

ESTADO DEL ARTE BASADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE  
CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA PROYECCIÓN FUTURA DE CAUDALES MEDIOS  
ANUALES EN EL MARCO DE ESTUDIOS DE IMPACTO

LILIANA PAOLA CASTILLO LORA

MELISSA ANDREA VIDES CARRASCAL

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMAS DE INGENIERÍA CIVIL E INGENIERÍA AMBIENTAL

CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

JUNIO DE 2014



Universidad  
Tecnológica  
de Bolívar



ESTADO DEL ARTE BASADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE  
CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA PROYECCIÓN FUTURA DE CAUDALES MEDIOS  
ANUALES EN EL MARCO DE ESTUDIOS DE IMPACTO

PRESENTADO POR:

LILIANA PAOLA CASTILLO LORA

MELISSA ANDREA VIDES CARRASCAL

ASESOR DE TESIS:

OSCAR ENRIQUE CORONADO HERNÁNDEZ

INGENIERO CIVIL. MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMAS DE INGENIERÍA CIVIL E INGENIERÍA AMBIENTAL

CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

JUNIO DE 2014



## **DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS**

*Doy gracias primeramente **Dios** por estar al frente de cada decisión y acción que realicé durante esta etapa de mi vida, que me enseñó que todo es parte de un propósito y que siempre me recuerda que con fe y esperanza, todo es posible.*

*A mi madre **Rosalía Lora Arrienta**, mi apoyo incondicional, mi consejera en todo momento, quien me enseñó que a pesar de las circunstancias, lo que vale es la persistencia y la resistencia, y que todas las experiencias que vivamos, buenas o malas, todo, nos sirve para bien.*

*A mi padre **Arturo Castillo Sánchez**, quien ha depositado plenamente su confianza en mi y me anima a no conformarme con mi presente, sino a ser una mujer de grandes misiones y visiones.*

*A mi profesor **Oscar Coronado**, mi asesor, quien durante mi estancia en la universidad, me motivó siempre a hacer las cosas bien, a darlo todo y a tener grandes proyecciones.*

*A mi profesor **Victor Fernández**, como olvidarlo profe, gracias por creer en mí, por su apoyo incondicional, no solo como docente, sino como un padre, como mi amigo.*

*A mi profesor **Germán Castaño**, por todo el apoyo entregado para la realización de diversas actividades tanto en la Universidad, como externas.*

*A todos mis amigos y familiares, porque de alguna manera me han ayudado en la toma de decisiones importantes para mi vida.*

**LILIANA PAOLA CASTILLO LORA**



*Doy gracias a **Dios** y a su inifinito amor; pues con cada logro y bendición siento su presencia incólume en mi vida. Le doy infinitas Gracias por hacer posible lo que alguna vez consideré imposible.*

*Gracias a mi mamá **Luz Isabel Carrascal Nieves** por confiar y creer en mi, por demostrarme cada día su capacidad de entregarse sin medida a sus hijos y de mantenerse orgullosa de nosotros pese a las adversidades. Gracias mami por ser una mujer excepcional y la mayor bendición de mi vida.*

*Gracias a mi papá **Mariano Vides Barriga** por ser mi ejemplo, por enseñarme día a día el valor del esfuerzo y la dedicación; gracias papi por apoyarme y mostrarte siempre atento a mi bienestar personal y profesional.*

*Gracias a mis hermanos, **Harold** y **MaryLuz** por ser los mejores hermanos mayores del mundo, por preocuparse por mi y por quererme tanto pese a la distancia.*

*Gracias a mis profesores y a todos aquellos que contribuyeron directa o indirectamente en mi formación profesional, en especial a mi profesor **German Castaño** por confiar en mis capacidades y por aportar de manera cordial y desinteresada al aprendizaje de los estudiantes.*

**MELISSA VIDES CARRASCAL**

## Tabla de contenido

<b>INDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>5</b>
<b>INDICE DE TABLAS .....</b>	<b>7</b>
<b>ABREVIACIONES DE TÉRMINOS .....</b>	<b>8</b>
<b>1. RESUMEN.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1. ABSTRACT.....</b>	<b>10</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>12</b>
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
<b>Objetivos Generales.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1. Objetivos específicos: .....</b>	<b>14</b>
<b>4. GLOSARIO .....</b>	<b>15</b>
<b>5. EL CLIMA .....</b>	<b>23</b>
<b>5.1. CAMBIO CLIMATICO.....</b>	<b>26</b>
<b>5.2. MODELOS GLOBALES DE CAMBIO CLIMATICO.....</b>	<b>28</b>
<b>5.3. ESCENARIOS DEL IPCC .....</b>	<b>34</b>
<b>6. SIMULACIÓN Y CREACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO .....</b>	<b>40</b>
<b>6.1. REANALISIS.....</b>	<b>54</b>
6.1.1. Reanálisis NCEP/NCAR.....	54
6.1.2. Reanálisis ERA40.....	54
<b>6.2. TECNICAS DE REGIONALIZACIÓN .....</b>	<b>55</b>
6.2.1. TECNICA DE REGIONALIZACIÓN DINÁMICA .....	55
6.2.2. TECNICA DE REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA.....	73
6.2.2.1. Descripción del método de análogos FIC (Fundación para la Investigación del Clima, Madrid- España): .....	79
6.2.2.2. Modelo de Regresión SDSM:.....	81
<b>7. EXPLICACION DE BALANCE HIDRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES MEDIOS ANUALES.....</b>	<b>86</b>
<b>7.1 Estimación de Caudales medios anuales. ....</b>	<b>87</b>
<b>7.2 PROMEDIO DE LA EVAPORACIÓN REAL ANUAL DE LARGO PLAZO.....</b>	<b>89</b>
<b>8 USO DE MODELOS HIDROLÓGICOS .....</b>	<b>91</b>
<b>8.1 MODELO HIDROLÓGICO WEAP.....</b>	<b>91</b>



