada que la anterior, puesto que sólo se refiere a los cambios directa o

indirectamente atribuibles a la actividad humana. Aunque esto sea el producto de una convención, no significa que no genere confusiones acerca de su significado científico y racional. En la realidad, el cambio climático natural (CCN) se deriva de las variaciones de largo plazo de la incidencia de la radiación solar (i.e. Ciclos de Milankovich) y de su equilibrio termodinámico con el contenido de gases, vapores y partículas-aerosoles a efecto invernadero (GVP-EI). El aumento reciente (i.e. desde los albores de la Revolución Industrial, ca. s. XVII-XVIII) en el tenor incremental de estos elementos y compuestos, ha comenzado a reflejarse (i.e. calentamiento global antropogénico, CGA), hasta la fecha, por medio de un aumento de alrededor de 0,6° C de la temperatura promedio en la superficie de la tierra (un poco más en el hemisferio norte y un poco menos en el hemisferio sur y en los océanos). Todavía no hay conocimientos suficientes como para comprender, con precisión, a partir de los modelos globales, la amplitud de los efectos locales (“downscaling”) respectivos, más allá de algunas tendencias y síntomas que comienzan a evidenciarse (e.g. reducción de las coberturas de hielo y nieve en glaciares y picos montañosos, variaciones sutiles en los regímenes térmicos e hidrometeorológicos de algunas regiones del mundo; ascenso milimétrico del nivel del mar, etc.). Frecuentemente, se comete el error de confundir e indiferenciar sus causas y consecuencias con las de la variabilidad climática.

Efectos de la VC y el CGA. Cualquier modificación, por causa del CGA, al ciclo hidrológico y que provoca una variación significativa en los valores de los eventos máximos y mínimos (i.e. extremos) de la variabilidad climática.

Escenario de cambio climático futuro. Consiste en una descripción coherente, internamente consistente y plausible de un posible estado futuro del mundo, causado por el cambio climático (debe incorporar tanto el componente antropogénico como el natural) (Parry and Carter, 1998). Consiste en un intento de pronóstico o predicción, realizada mediante instrumentos y modelos probabilísticos y/o determinísticos, que se presentan como una serie de imágenes de cómo podría ser el clima en el futuro.

Vulnerabilidad. Probabilidad de que, en función de la intensidad de la amenaza, puedan producirse daños sobre los bienes, servicios y personas, según sus grados de exposición y fragilidad (inverso de la resiliencia), y que ello se manifieste sobre el deterioro de la calidad de la vida humana (muertes, heridos, afectados, desplazados, trauma psicosocial; pérdida de acceso a los servicios básicos y a los medios de subsistencia), las pérdidas potenciales sobre el valor socioeconómico expuesto y el impacto sobre el ambiente y los recursos naturales. Se involucran, además, las dificultades de la sociedad para recuperarse, luego del impacto de una amenaza, por lo menos hasta el mismo nivel de la calidad de la vida prevalente antes del suceso.

Ordenamiento territorial (OT). El Estado, en su definición más amplia y aceptada, se compone de: i) Gobierno, ii) Población y iii) Territorio. Como tal, el OT consiste en una política pública que permite maximizar la eficiencia económica, ambiental y social del territorio, mediante el establecimiento un proceso de equilibrio entre su cohesión social, política y cultural, y en forma sostenible. Se fundamenta en el diagnóstico del estado actual de la gestión del espacio y la determinación de las condiciones y capacidad del uso de la tierra, de los conflictos (i.e. sobre-uso, sub-uso) y del proceso de rectificación mediante los procesos y planes de acción y de “re-ordenamiento territorial”

Plan regulador. Es el instrumento mediante el cual, el gobierno local y la comunidad planifican o reordenan los usos del territorio y orientan las actividades económicas actuales y futuras, sobre todo en cuanto a los usos de los espacios y tierra urbana, rural y costera, con la inclusión de la gestión del riesgo y considerando la amenaza del CGA.

Principios básicos

El impacto probable del CGA dependerá de las condiciones prevalentes en cada localidad y de la forma cómo se materialicen los factores derivados de sus efectos e impactos, ya sea de manera singular y/o combinada, y de la intensidad, distribución espacial y frecuencia de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas. El escenario más plausible es el que sugiere la amplificación de los extremos de los procesos de la variabilidad climática.

Todavía es fuente de debate y, a veces hasta de controversia, la forma y los niveles con que se materializarían, en el futuro, esos extremos mediante un “delta amenaza” y cómo serían influenciados los procesos que se deriven de este escenario, sobre los extremos del balance hídrico (i.e. incremento y/o reducción de la precipitaciones, elevadas o escasas, vientos intensos, marejadas, ascenso del nivel del mar, inundaciones, inestabilidad de laderas, etc.).

Sin embargo, para comprender el origen y las dimensiones de estas variaciones, deben también tomarse en cuenta los cambios que pudiesen generarse en la distribución espacial y temporal de la intensidad, duración y frecuencia (IDF) de los procesos meteorológicos, oceanográficos y climatológicos regionales y globales, como por ejemplo: El Niño-La Niña/Oscilación del Sur (ENOS), la posición y desplazamientos de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la génesis y trayectoria de la actividad tropical (e.g. ondas, vaguadas, ciclones, etc.), los frentes polares, vientos alisios y otros procesos asociados (Mora, 2012).

Construcción de escenarios para el análisis del riesgo derivado del calentamiento global antropogénico

El primer paso del análisis consiste en la evaluación y cuantificación del riesgo derivado de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas en su condición actual, de manera que sirvan de línea de base para las proyecciones en el futuro (Figura 1). Este análisis se realiza de acuerdo con los postulados, instrumentos y parámetros clásicos de la cuantificación del riesgo derivado de los eventos extremos de la variabilidad climática, según se observan en la actualidad y que ya han sido descritos en otras partes de esta Guía.

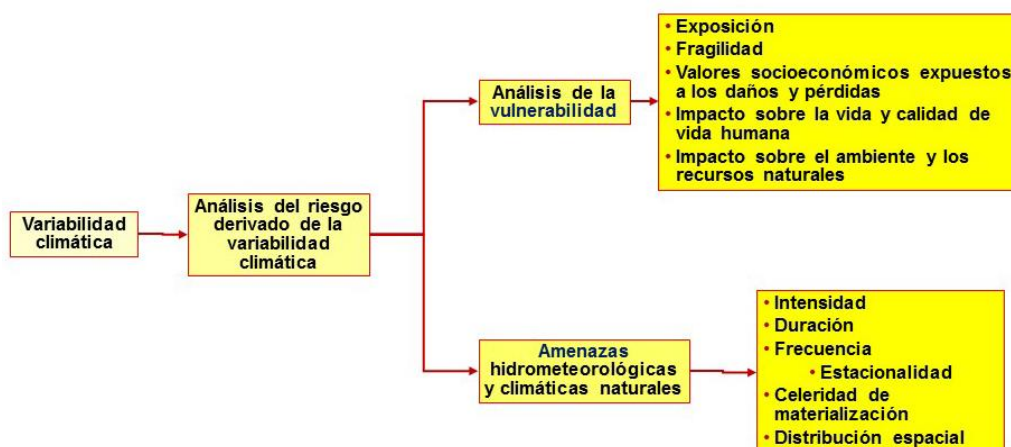


Figura 1. Proceso de análisis del riesgo derivado de los eventos extremos de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas, según las condiciones naturales de la variabilidad climática y bajo las condiciones actuales de la vulnerabilidad respectiva (Mora, 2010).

Posteriormente debe esclarecerse, por medio la evaluación de la evolución espacio-temporal de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas (AHMC), la derivación de la influencia del CGA (i.e. “delta amenaza”), acompañándose de la evaluación de la vulnerabilidad correspondiente, también proyectada hacia el futuro (“delta vulnerabilidad”) y en los mismos plazos analizados para las amenazas (Figura 2), el cálculo del riesgo en el mediano y largo plazo (“delta riesgo”). Este análisis debe incluir la cuantificación de la evolución de los parámetros, factores e indicadores respectivos y derivados del: i) Grado de exposición, ii) Grado de fragilidad, iii) Impacto probable sobre la vida y la calidad de vida humana, iv) Daño y pérdidas a los elementos económicos y el patrimonio social y material, e v) Impacto sobre el ambiente y los recursos naturales.

De igual manera y desde la óptica de la aparición de ventajas relativas, los cambios en el clima podrían generar impactos positivos (e.g. oportunidades para cultivos y ganados adaptados, menos cantidad de deslizamientos en las carreteras, aguas oceánicas más propicias para el aprovechamiento de ciertas prácticas de pesca, etc.), los cuales deberán ser incluidos en el balance general de la situación y de los escenarios socioeconómicos y ambientales respectivos. Este proceso se fundamenta en el concepto de mejorar el aprovechamiento y la optimización de la capacidad de uso de la tierra.

Entonces, el escenario para el análisis del incremento progresivo del riesgo, es decir, el que podría agregarse por la influencia del CGA a los escenarios del riesgo “actual”, se fundamenta en la evaluación de los incrementos en la capacidad destructiva de las AHMC y de la expansión de la vulnerabilidad (“delta riesgo”), todos separados del riesgo “actual”, ya evaluado sin la influencia del CGA.

Considerando que los procesos analíticos deberán ser de tipo probabilístico, pero que en la actualidad muchos de los datos, parámetros e información no están disponibles, transitoriamente podrán realizarse los análisis aplicando el mejor juicio analítico y por medio de metodologías determinísticas transparentes.

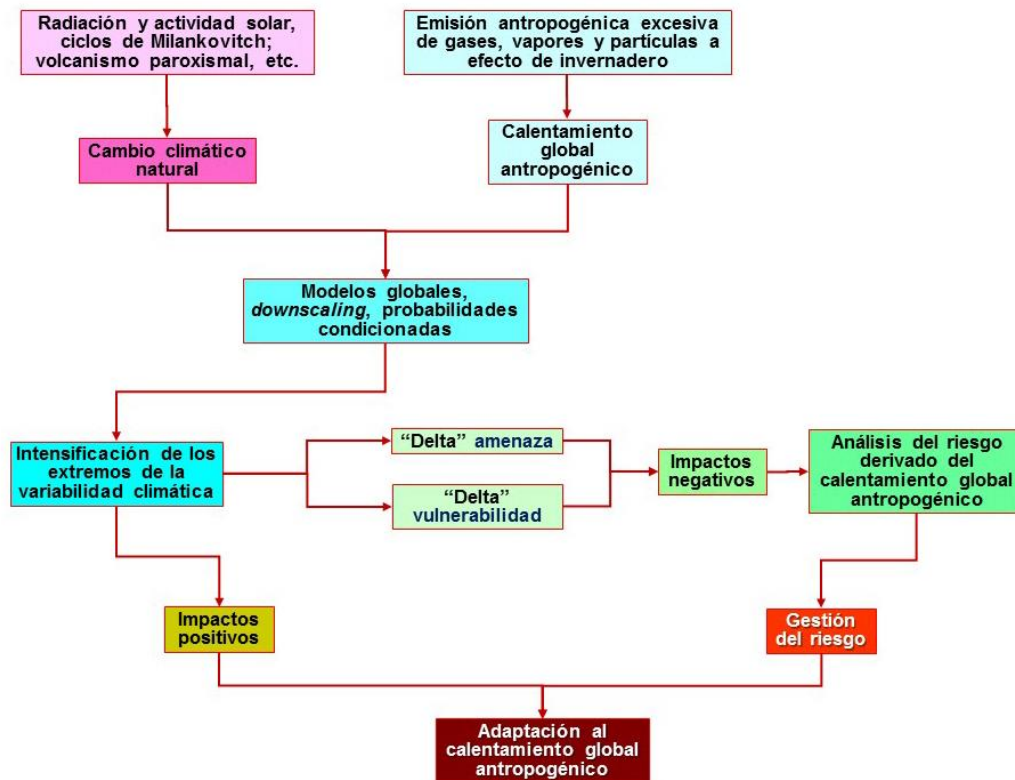


Figura 2. Proceso analítico para el análisis del riesgo y de la gestión del riesgo derivado de los efectos e impactos de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas y de la vulnerabilidad, según sean influenciados, en el futuro, por el calentamiento global antropogénico (Mora, 2012).

Esta evaluación debe concluir con la formulación y estimación de las métricas que representen la probabilidad de excedencia de las pérdidas, según las condiciones actuales, y su aumento relativo por causa del aumento de las AHMC y de la vulnerabilidad correspondiente, según los plazos bajo estudio (i.e. horizonte de planificación territorial).

Análisis del riesgo

La cuantificación del riesgo es complicada, pero indispensable si se desea planificar el territorio. Uno de los problemas mayores es que, bajo el estado actual de la tecnología, no es posible cartografiar el riesgo, dada la gran cantidad de variables y dimensiones que lo componen. A lo sumo, es posible la preparación de mapas temáticos que incorporen algunos de sus parámetros parciales.

En realidad y de manera práctica, el riesgo se debe representar, más bien, mediante varios tipos de métricas y matrices fundamentadas en la cuantificación probabilística y/o determinística del riesgo físico y de sus variables.