8.1.1	Generalidades del modelo .....	91
8.1.2	DATOS DE ENTRADA DEL MODELO HIDROLÓGICO.....	96
<b>8.2</b>	<b>PROYECCIONES BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....</b>	<b>96</b>
8.2.1	Generación de series de datos de entrada al modelo .....	96
<b>8.3</b>	<b>VALIDACIÓN DE MODELOS HIDROLOGICOS .....</b>	<b>99</b>
8.3.1	MODELO JERÁRQUICO .....	100
<b>9</b>	<b>EXPERIENCIAS EN COLOMBIA .....</b>	<b>105</b>
<b>10</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>108</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>112</b>
<b>11</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>114</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Ilustración 1.</b>	Vista esquemática de los procesos e interacciones del sistema climático.	
Fuente: (IPCC, 2007).	-----	25
<b>Ilustración 2.</b>	Emisiones futuras de gases invernadero según escenarios IE-EE del IPCC,	
(IPCC, 2007).	-----	39
<b>Ilustración 3.</b>	Cambios de temperatura previstos 1900-2100, (IPCC, 2007)-----	40
<b>Ilustración 4.</b>	Base de datos de variables climatológicas modeladas por diferentes MCG, de	
la base del IPCC.	-----	48
<b>Ilustración 5.</b>	Datos climatológicos ofrecidos por el modelo HADGEM1, para el escenario	
de cambio climático A1B, 2080-2099.	-----	49

**Ilustración 6:** Ejemplo del dominio de aplicación de un RCM sobre Europa con una rejilla de 50 km. La técnica de anidamiento (“nesting”) consiste en proporcionar al RCM información de la evolución de las variables atmosféricas en los puntos del contorno del dominio. Dicha información se obtiene previamente de la simulación con un AOGCM que utiliza una rejilla con resolución más baja (celdillas con mayor tamaño) -----57

**Ilustración 7** Esquema de uso de GCMs en RCMs. Fuente: (Viner, 2000) -----58

**Ilustración 8:** Diagrama de flujo, resumen del proceso operativo para la generación de escenarios de cambio climático a través de MCGs. -----85

**Ilustración 9: Esquema método de humedad del suelo** -----94

**Ilustración 10:** Modelos hidrológicos para la evaluación de cambio climático -----98

**Ilustración 11:** Ejemplo de aplicación de la prueba de muestra dividida diferencial. Obsérvese los segmentos seco y húmedo, y como el período que fue utilizado para la calibración es posteriormente utilizado para la validación. Fuente: (Klemes, 1986). ----- 103

**Ilustración 12.** Cambios en la temperatura del aire calculados a partir de la diferencia entre las temperaturas medias anuales de los períodos 1961-1990 y 2070-2100 (escenario B2 – izquierda; escenario A2 – derecha) Modelos PRECIS. Fuente: (IDEAM ,2008). --- 106

**Ilustración 13.** Cambios en la precipitación anual (en % del promedio multianual 1961-1990) calculados a partir de la diferencia entre las precipitaciones anuales de los períodos 1961-1990 y 2070-2100 (escenario B2 – izquierda; escenario A2 – derecha Modelos PRECIS. Fuente: (IDEAM, 2008). ----- 107

**Ilustración 14.** Tecnología utilizada por IDEAM para generar escenarios de cambio climático----- 107

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Características de los escenarios de cambio climático SRES (Carter et al., 1999); (IPCC, 2007).....	38
<b>Tabla 2.</b> Lista de GCM's para realizar simulaciones con escenarios 20C3M (período 1961-1999), A2 (períodos 2046-2065 y 2081-2100) y A1B (período 2010-2100), a escala diaria. Fuente: (Reyes, 2012).....	42
<b>Tabla 3.</b> Abreviaturas de Variables Modeladas Globalmente .....	50
<b>Tabla 4.</b> Datos Disponibles en el IPCC de Modelos Globales .....	53
<b>Tabla 5</b> Modelos de Circulación Regional .....	69
<b>Tabla 6.</b> Predictores utilizados en el proyecto escena. Las variables “3D” contienen información de los niveles 850, 700 y 500 hPa; las “2D” se refieren a datos de superficie “00” son valores instantáneos a las 00UTC; “DM” son medidas diarias y “D” son valores. ....	74
<b>Tabla 7 : Ventajas y desventajas de la regionalización dinámica y estadística. Fuente: Miguel Ángel Gaertner, José Manuel Gutiérrez y Manuel Castro. Escenarios regionales de cambio climático.....</b>	84
<b>Tabla 8:</b> Ejemplo de balance hidrológico de largo plazo para el modelo CCSM3 para la cuenca del Rio Magdalena. Fuente:.....	90
<b>Tabla 9:</b> Ejemplo Resultado de balance hidrológico de largo plazo para el modelo ECHAM5 para la cuenca del Rio Magdalena. Fuente: .....	90