El riesgo físico es, comúnmente, descrito mediante la llamada *curva de excedencia de pérdidas* ("loss exceedance curve"), el cual permite calcular las frecuencias, expresada en el número de veces por año con las que ocurrirán los eventos en los que se iguale o exceda un valor especificado de pérdidas monetarias. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como la "tasa de excedencia", y se calcula mediante la siguiente ecuación, que es una de las formas que puede adoptar el teorema de la probabilidad total

(<http://www.redalyc.org/pdf/1210/121035720001.pdf>);
 (http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0726.pdf)

Eventos

$$v(p) = \sum_{i=1} Pr(P > p | \text{Evento } i) \cdot FA(\text{Evento } i)$$

En la ecuación anterior, $v(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p , $FA(\text{Evento } i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i , mientras que $Pr(P > p | \text{Evento } i)$ es la probabilidad de que la pérdida sea superior a p dada la ocurrencia del i -ésimo evento. La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos contenidos en el conjunto de escenarios estocásticos,

El inverso de la tasa de excedencia $n(p)$ es el período de recurrencia de la pérdida p , es decir Tr . La pérdida p a la que se refiere la Ecuación 3-4 es la suma de las pérdidas que se producen en los elementos expuestos. Considerando lo anterior, es importante recordar que:

- La pérdida p es una cantidad incierta cuyo valor, dada la ocurrencia de un evento, no puede conocerse con precisión. Debe por lo tanto, ser tratada como una variable aleatoria y deben preverse mecanismos para conocer su distribución probabilística, condicionada a la ocurrencia de un evento en particular.

- La pérdida p se calcula como la suma de las pérdidas que se presentan en cada uno de los bienes expuestos. Cada uno de los sumandos es una variable aleatoria y, entre ellos, existe un nivel de correlación, el cual debe ser incluido en el análisis. Por lo tanto, tomando en cuenta la ecuación anterior, la secuencia del cálculo probabilístico del riesgo es la que se presenta a continuación:

1. Para cada escenario, contenido en cada conjunto estocástico, se determina la distribución de las probabilidades de la pérdida, en cada uno de los elementos expuestos.
2. A partir de las distribuciones de las probabilidades de pérdidas, en cada elemento, se determina la distribución de la probabilidad de la suma de estas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que exista entre ellas.
3. Una vez determinada la distribución de la probabilidad de la suma de las pérdidas, para el evento considerado, se calcula la probabilidad de que esta pérdida exceda un valor determinado.
4. Se determina, entonces, la contribución de cada evento a la tasa de excedencia de pérdidas p , multiplicando (ponderando) la probabilidad determinada en el paso por la frecuencia anual de ocurrencia del evento. El cálculo se repite para todos los conjuntos de eventos estocásticos.

Otra de las métricas más utilizadas, para modelar el riesgo, es la Pérdida Máxima Probable (PMP) y, también, la Pérdida Anual Esperada (PAE). La definición de esta última es la siguiente:

$$PAE = \int_i n(I) V(P|I) dI$$

PAE = Medida del riesgo, según la probabilidad de excedencia de alcanzar un nivel específico de daños y pérdidas, durante un año.

$i =$ Intensidad de la amenaza

$n(I) =$ Número de eventos, por año, con una intensidad igual o superior a I ; es decir, con potencial de generar daños y pérdidas.

$V(P/I)$ = Nivel de vulnerabilidad, expresado como el valor esperado de la pérdida anual P , derivada del conjunto de impactos destructivos, es decir, con una intensidad igual o superior a I

El riesgo derivado del calentamiento global antropogénico y su gestión

De acuerdo con el informe IPCC-5 (COP-21; IPCC WG III, 2014) y los análisis sucesivos, el potencial destructivo del calentamiento global antropogénico (CGA), de continuar las tendencias actuales, es un motivo de preocupación para toda la sociedad. Es por ello que debe establecerse una metodología para evaluar el riesgo respectivo (i.e. amenaza y vulnerabilidad) y su evolución incremental, en el mediano y largo plazo.

El análisis del incremento en el riesgo, durante el horizonte temporal escogido, deberá contemplar la forma cómo evoluciona debido a la influencia del calentamiento global antropogénico. Para evitar confusiones y, al mismo tiempo orientar adecuadamente el proceso de toma de decisiones, la influencia del calentamiento global antropogénico debe identificarse, desagregarse y separarse del resto de los factores y condicionantes simultáneos (i.e. variabilidad climática y cambio climático natural). Este criterio permitirá definir, de manera precisa, las medidas de la gestión del riesgo correspondientes y enfocar las prioridades en cada territorio y comunidad.

Las políticas para la gestión territorial, así como los procesos preventivos, la planificación y las inversiones para el desarrollo, deberán definirse de acuerdo con las condiciones y especificidades propias de cada localidad, tomando en cuenta la forma y las capacidades para enfrentar los extremos “nuevos” de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas y sus eventuales consecuencias socioeconómicas y ambientales. Es desde este punto de vista que podrán definirse los umbrales específicos y del riesgo “aceptado” y del riesgo “aceptable”.

El proceso estratégico que oriente a la política y a la opinión pública, debe ser racionalizado y contextualizado para cada caso en particular. Bajo esta premisa, es la reducción de la vulnerabilidad (incluida la adaptación al calentamiento global antropogénico, ACGA) y la de sus causas y factores agravantes, la acción más plausible y efectiva, bajo la visión integral de la gestión del riesgo. La visibilidad política, social y científica sin precedentes, con la que cuenta el actualmente tema del calentamiento global antropogénico, debe tomarse como una oportunidad para atraer recursos y movilizar el proceso de toma de decisiones y de participación ciudadana, tanto en el ámbito nacional, como en el regional y local.

Por lo tanto, la gestión del riesgo derivado del calentamiento global antropogénico (CGA) debe apoyarse en sus pilares, procesos y balances principales:

- i) El conocimiento y la comunicación del riesgo y de sus causas (i.e. amenazas y vulnerabilidad), para asistir el proceso de toma de decisiones,
- ii) La reducción del riesgo, por medio de medidas de prevención y mitigación, tanto estructurales como no-estructurales, incluida la adaptación al calentamiento global antropogénico

- iii) El financiamiento del riesgo, mediante los procesos que apoyen los otros tres pilares y, además, mediante la protección financiera, por medio de instrumentos de retención (i.e. recursos propios) y transferencia (i.e. hacia terceros y a lo largo de plazos mayores), y
- iv) La gestión de las emergencias y desastres, a partir de los procesos integrados de observación, vigilancia, alerta, alarma, respuesta, continuidad operativa y funcional, y de la recuperación (Mora, 2010; Mora y Keipi, 2006).