## **ABREVIACIONES DE TÉRMINOS**

**AOGCMs:** Modelos de circulación general Océano y Atmosfera.

**IDEAM:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.

**IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático)

**GCM:** Modelo Global de cambio climático.

**GCMs:** Modelos Global es de cambio climático.

**RCM:** Modelo Regional de cambio climático.

**RCMs:** Modelos regionales de cambio climático.

**GEI:** Gases de efecto invernadero.

## 1. RESUMEN

Este documento pretende sugerir diferentes maneras de recopilar e interpretar la información pertinente, para proyectar la posible variabilidad climática en el futuro a través de la representación matemática y gráfica de variables climatológicas tales como la precipitación, la temperatura, la nubosidad, y su relación con el balance hídrico de largo plazo para la estimación de caudales medios anuales de determinada región del país. Esto con el fin de promover la realización de trabajos posteriores, que ayuden en la toma de decisiones en cuanto a la adaptación a eventos extremos causados por la intensificación de la variabilidad climática.

Se ha redactado para ser utilizado por organizaciones tanto gubernamentales como no gubernamentales, y así mismo para aquellas personas que deseen conocer la ciencia del cambio climático y las implicaciones de la misma en la definición de políticas y programas para el sector agropecuario, el manejo del recurso hídrico, y de los planes de ordenamiento territorial etc.

El contenido de este documento, pretende ser un soporte teórico para la creación y generación de escenarios de cambio climático para finalmente ser aplicados en el análisis y estudio de una determinada situación vulnerable a los efectos del clima. Es importante resaltar que, durante la proyección de escenarios de cambio, siempre existirá un grado de incertidumbre debido a que en la mayoría de los casos, nunca podrá existir una estimación definitiva sobre los impactos causados por el cambio climático y la vulnerabilidad frente a él.

Para poder interpretar la información sobre el cambio climático, primero se deben comprender los puntos de partida utilizados en la ciencia del clima, en la primera parte de este documento se proporciona una breve visión panorámica de la investigación sobre el clima y el impacto asociado al mismo, incluyendo algunas definiciones esenciales, que se constituyen actores o influyentes fundamentales en el estudio y comprensión de la ciencia del cambio climático, que en algunas ocasiones se no son tenidos en cuenta.

La segunda parte describe lo básico del modelado del clima, al igual que las distintas técnicas utilizadas para regionalizar la modelación, con el objetivo de proporcionar salidas más consistentes, confiables y encaminadas a situaciones más plausibles y probables por medio de los escenarios de cambio climático. Posteriormente se explicara el uso de técnicas y modelos hidrológicos para caracterizar el balance hídrico que proporcionarán principalmente los caudales medios anuales de los escenarios en cuestión, para visualizar de manera más práctica y evidente el impacto directo del cambio climático.

La última parte es de índole más práctica. Ofrece recomendaciones sobre cómo recopilar una base de información sólida sobre modelación de cambio climático a nivel regional, y de gran utilidad para aquellos que están planificando programas individuales o integrados en torno a este tema.

## 1.1. ABSTRACT

This document aims to suggest different ways to gather and interpret relevant information for projecting the possible weather variability in the future through mathematical and graphical representation of climatological variables such as precipitation, temperature, cloud cover, and its relationship with long-term water balance for the estimation of annual mean discharges of determined region. This is to promote subsequent works, which help in making decisions about adaptation to extreme events caused by the intensification of climatic variability.

It has been written to be used by both governmental and non-governmental organizations, and likewise for those who wish to know the science of climate change and the implications thereof in the definition of policies and programs for agriculture, resource management water, and plans of territorial code, etc...

The content herein is intended to be a theoretical support for the creation and generating of climate change scenarios to finally be applied in the analysis and study of a particular situation that present vulnerability to climate impacts. Is worth noting that, during the

screening of scenarios of change, there will always be some degree of uncertainty because in most cases, there can never be a definitive estimation of the impacts of climate change and the risks associated with this phenomenon.

In order to interpret information on climate change, you must first understand the starting points used in climate science, in the first part of this document is provided a brief overview of research on climate and the impact associated with it, including some key definitions that are key or influential actors in the study and understanding of the science of climate change, which sometimes are not taken into account.

The second part describes the basics of climate modeling, as well as the different techniques used to regionalize modeling, with the goal of provide more consistent, reliable and designed outputs intended to more plausible and probable scenarios through climate change situations. Subsequently will be explained the use of techniques and hydrological models to characterize the water balance which mainly provide average annual flow of the scenarios in question, to display in a most practical and obvious way the direct impact of climate change.

The last part is of a more practical nature. Provide recommendations for how to collect a solid base of information on climate change modeling at a regional level and very useful for those who are planning individual programs or integrated around this topic.

## 2. INTRODUCCIÓN

La variación del clima, ha tenido gran impacto económico, social y ambiental en un país como Colombia, en el cual su desarrollo se basa en la explotación intensiva de los recursos naturales y del uso de la tierra para diversos fines que permiten el crecimiento y progreso en todas sus escalas.

Debido a las constantes alteraciones que el hombre ha originado sobre el clima actual y el grado de incertidumbre que se tiene acerca de su comportamiento en el futuro, constituye un peligro sobre la hidrología y la disponibilidad de los recursos hídricos, los cuales se traducen en la modificación de la escurrentía superficial en términos de inundaciones, crecientes, sequías y la recarga de los acuíferos.

Los diseños hidrológicos tradicionales que en la actualidad se sigue utilizando, se basan en representaciones históricas del comportamiento de variables hidrométricas, pluviométricas o pluviográfica entre otras, asociadas a un periodo de retorno para la determinación de eventos extremos que pueden ocasionar severas implicaciones relacionadas con el dimensionamiento de proyectos de ingenieriles, bajo la hipótesis de un sistema climático invariante, en que sus propiedades medias se mantienen. Pero la realidad del mundo actual indica que estamos en un período de extraordinarias tasas de cambio climático, los cuales puedan afectar a las condiciones climáticas locales, con impacto directo en los patrones de precipitación y drenaje urbano. En los últimos años, varios estudios se han centrado en poner de manifiesto la naturaleza, el alcance y las consecuencias del cambio climático en el drenaje urbano y los problemas de contaminación de escurrentía urbana.

Con la intensificación de las variables ambientales por efecto del cambio climático, el uso de la información climática histórica puede ser ahora cuestionable (peligrosa e incierta) en el diseño y operación de los sistemas hidráulicos. El cambio climático es un proceso paulatino real, por lo que es necesario analizar sus posibles repercusiones en la planeación, operación y gestión de los recursos hídricos e hidráulicos.

Por otra parte, el Cambio Climático debe ser reconocido como un problema de gestión de riesgo, en donde éste, es el resultado de combinar una amenaza y una vulnerabilidad a dicha amenaza. Cuando el riesgo se materializa ocurre un desastre y por ello se ha tratado de estimar cual es el nivel crítico de riesgo ante cambio climático que podemos tolerar.

Colombia es un país altamente vulnerable a variaciones en el clima; los impactos negativos de sequías o inundaciones, aun siendo parte de la variabilidad natural del clima, se convierten con frecuencia en desastre. Sin embargo, aún es común escuchar que los desastres, mal llamados naturales, son impredecibles y cada vez más frecuentes debido a que “la naturaleza fue impredecible o se puso en nuestra contra”. Recurrir a este paradigma naturalista lleva a que la sociedad juegue un papel pasivo ante un elemento activo como el clima. Las implicaciones de esta visión, hacen que estado y sociedad no asuman las responsabilidades inherentes a toda organización en materia de seguridad, al no reconocer la influencia de los procesos sociales, económicos y políticos en la construcción de la vulnerabilidad.

El desafío actual, es lograr cambiar la gestión del riesgo de remediación o emergencista (reactiva) a preventiva (proactiva), reduciendo la corrección de problemas sobre la marcha para consolidar la aplicación de alternativas de acción. Para ello, es necesaria una adecuada evaluación de ventajas, y desventajas de las acciones mediante escenarios de impacto.

Por lo anterior se hace necesario actualizar las estrategias analíticas utilizadas para el estudio del comportamiento del balance hidrológico del país, teniendo en cuenta la modelación y simulación del comportamiento de las variables climatológica en escenarios futuros, haciendo uso de modelos climatológicos regionales que puedan analizar los efectos del cambio climático en las series de precipitaciones y otras variables climatológicas.

### **3. OBJETIVOS**

#### **Objetivos Generales**

Revisar bibliográficamente los principales factores a tener cuenta para la proyección de escenarios de cambio climático, mediante la implementación de modelos de circulación general y las diferentes técnicas de escalamientos regionales; a manera de guía para futuros estudios hidrológicos, hidráulicos y de toma de decisiones para la prevención del riesgo en una o varias zonas de interés.

#### **3.1. Objetivos específicos:**

- Referenciar distintos modelos globales y regionales de cambio climático, teniendo en cuenta las bondades y las dificultades que han presentado a la hora de su validación, en distintas experiencias de generación de escenarios.
- Resaltar las ventajas y desventajas del uso de técnicas de regionalización dinámica y estadística.