Es claro que, ante todo este panorama, la reducción de la vulnerabilidad será, bajo cualquier circunstancia, la mejor medida de “adaptación” para enfrentar este tipo de amenazas (Wilby y Mora, 2010).

a) Procedimiento técnico: para la inclusión de la variabilidad climática (VC) y el calentamiento global antropogénico (CGA) en los planes reguladores

El procedimiento conlleva a los siguientes estudios

- Análisis espacial – temporal del ciclo hidrológico, el cual debe realizarse a la escala de la cuenca hidrográfica y cuyos resultados se trasladan al ámbito cantonal.
- Se proponen tres enfoques:
 1. Balance hidrológico: Debe permitir la definición de la línea de base, así como los parámetros fundamentales de la variabilidad climática en su contexto actual y futuro y los cambios previstos en los usos de la tierra, a partir de las zonificaciones proyectadas en el plan regulador y de acuerdo con el horizonte temporal correspondiente.
 2. Análisis de los eventos máximos, mediante las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) de las lluvias y/o de los hidrogramas pico, considerando un delta obtenido a partir del cálculo del cambio en los registros máximos esperados y de su influencia sobre las amenazas que de ahí se deriven: a) inundación, b) inestabilidad de laderas, c) erosión, d) aludes torrenciales, e) cambios en el nivel del mar, d) efectos en los ecosistemas-biodiversidad, d) otros. De forma similar, los análisis de los eventos mínimos (i.e. balance hídrico negativo; sequías), vía análisis probabilístico o de escenarios determinísticos, deben permitir la definición de la influencia sobre la extensión de los corredores secos y los problemas de abastecimiento futuro del recurso hídrico, de acuerdo con todos los usos requeridos (e.g. riego, hidroelectricidad, recreación, pesca, navegación, agua potable de buena calidad, etc.).
 3. Aunque ambos análisis son factibles, no todas las cuencas en Costa Rica se han modelado por medio de un balance hidrológico y, ni siquiera, para evaluar la amenaza de inundaciones. Por esta razón y, de manera transitoria, podrán realizarse modelos fundamentados en aproximaciones determinísticas, utilizando para ello el juicio de los expertos del equipo que realiza el diagnóstico, a condición

de que los procedimientos, parámetros y metodologías, sean descritos de manera detallada y transparente.

1. Metodología basada en el balance hídrico de una cuenca hidrográfica

Dada la composición, extensión y temporalidad de la información espacial requerida para considerar los efectos positivos y/o negativos de la VC y CGA, los estudios se deben enfocar en el análisis del balance hidrológico y de sus variaciones temporales y espaciales, por lo que su aplicación debe realizarse a la escala de la cuenca hidrográfica. En la Figura 3, se incluye un esquema de las variables climáticas y físicas que representan el ciclo hidrológico.

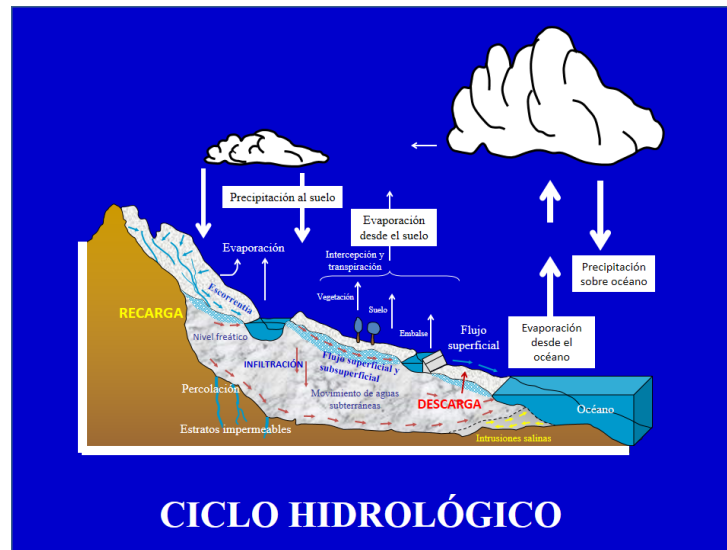


Figura 3. El ciclo hidrológico, como base para la evaluación de las cuencas y su aplicación a la planificación territorial

Normalmente, la planificación por cuenca hidrográfica parte de un diagnóstico base, el cual contempla el balance hidrológico y en donde existen herramientas que permiten su aplicación en el ámbito espacial y temporal.

La línea base, en las cuencas hidrográficas, se fundamenta en el análisis de sus condiciones actuales y en el establecimiento de los indicadores correspondientes, propiamente dentro del contexto de la VC y el CGA. A manera de ejemplo, algunos de los indicadores se definen en el Cuadro 1 y permiten la comparación de las anomalías del clima y de las proyecciones del calentamiento global antropogénico según el horizonte temporal de planificación escogido y correspondiente.

Los indicadores se deben formular de manera que contengan información accesible, significativa, sencilla de manejar y capaz de representar adecuadamente el concepto y los parámetros correspondientes. Los indicadores deben contener, en su formulación, las variables y parámetros siguientes:

- Cantidad
- Calidad
- Tiempo
- Valor
- Población objetivo
- Espacio geográfico

g. Sector administrativo-institucional; jurisdicción

Cuadro 1. Ejemplos de indicadores básicos relacionados con el análisis del CGA, por cuenca

Indicador	Elementos de análisis
1. Cantidad de agua	Variación de la esorrentía
	Oferta hídrica
	Reserva de agua subterránea
2. Calidad del agua	Demanda bioquímica de oxígeno
	Concentración de sedimentos
	Déficit de oxígeno disuelto
3. Área afectada por desbordamientos e	Eventos o variaciones extremas

hidrográfica.

inundaciones	Exposición -Vulnerabilidad de terrenos
4. Área afectada por sequía o escasez de agua	Eventos o variaciones extremas
	Exposición- Vulnerabilidad de terrenos
5. Frecuencia a deslizamientos y movilización de terrenos	Estabilidad de terrenos y pendientes
	Grado de protección del suelo
	Exposición- Vulnerabilidad de terrenos
7. Índice/Área de cobertura vegetal permanente	Áreas protegidas o de conservación
	Manejo de bosques, reforestación y regeneración natural
	Cultivos permanentes y agroforestería
8. Área de suelos degradados	Porcentaje de tierras alcalinizadas o salinizadas
	Compactación de suelos
	Erosión de suelos (pendientes)
	Quemas e incendios
	Usos inapropiados del suelo (conflictos)
9. Nivel de organización y participación de actores relacionados al manejo del recurso hídrico	Organismo de cuencas con competencia establecida o Comités Interinstitucionales
	Organizaciones locales participando en comités de cuencas
	Organizaciones comunitarias o municipales que realizan actividades de cuencas (Juntas de agua)
10. Ámbito de planificación y ejecución de planes y proyectos para el manejo de cuencas	Planes y proyectos elaborados
	Planes y proyectos ejecutados
	Organizaciones que participan en la planificación e implementación de planes y proyectos de cuencas

Los resultados se deben representar en la escala cantonal y, si es posible distrital o comunal, con la ventaja de que la gestión, al realizarse por cuenca hidrográfica, permite realizar calibraciones y ajustes relacionados con la planificación territorial.

Por otro lado, las situaciones derivadas de los eventos hidrometeorológicos y climáticos extremos, como por ejemplo las inundaciones y las sequías, deben modelarse probabilísticamente, en tanto que casos específicos y para cada área estudiada, cantón, distrito y/o cuenca hidrográfica. En la Figura 4, se resumen los procesos de reajuste a la planificación territorial, según el contexto respectivo. Contar con un modelo hidrológico actualizable, en el ámbito de la cuenca hidrográfica y su traslado al ámbito local, permite analizar los efectos y consecuencias, al modificarse el escenario base, así sea por causa de la variabilidad climática, el calentamiento global antropogénico y/o por los cambios en el uso de la tierra proyectados. Desde ahí, se pueden ajustar los componentes de: a) recurso hídrico, b) recurso del suelo, c) ecosistema y biodiversidad, d) sistemas agrícolas, forestales, y pecuarios, y d) salud humana. En el caso de los eventos extremos, estos requieren de un tratamiento especial.