- Explicar el balance hídrico mediante modelos hidrológicos para la generación de caudales medios anuales para diversas zonas de estudio del país.

#### 4. GLOSARIO

**Algoritmo:** Es un conjunto de pasos para lograr un resultado, por lo general, un algoritmo tiene datos de entrada, proceso de datos, y datos de salida

**Adaptación:** Ajuste de los *sistemas humanos* o naturales frente a entornos nuevos o cambiantes. La adaptación al *cambio climático* se refiere a los ajustes en sistemas humanos o naturales como respuesta a *estímulos* climáticos proyectados o reales, o sus efectos, que pueden moderar el daño o aprovechar sus aspectos beneficiosos. Se pueden distinguir varios tipos de adaptación, entre ellas la preventiva y la reactiva, la pública y privada, o la autónoma y la planificada.

**Aerosoles:** Grupo de partículas sólidas o líquidas transportadas por el aire, con un tamaño de 0,01 a 10 mm, que pueden sobrevivir en la *atmósfera* al menos durante unas horas. Los aerosoles pueden tener un origen natural o *antropogénico*. Los aerosoles pueden tener influencia en el *clima* de dos formas diferentes: directamente, por dispersión y absorción de la radiación, e indirectamente, al actuar como núcleos de condensación en la formación de nubes o modificar las propiedades ópticas y tiempo de vida de las nubes.

**Antropogénico:** Resultante o producido por acciones humanas.

**Atmósfera:** Cubierta gaseosa que rodea la Tierra. La atmósfera seca está formada casi en su integridad por nitrógeno (78,1 por ciento de la proporción de mezcla de volumen) y por oxígeno (20,9 por ciento de la proporción de mezcla de volumen), junto con una serie de

pequeñas cantidades de otros gases como argón (0,93 por ciento de la mezcla de volumen), el helio, y *gases radiativos de efecto invernadero* como el *dióxido de carbono* (0,035 por ciento de la mezcla de volumen) y el ozono. Además, la atmósfera contiene vapor de agua, con una cantidad variable pero que es normalmente de un 1 por ciento del volumen de mezcla. La atmósfera también contiene nubes y *aerosoles*.

**Biosfera (terrestre y marina):** Parte del sistema terrestre que comprende todos los ecosistemas y organismos vivos en 70 la atmósfera, en la tierra (biosfera terrestre), o en los océanos (biosfera marina), incluida materia orgánica muerta derivada (por ejemplo, basura, materia orgánica en suelos y desechos oceánicos).

**Capacidad de adaptación:** Capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad climática y los cambios extremos) a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas.

**Capacidad de mitigación:** Estructuras y condiciones sociales, políticas y económicas que se requieren para una *mitigación* eficaz.

**Ciclo del carbono:** Término utilizado para describir el flujo de carbono (en varias formas, por ejemplo el dióxido de carbono) a través de la *atmósfera*, océanos, *biosfera* terrestre, y *litosfera*.

**Ciclo hidrológico (ciclo del agua):** es un término descriptivo aplicable a la circulación general del agua en la tierra. Con mayor precisión se puede decir que es una sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo, escurrimiento y nuevamente la evaporación.



**Circulación general:** Movimientos a gran escala de la *atmósfera* y los océanos como consecuencia del calor diferencial en la Tierra en rotación, con el objetivo de restablecer el equilibrio energético del sistema mediante el transporte de calor y el impulso

**Combustibles fósiles:** Combustibles basados en carbono de *depósitos* de carbono fósil, incluidos el petróleo, el gas natural y el carbón.

**Criosfera:** Componente del *sistema climático* que consiste en el conjunto de nieve, hielo, *permafrost*, por encima y por debajo de la superficie terrestre y oceánica.

**Condiciones de contorno/borde/frontera:** Son variables como presión atmosférica, viento, temperatura, humedad, temperatura de la superficie del mar, presencia de hielos etc. Estas son proporcionadas por los modelos globales GCMs en el escalamiento regional. Juegan un papel muy importante en la estabilidad y la coherencia de las salidas de los modelos globales.

**Convección oceánica:** Movimiento de las masas de agua oceánica debido a la diferencia de densidad o de peso específico que aparecen debido a las diferentes temperaturas. Esto produce que el fluido más frío circule hacia abajo y el más caliente hacia arriba, produciendo una corriente ascendente.

**Cuenca:** La zona de drenaje de una corriente, río o lago. Equilibrio energético del sistema mediante el transporte de calor y el impulso.

**Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):** Gas que se produce de forma natural, y también como subproducto de la combustión de combustibles fósiles y *biomasa*, cambios en el uso de las tierras y otros procesos industriales. Es el principal *gas de efecto invernadero antropogénico* que afecta al equilibrio de radiación del planeta. Es el gas de referencia frente al que se miden



otros gases de efecto invernadero y, por lo tanto, tiene un *Potencial de calentamiento mundial* de 1.

**Efecto invernadero:** Los *gases de efecto invernadero* absorben la *radiación infrarroja*, emitida por la superficie de la Tierra, por la propia *atmósfera* debido a los mismos gases, y por las nubes. La radiación atmosférica se emite en todos los sentidos, incluso hacia la superficie terrestre. Los gases de efecto invernadero atrapan el calor dentro del sistema de la *troposfera* terrestre. A esto se le denomina ‘efecto invernadero natural.’ La radiación atmosférica se vincula en gran medida a la temperatura del nivel al que se emite. En la troposfera, la temperatura disminuye generalmente con la altura. En efecto, la radiación infrarroja emitida al espacio se origina en altitud con una temperatura que tiene una media de  $-19^{\circ}\text{C}$ , en equilibrio con la *radiación solar* neta de entrada, mientras que la superficie terrestre tiene una temperatura media mucho mayor, de unos  $+14^{\circ}\text{C}$ . Un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero produce un aumento de la opacidad infrarroja de la atmósfera, y por lo tanto, una radiación efectiva en el espacio desde una altitud mayor a una temperatura más baja. Esto causa un *forzamiento radiativo*, un desequilibrio que sólo puede ser compensado con un aumento de la temperatura del sistema superficie– troposfera. A esto se denomina ‘efecto invernadero aumentado’.

**Elevación del nivel del mar:** Ascenso del nivel medio del océano. La elevación del nivel del mar es un cambio en el nivel medio del mar producido por la alteración en el volumen mundial de los océanos. La elevación relativa del nivel del mar ocurre cuando existe una elevación neta del nivel del océano relacionado con movimientos locales de tierras. Las *simulaciones climáticas* se concentran sobre todo en la estimación eustática del cambio del

nivel del mar. Los investigadores de impactos se centran en el cambio relativo del nivel del mar.

**Emisiones:** En el contexto de *cambio climático*, se entiende por emisiones la liberación de *gases de efecto invernadero* y/o sus *precursores* y *aerosoles* en la *atmósfera*, en una zona y un período de tiempo específicos.

**Escalas espaciales:** continental: 10 - 100 millones de kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>)

Regional: 100 millares - 10 millones de km<sup>2</sup>.

Local: menos de 100 millares de km<sup>2</sup>.

**Estocástico:** Es un algoritmo que basa su resultado en probabilidades que cambian en el tiempo, diferenciándose con el algoritmo probabilístico por su comportamiento dinámico. En el se representan todos y cada uno de los pasos necesarios para realizar una actividad, además de las formas o maneras en que cada uno de los pasos puede ser llevado a efecto y sus respectivas probabilidades, dicho de otra manera, cualquier proceso en el que se involucren probabilidades es un proceso estocástico.

**Forzamiento radiativo:** Mide en términos simples la importancia de un posible mecanismo de cambio climático. El forzamiento radiativo es una perturbación del balance de energía del sistema Tierra-atmósfera (en W/m<sup>2</sup>) que se produce, por ejemplo, a raíz de un cambio en la concentración de dióxido de carbono o en la energía emitida por el Sol; el sistema climático responde al forzamiento radiativo de manera que se restablezca el balance de energía. Un forzamiento radiativo tiende, si es positivo, a caldear la superficie y, si es negativo, a enfriarla. El forzamiento radiativo suele expresarse como un valor medio mundial y anual. Una definición más precisa del forzamiento radiativo, tal como se emplea en los informes del IPCC, es la perturbación del balance de energía del sistema superficie-troposfera,

dejando un margen para que la estratosfera se reajuste a un estado de equilibrio radiativo medio mundial. Se denomina también “forzamiento del clima”.

**Grado de libertad:** En un conjunto de observaciones, los grados de libertad están dados por el número de valores que pueden ser asignados de forma arbitraria, antes de que el resto de las variables tomen un valor automáticamente, producto de establecerse las que son libres, esto, con el fin de compensar e igualar un resultado el cual se ha conocido previamente.

**Gas de efecto invernadero:** Gases integrantes de la *atmósfera*, de origen natural y *antropogénico*, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de *radiación infrarroja* emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes. Esta propiedad causa el efecto invernadero. El vapor de agua (H<sub>2</sub>O), *dióxido de carbono* (CO<sub>2</sub>), *óxido nitroso* (N<sub>2</sub>O), *metano* (CH<sub>4</sub>), y *ozono* (O<sub>3</sub>) son los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Además existe en la atmósfera una serie de gases de efecto invernadero totalmente producidos por el hombre, como los *halocarbonos* y otras sustancias que contienen cloro y bromuro, de las que se ocupa el *Protocolo de Montreal*. Además del CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, y CH<sub>4</sub>, el *Protocolo de Kyoto* aborda otros gases de efecto invernadero, como el *hexafluoruro de azufre* (SF<sub>6</sub>), los *hidrofluorocarbonos* (HFC), y los *perfluorocarbonos* (PFC).