Figura 4. Reajustes a la planificación territorial, por medio del enfoque por cuencas hidrográficas

A manera de ejemplo, se puede citar que el CATIE, a través del proyecto TROFCCA (2010), inició sus aplicaciones con la herramienta Soil and Water Assessment (SWAT), (ver <http://swat.tamu.edu/>), el cual consiste de un modelo físico hidrológico, basado en la integración de eventos continuos, desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo de la tierra y del agua, la erosión, los sedimentos y las propiedades químicas de las áreas agrícolas. El modelo es útil para analizar cuencas complejas, con variaciones de los suelos, del uso de la tierra y de las condiciones de manejo a lo largo de períodos largos.

Para la simulación, la cuenca se subdivide en un número de subcuencas homogéneas (unidades de respuesta hidrológica o HRUs) con propiedades únicas de sus suelos, pendientes y uso de la tierra. La información de entrada, para cada subcuenca, es agrupada en categorías de clima, las áreas únicas de uso de la tierra, suelos y el manejo dentro de las subcuencas, lagos/embalses, agua subterránea y el cauce principal que drenan la subcuenca.

La carga y el movimiento de la escorrentía, sedimentos, nutrientes y pesticidas que descargan hacia el canal principal, por cada subcuenca, se simulan mediante el efecto de los diferentes procesos físicos que influyen el régimen hidrológico.

En la actualidad, el programa SWAT puede ejecutarse por medio de software como ArcGIS y QGIS (<http://swat.tamu.edu/software/>) y se ha creado acceso a bases de datos y escenarios para diferentes partes del mundo, incluida Costa Rica (<http://swat.tamu.edu/software/links/>).

Una vez establecido el escenario base, se pueden hacer simulaciones mediante la variación de los datos del clima, al considerar las anomalías o variabilidad del mismo y mediante ajustes a la información acerca del uso de la tierra y la rezonificación, como medida primaria de adaptación al calentamiento global antropogénico (ACGA), con las ventajas adicionales aportadas por la capacidad de:

- Revisión del comportamiento de la escorrentía superficial y de la disponibilidad del agua por efecto del manejo del uso de la tierra y de la mejora de la eficiencia del aprovechamiento.
- Mejora de la fertilidad del suelo, por efecto de la aplicación de prácticas de rehabilitación y conservación en el ámbito de la finca.
- Reducción de los niveles de erosión de los suelos por efecto de la aplicación de prácticas y obras de conservación.
- Disminución de las amenazas ambientales, debido a la aplicación de las técnicas de manejo de cuencas.

En la Figura 4 se resumen algunas salidas de ArcSwat, relacionadas con el balance hidrológico y el balance erosión-sedimentación.

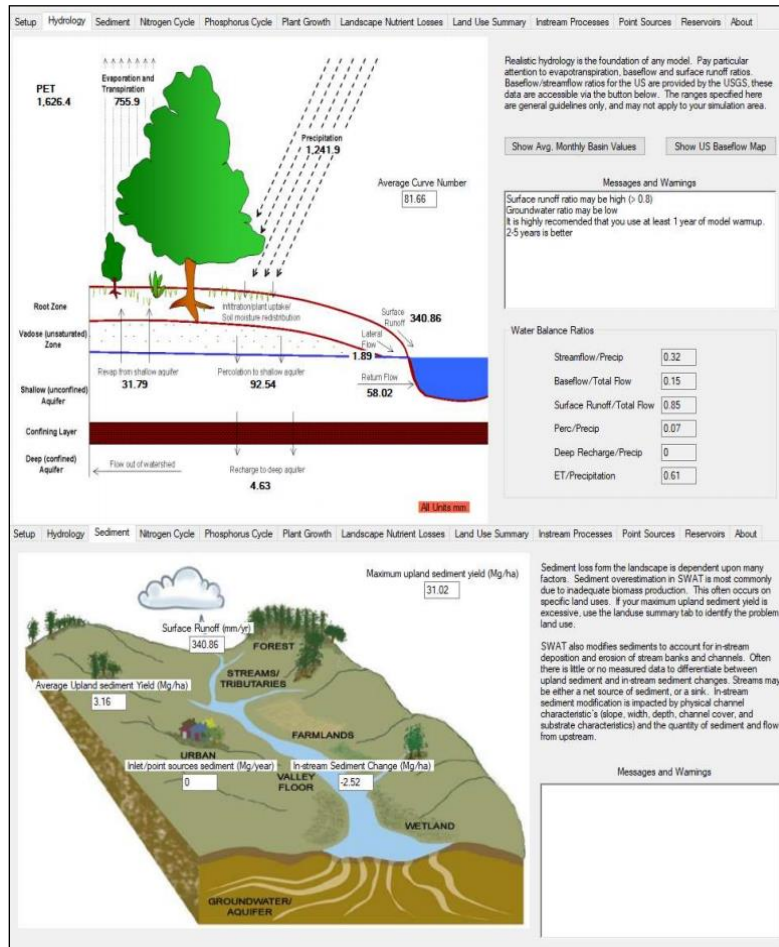


Figura 4. Ejemplo de datos de salida del SWAT

Los datos requeridos, son:

- Modelo numérico del terreno (corregido hidrológicamente), escala 1:25,000
- Mapa del suelos/taxonómico en el ámbito orden I, escala 1:50,000 o 1:25,000
- Variables climáticas para un período homogéneo, que incluyen estaciones, por lo menos datos mensuales de 1) precipitación, 2) temperatura, 3) evaporación (sino hay, el programa lo calcula, 4) radiación solar, 5) humedad relativa, 6) viento.
- Uso de la tierra actualizado, escala 1:25,000.
- Otras variables, como contaminación, vulnerabilidad, etc. pueden modelarse

2. Análisis de los eventos extremos y su evolución, por influencia del calentamiento global antropogénico

La incidencia del CGA, en el mediano y largo plazo, sobre las dimensiones del riesgo (i.e. amenazas y vulnerabilidad) ha sido descrita por un número considerable de autores, quienes sostienen que, desde ya, se está produciendo un “delta-gradiente” en la intensidad y frecuencia de las AHMC, particularmente aquellas ubicadas en los extremos de la variabilidad climática (Figura 5). Aunque este escenario todavía no puede ser cuantificado de manera precisa, e incluso está sometido a

debates y controversias (Grey, 2010), tampoco debe ser descartado, sobre todo si las causas globales no son controladas por sus responsables principales (i.e. emisiones de gases, vapores y partículas a efecto de invernadero -GVP-EI) (Mora, 2012).