**Geopotencial:** Es la energía potencial que posee un cuerpo en virtud de hallarse en el campo de gravitación terrestre, referido a un nivel arbitrario o cero, que se toma correspondiendo con el nivel medio del mar. Numéricamente es igual al trabajo que habría que realizar contra la gravedad para elevar la unidad de masa desde el nivel medio del mar hasta el lugar en el que está situada la masa. Desde el punto de vista dinámico y para los fines del análisis meteorológico, el geopotencial es una mejor medida de la altura del aire que la altura



geométrica y ello es así porque cuando el aire se desplaza sobre una misma superficie geométrica generalmente pierde o gana energía, mientras que esto no sucede cuando los desplazamientos tienen lugar sobre una superficie equipotencial.

**Incertidumbre:** Expresión del nivel de desconocimiento de un valor (como el estado futuro del *sistema climático*). La incertidumbre puede ser resultado de una falta de información o de desacuerdos sobre lo que se conoce o puede conocer. Puede tener muchos orígenes, desde errores cuantificables en los datos a conceptos o terminologías definidos ambiguamente, o proyecciones inciertas de conductas humanas. La incertidumbre se puede representar con valores cuantitativos (como una gama de valores calculados por varias simulaciones) o de forma cualitativa (como el juicio expresado por un equipo de expertos)

**IPCC:** Panel Intergubernamental de Cambio Climático, es una organización internacional, constituido a petición de los gobiernos miembros. Fue establecido por primera vez en 1988 por dos organizaciones de Naciones Unidas, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y posteriormente ratificada por la Asamblea General de las Naciones Unidas.

**Mesoescala:** Es el estudio de sistemas del tiempo atmosférico más pequeños que la escala sinóptica meteorológica, pero más grandes que la microescala y la escala de tormenta de los sistemas de nubes cúmulos. Sus dimensiones horizontales generalmente oscilan de cerca de 9 km a varios centenares de km. Ejemplos de sistemas de mesoescala meteorológica son las brisas de mar, complejos mesoescalas convectivos, etc.

**Mitigación:** Intervención *antropogénica* para reducir las fuentes o mejorar los *sumideros* de *gases de efecto invernadero*.

**Orografía:** Se refiere a las elevaciones que puedan existir en una zona en particular (región, país, etc.) como a la descripción de las mismas que realiza la geomorfología.

**Radiación solar:** Radiación emitida por el Sol. Se denomina también radiación de onda corta. La radiación solar tiene un espectro (es decir, una gama de longitudes de onda) característico, determinado por la temperatura del Sol. El espectro de radiación solar es en la práctica distinta del de la radiación infrarroja o terrestre, a causa de la diferencia de temperaturas entre el Sol y el sistema Tierra-atmósfera.

**Reanálisis:** Recordar que un reanálisis es un conjunto de configuraciones atmosféricas coherentes con las observaciones realizadas en un momento determinado para una rejilla en concreto. Los datos del reanálisis sirven para verificar la capacidad de los GCMs para simular ciertas variables en nuestra zona de estudio.

**Sequía:** Fenómeno que se produce cuando la precipitación ha estado muy por debajo de los niveles normalmente registrados, causando unos serios desequilibrios hidrológicos que afectan de manera adversa a los sistemas terrestres de producción de *recursos*.

**Sistema climático:** Sistema muy complejo que consiste en cinco componentes principales: la *atmósfera*, la *hidrosfera*, la *criosfera*, la superficie terrestre y la *biosfera*, y las interacciones entre ellas. El *sistema climático* evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna debido a forzamientos externos (por ejemplo, erupciones volcánicas, variaciones solares, y forzamientos inducidos por el hombre tales como la composición cambiante de la atmósfera y el *cambio en el uso de las tierras*).

**Parametrización:** En la modelización del clima, técnica empleada para representar aquellos procesos que no es posible resolver a la resolución del modelo (procesos a escala

subreticular) mediante las relaciones entre el efecto de dichos procesos promediado en área y el flujo a mayor escala.

**Variabilidad Climática:** La variabilidad del clima se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las *escalas temporales y espaciales*, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del *sistema climático* (variabilidad interna), o a variaciones en los forzamientos externos *antropogénicos* (variabilidad externa).

## 5. EL CLIMA

Podríamos definir el clima de un lugar como el conjunto de manifestaciones atmosféricas y meteorológicas que en él suceden. El clima define numerosos elementos y factores condicionantes del medio ambiente, por lo que ambos están íntimamente ligados.

Los componentes en los que se disgrega el clima para su estudio se denominan elementos climatológicos. Estos elementos son la radiación solar e irradiación terrestre, la temperatura, la humedad del aire, el viento, las nubes, las precipitaciones, tanto verticales como horizontales, la temperatura y humedad del suelo, la composición química del aire y de las precipitaciones, los fenómenos luminosos de la atmósfera, la electricidad del aire y las radiaciones cósmicas, que llegan hasta la superficie de nuestro planeta.

Las observaciones se centran básicamente en la temperatura del aire y en las precipitaciones, que son los elementos aparentemente más influyentes en la biosfera, aunque últimamente se

están tomando datos muchos más completos referentes a humedad relativa, vientos, entre otros, ampliándose la lista con los factores climáticos.