Aun así y, de todas maneras, parece más plausible que las dimensiones del riesgo se vean más afectadas, en los mismos plazos, por el incremento (“delta gradiente”) de la vulnerabilidad.

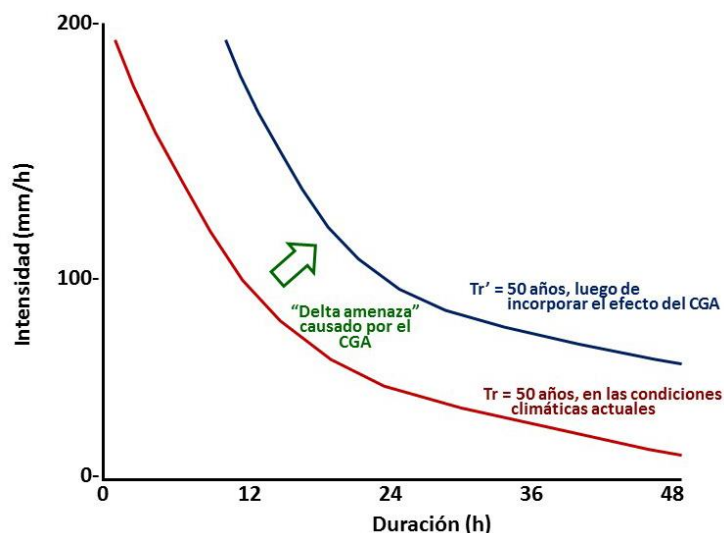


Figura 5. Modificación esquemática de la curva IDF para las lluvias, con un período de recurrencia de $Tr = 50$ años, por el efecto del calentamiento global antropogénico (CGA).

Tómese en cuenta que, cuando se trata de estimar el impacto de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas (AHMC), el análisis debe incorporar el efecto del CGA, por lo que se requiere de la aplicación de modelos probabilísticos y de su interpretación a través de una visión no-estacionaria, es decir, a lo largo de los horizontes temporales definidos (e.g. 30, 50, 100 años plazo). Sin embargo, los análisis hidrológicos e hidráulicos clásicos no alcanzan a proveer una elasticidad suficiente como para cubrir todo el espectro de la cobertura espacio-temporal requerido, cuando se trata de los plazos mediano y largo.

Más allá de los datos históricos derivados de los eventos ciclónicos, marejadas, avenidas y lluvias extremas que pueden generar los desbordamientos y las inundaciones, e igualmente las sequías, la erosión intensa de suelos y la inestabilidad de laderas, los modelos deben apoyarse en la elaboración de modelos y escenarios probabilísticos que permitan la inclusión de la generación de eventos extremos, cuyos umbrales deben ser escogidos de manera racional y aplicando el mejor juicio y experiencias disponibles.

De la misma manera, los modelos globales y sus procedimientos de “*downscaling*”, son capaces de ofrecer puntos de referencia que pueden ser tomados en cuenta de manera juiciosa. Sin embargo, la experiencia indica que estos modelos y escenarios son muy sensibles a los efectos de escala y resolución, sobre todo cuando se pretenden aplicar en escalas locales y en la generación de eventos estocásticos sin una debida calibración.

De manera alterna y, como opción y/o complemento, cuando no se dispone de datos suficientes para sustentar los cálculos probabilísticos, la generación de series temporales, mediante un procedimiento determinístico, basado en la mejor información disponible, puede ser una opción válida, mientras sus resultados sean sometidos a un procedimiento cuidadoso y detallado de validación.

Como resultado de todas estas consideraciones, se pueden generar escenarios múltiples, de acuerdo con las variaciones esperadas en las lluvias, la temperatura, viento y nivel del mar. En la Figura 6 se indican algunos escenarios, no exhaustivos, de los parámetros y condiciones que deben ser tomados en cuenta a la hora de realizar el análisis de las AHMC, una vez que hayan sido establecidos los parámetros que indiquen las variaciones provocadas por el CGA. Un análisis similar puede realizarse para el caso de los efectos e impactos positivos causados por las variaciones en las condiciones hidrometeorológicas y climáticas.

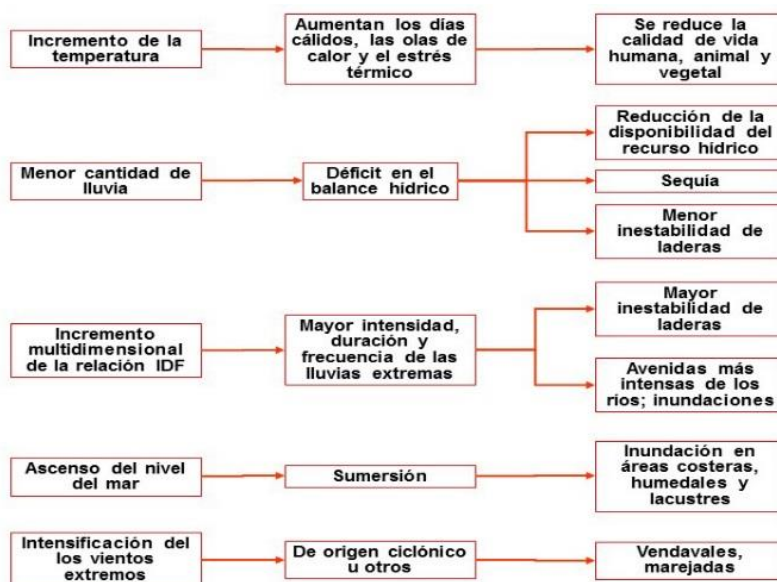


Figura 6. Algunos escenarios (no exhaustivos) de las condiciones que pueden surgir, luego de los cambios negativos en las condiciones y parámetros de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas. Un análisis semejante puede realizarse para los escenarios más bien positivos.

Enseguida, uno de los pasos estratégicos clave, para orientar la gestión del riesgo (Mora y Keipi, 2006) es el procedimiento para la determinación de los daños y pérdidas potenciales, es decir, el cálculo del riesgo, propiamente dicho. Sin embargo y no obstante existe una multitud de procedimientos para este tipo de determinaciones, debe tomarse en cuenta que solamente unas pocas metodologías cumplen cabalmente con los requisitos y condiciones de calidad y precisión requeridos, por tres razones básicas que deben tomarse en cuenta y que deben ser resueltas antes de proceder al análisis: i) La cantidad, calidad y extensión temporal suficiente y robusta de datos para describir, los valores y personas expuestos a las pérdidas y daños, ii) la capacidad de escoger o diseñar los algoritmos de convolución para asociar las amenazas con la vulnerabilidad específica y iii) la transparencia a la hora de mostrar las incertidumbres resultantes de los cálculos realizados (Mora, 2010).

Estos tres factores deben ser tomados en cuenta de manera detallada, sobre todo cuando la información será utilizada para efectos de la zonificación del uso de la tierra, de la reducción de la exposición a las amenazas, para el diseño de obras de infraestructura, la protección de la vida humana, la re-calibración de las tendencias del efecto del CGA, la identificación de los pasivos contingentes y los instrumentos de la retención y transferencia financiera del riesgo.

La metodología planteada, para el análisis de los eventos extremos (e.g. huracanes, marejadas, vendavales, sequías) corresponde a un ideal a realizar. Sin embargo, existe el obstáculo de que no se cuenta con análisis probabilísticos de las amenazas y, sobre todo, de la vulnerabilidad en el ámbito nacional.

Por el momento, los deltas de amenazas o anomalías, para diferentes períodos de recurrencia, ligados a los eventos hidrometeorológicos extremos, todavía no se han establecido en Costa Rica de manera sistemática (se espera que en el futuro sí estén disponibles), excepto para las obras hidroeléctricas y en algunas cuencas hidrográficas específicas. En cuanto a la inestabilidad de laderas, los modelos toman en cuenta las lluvias de 24 horas y/ o de 72 horas, para un período de recurrencia de 100 años. Para los aludes torrenciales, los análisis solo muestran las “manchas” (i.e. zonas de influencia de los eventos históricos), pero no se han realizado modelos ni escenarios retrospectivos ni predictivos. Algo similar ocurre con los modelos y escenarios de las marejadas, tsunami, sequías y para otros tipos de amenazas hidrometeorológicas y climáticas. En otras palabras, la intensidad, duración, frecuencia, celeridad de gestación y distribución espacial asociada a cada amenaza, no se ha estudiado en el ámbito cantonal ni por cuenca hidrográfica, por lo que no se cuenta, por ahora, con las bases suficientes para incluir y analizar los deltas de las amenazas. Es de suponer que, en el futuro, si se habrá realizado el proceso y que, con ello, será posible considerar la forma como será modificada la variabilidad climática por el calentamiento global antropogénico.

3. Análisis de los ecosistemas

El consenso científico señala que hay perturbaciones en los patrones hidrometeorológicos que afectan el entorno, pero *“...todavía no hay conocimientos suficientes para comprender, con precisión, la amplitud de los efectos locales... respectivos, más allá de algunas tendencias y síntomas que comienzan a evidenciarse...”* (Mora, 2012)

Bajo esta misma premisa, se podría decir entonces, que es posible que existan situaciones locales de cambios ambientales causados por el calentamiento global antropogénico (adicionales a los naturales, causados por variabilidad climática y los provocados por las actividades humanas) en los ecosistemas, en un período corto definido por la percepción de la memoria histórica local.

El primer instrumento de aproximación sencilla aplicado, para analizar los efectos del CGA sobre los sistemas naturales, en el marco del ordenamiento territorial, ha sido el abordaje desde los servicios ecosistémicos (llamados también ambientales y naturales).

Como parte de la determinación de los posibles impactos del CGA, la propuesta tiene como propósito servir de herramienta de análisis en el marco de la elaboración de los planes de re-ordenamiento territorial. Su alcance, por lo tanto, se refiere a dichos procesos territoriales y no a los detalles exhaustivos de carácter científico sobre los sistemas que se analizan. El momento para

efectuar el análisis será durante la fase 3 del proceso de elaboración del plan de ordenamiento territorial.

Las fuentes y los sujetos de información que alimentan el análisis, deberán proceder del diagnóstico ambiental del plan de ordenamiento territorial: i) talleres de participación ciudadana (i.e. elaboración de diagnósticos participativos locales que permitan, en etapas de gestión del plan de OT, efectuar prácticas sistemáticas de observación sobre el clima en los ecosistemas y sus efectos, como se sugiere en el Programa Euroclima, 2014), ii) las consultas a expertos, iii) la consulta a instituciones vinculantes y el criterio del equipo consultor, iv) publicaciones científicas, en medios impresos y electrónicos, v) modelos y las simulaciones probabilísticas, efectuadas de manera paralela en los temas de amenazas y gestión del riesgo.

El análisis se efectúa elaborando una tabla-matriz para cada sistema natural, con el objeto de tener correspondencia con el abordaje del factor biológico que contiene el Manual de Evaluación Control y Seguimiento para Planes Ordenamiento Territorial de la SETENA. Para apoyar la visualización espacial del análisis, se debe utilizar un software SIG para generar un mapa con la ubicación de los cambios observados en el sistema, los cambios estimados y la ubicación puntual de las acciones de mitigación/adaptación.

El enfoque será sobre los servicios ambientales o ecosistémicos, que constan de (según Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005; mencionado por Estado de la Nación), entre otros:

- Aprovechamiento o suministro: facilitan bienes materiales como la comida, el agua, la madera, las plantas medicinales o la generación de energía; casi siempre tienen un valor económico en los mercados.
- Regulación: son las funciones vitales de los ecosistemas; normalmente no se les reconoce un valor económico.
- Culturales: no incluyen bienes materiales, pero permiten satisfacer otro tipo de necesidades y deseos de las personas (recreación).
- Soporte: son aquellos que se necesitan para el funcionamiento de los ecosistemas y, aunque no benefician directamente a las personas, resultan indispensables para que los otros servicios puedan existir.

Para cada área de estudio se definirán los indicadores, según los tipos de servicios ecosistémicos. Quétier y otros (2007), señalan que, “en términos prácticos, los servicios se miden eligiendo propiedades ecológicas relevantes como indicadores de los servicios ecosistémicos”.

Cuadro 2. Matriz de análisis del efecto del cambio climático antropogénico sobre los sistemas terrestres, de agua dulce y marino-costeros en el contexto de los planes de ordenamiento territorial (POT's)

Sistema	Indicadores	Estado ideal (escenario actual)	Cambios observados ¹ (escenario tendencial de las perturbaciones percibidas)	Cambios estimados (escenario futuro)	Impactos previsibles ²	Estrategias de adaptación/mitigación ³
Terrestre/ agua dulce/ Marino-costero	Servicio de aprovisionamiento: i1 i2 i3 Servicio de regulación: i1 i2 i3 Servicio cultural: i1 i2 i3 Servicios de soporte: i1 i2 i3	Los verificadores del estado ideal del sistema, serán los indicadores establecidos en la columna anterior.	Por cada indicador, se señalan los patrones de cambios que evidencian modificaciones leves, moderadas o graves sobre el sistema. Los cambios deben mostrar las alteraciones en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas.	De persistir la situación de cambio observado, por cada indicador se señalan los patrones de cambios que se presume ocurrirán a nivel de modificaciones leves, moderadas o graves sobre el sistema.	Según el nivel de modificación del cambio estimado, se determinan los impactos sobre el sistema (en la medida de los posible, se clasificará el impacto según el nivel de irreversibilidad).	Definición de estrategias para sistemas/especies clave. Acciones conjuntas para mitigación de procesos físicos, aumentados por eventos extremos, que alteran directa o indirectamente a los sistemas (p.e. erosión, sedimentación, inundación, tormentas) Monitoreo/seguimiento de los indicadores escogidos (tarea interinstitucional)

Los cambios en la variabilidad climática, en los extremos y en los valores medios determinan los impactos del calentamiento global antropogénico sobre los ecosistemas. La variabilidad y los extremos climáticos pueden también ser influenciados de forma recíproca con otras presiones derivadas de la actividad humana (IPCC, 2002).

² Se espera que el calentamiento global antropogénico puede afectar a individuos, poblaciones y especies y a la composición de los ecosistemas y sus funciones, ya sea directamente (mediante una subida de las temperaturas, cambios en las precipitaciones y, en el caso de sistemas acuáticos, cambios también en la temperatura de las aguas, del nivel del mar, etc.) e indirectamente (por ejemplo en la intensidad y frecuencia de alteraciones como por ejemplo, los incendios forestales). Los impactos del calentamiento global antropogénico van a depender de otros procesos importantes, entre los que figuran la pérdida o fragmentación del hábitat (o su unificación—por ejemplo, en el caso de cuerpos de agua previamente aislados en sistemas de agua dulce) y la introducción de especies no autóctonas (especialmente especies invasoras). (IPCC, 2002).

Ejemplos de impactos previsibles (según Valladares, s.f): migraciones altitudinales y latitudinales (flora/fauna), expansión de plagas y especies invasoras, cambios en comunidades/poblaciones/especies dominantes, desajustes en ciclos biogeoquímicos que alteran las funciones del ecosistema, desajustes en reservorios hídricos (áreas de captación), disminución en la capacidad de secuestro de carbono, incremento del impacto de las perturbaciones (sequía, inundación, erosión, incendios forestales).

³ Las actividades para la adaptación (proyectos y políticas) diseñadas específicamente para reducir el impacto del cambio climático tienen que ser consideradas junto con las opciones para mitigación. Las opciones para la adaptación se pueden aplicar a los ecosistemas gestionados de manera intensiva y a los gestionados de forma no intensiva. Las actividades para la adaptación pueden tener impactos adversos o beneficiosos sobre la biodiversidad (IPCC, 2002).

4. Enfoque práctico

No se dispone, por ahora, de las condiciones para aplicar los métodos probabilísticos anteriormente descritos, se espera que sean factibles de realizar en el futuro. Mientras tanto, se propone la aplicación de procedimientos determinísticos, mediante la utilización usando los modelos de amenazas y considerando los deltas en las entradas de la información relacionada con el calentamiento global antropogénico, tomando en cuenta los estudios existentes y el criterio de experto.

Todos los modelos que se utilizan, se basan en los métodos conocidos en Costa Rica, esto es, en la modelación hidrológica-hidráulica de las amenazas de inundaciones. Se sustentan en hidrogramas pico o curvas IDF, donde es posible considerar incrementos por CGA, o bien la modelación hidrológica de una cuenca hidrográfica, donde los modelos se simplifican, en a) balances hídricos, b) modelo de recarga hídrica, c) modelos de erosión, d) modelos de inestabilidad de laderas, con el elemento en común las variables climáticas y deltas, o aumentos (análisis de sensibilidad), que por ahora sustituyen la falta de información que será suplida conforme los escenarios produzcan datos locales vía el “*downscaling*”.

5. Discusión

El análisis del CGA se fundamenta en los cambios de las condicionantes y potencialidades dañinas de cada amenaza relacionada al clima y el recurso hídrico y por ende, al ecosistema, cuyo análisis permite considerar el aumento o disminución de su efecto e impacto y considerar un uso de la tierra más seguro, sostenible y resiliente, mediante una zonificación territorial efectiva.

Se propone que los mapas respectivos sean tomados en cuenta en la zonificación final, lo cual permita realizar ajustes a la misma y, conforme se disponga de mayor y mejor información predictiva del clima, mediante escenarios o análisis probabilísticos, se incorporen en las propuestas de re-ordenamiento territorial.

6. Conclusiones y recomendaciones

El nivel requerido de los datos y de la información procesada y preparada en cuanto a CGA, así como la construcción de escenarios del CGA en el ámbito local, no está preparada a la fecha, para establecer los insumos para los modelos utilizados en la planificación territorial. Por esta razón hay que recurrir a la información estadística/probabilística mediante técnicas basadas en las series climáticas existentes y la que se puedan incorporar la información proveniente de la percepción remota y de base de datos que se realizan para incorporar la variabilidad climática.

Los métodos presentados son factibles de realizar, pero implican la participación de todas las instituciones e involucrados, pues su aplicación lógica y acertada conlleva al análisis por cuenca hidrográfica que escapa a los objetivos del ámbito territorial del cantón.

Basado en los procedimientos presentados, hay modelos simplificados en Costa Rica, que pueden utilizarse para considerar el CGA, aplicando el análisis de sensibilidad, el conocimiento experto en el área local y la historia amparada en fotografías aéreas y con un horizonte limitado temporal, el conocimiento local.

7. Referencias bibliográficas

Mora, S. 2012. La gestión del riesgo para enfrentar los mitos y realidades del calentamiento global antropogénico. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • Nº 28 • 111 - 125 • 2012 • Buenos Aires, Argentina.

https://www.academia.edu/12281400/La_gesti%C3%B3n_del_riesgo_para_enfrentar_los_mitos_y_realidades_del_calentamiento_global_antropog%C3%A9nico Risk management to face myths and realities of anthropogenic global warming

IPCC WG III (2014): Assessment Report 5: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.
<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>

Gray, W. 2010. Gross errors in the IPCC-AR4 report regarding past and future changes in global tropical cyclone activity (a Noble Disgrace). Science and Public Policy Institute. 122pp.
<http://hurricane.atmos.colostate.edu/Includes/Documents/Publications/gray2011.pdf>

M. Lizano & O. Lizano, Creación de escenarios de inundación en la Ciudad de Puntarenas ante el aumento del nivel del mar. Vol. XI, Nº21 (2010, ISS 2215-2458. INTERSEDES. www.intersedes.ucr.ac.cr

Mora, S. 2010. Disasters should not be the protagonists of Risk Management. Keynote speech at the 11th International Congress, International Association of Engineering Geologist and the Environment. Auckland, New Zealand. 2010. 18pp.
https://www.researchgate.net/publication/275970692_Disasters_should_not_be_the_protagonists_of_Disaster_Risk_Management?ev=prf_pub

Mora, S; Keipi, K; 2006. Disaster Risk Management in development projects: models and checklists. Bull. Engineering Geology and the Environment (2006) 65:155-165. DOI 10-1007/s10064-005-0022-1;
https://www.researchgate.net/publication/242686608_Disaster_risk_management_in_development_projects_models_and_checklists

Wilby, R; Mora, S; Abdallah, A; Ortiz, A. 2010. Confronting climate variability and change in Djibouti through risk management. *Geologically Active – Williams et al. (eds). © 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60034-7.* 11th International Congress, International Association of Engineering Geology and the Environment; Auckland, New Zealand. pp. 511-522.
https://www.researchgate.net/publication/275960222_Confronting_climate_variability_and_change_in_Djibouti_through_risk_management