Los elementos climatológicos son las variables que componen el clima, y es preciso diferenciarlos de los factores climatológicos, que son características fijas y determinantes del clima de un lugar. Los factores climatológicos son los responsables de los valores tomados por los elementos climatológicos, tanto puntuales como promedio, y en definitiva serán el principio causal del clima del lugar. Ejemplo de factores climatológicos son: latitud, composición geológica, entre otros.

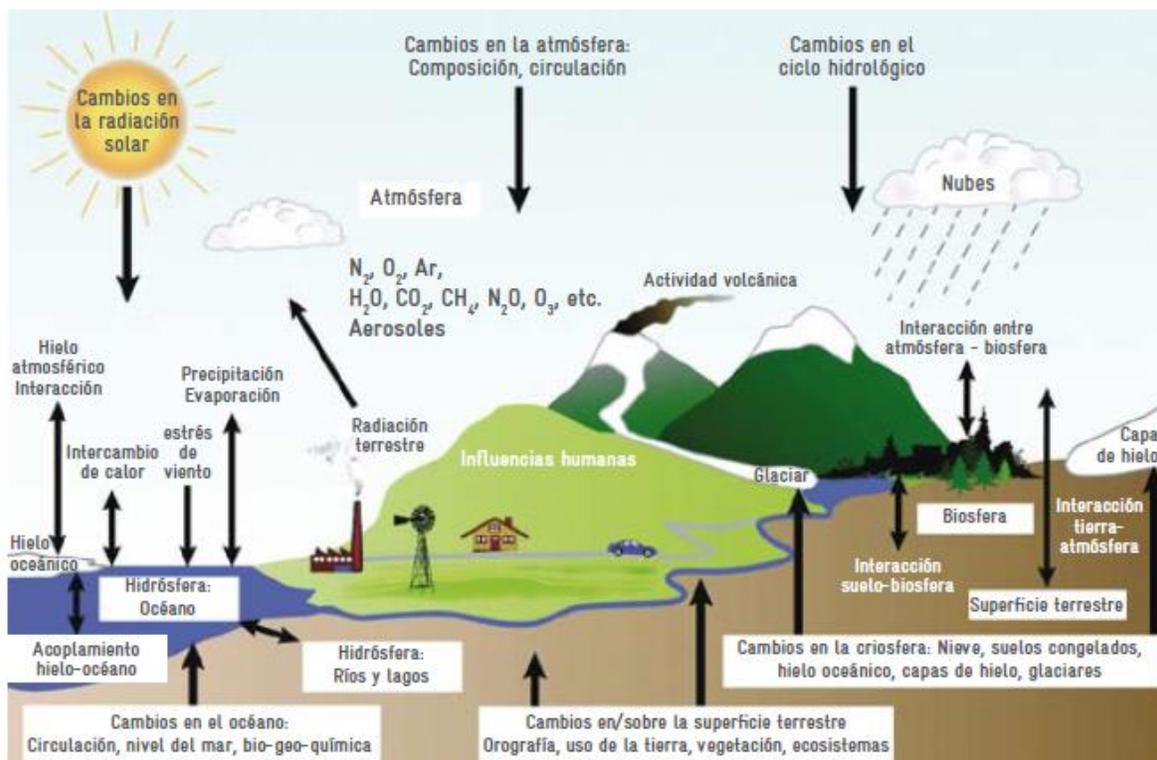
Dentro de estos factores climatológicos, tal vez el de mayor importancia sea la latitud geográfica. Conviene recordar que la causa fundamental del tiempo atmosférico es la posición relativa de la Tierra respecto al Sol. La Tierra describe dos tipos de movimiento de giro: en torno al Sol, la Tierra se mueve siguiendo una órbita elíptica, que sufre variaciones cíclicas, lo que puede explicar fenómenos climáticos de gran envergadura, como las glaciaciones; pero la rotación del globo terráqueo en esta órbita es la que más determinante resulta para los climas, al originar las variaciones estacionales.

La latitud, en definitiva, al determinar el ángulo de incidencia de la radiación solar hace que el calentamiento de la superficie de la tierra sea mayor o menor.

Otro factor climático significativo es la altitud, tanto referida al nivel del mar como a los lugares circundantes al punto de observación. Con la altitud van variando la temperatura y la humedad, así como la turbulencia de la atmosfera.

También las características del suelo constituyen un factor climatológico importante. La composición geológica, la cubierta vegetal o las capas de nieve pueden, por ejemplo, modificar el albedo, o las condiciones de la humedad.

Un factor a considerar es la orientación del suelo y su grado de exposición. La colocación del suelo frente al Sol modifica la incidencia de la radiación solar y puede dar lugar a un calentamiento mayor o menor.



*Ilustración 1. Vista esquemática de los procesos e interacciones del sistema climático. Fuente: (IPCC, 2007).*

## 5.1. CAMBIO CLIMATICO

Fue en una reunión celebrada en 1985 en Villach, Austria, y organizada por la Organización Meteorológica Mundial y por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, donde los científicos de 29 naciones, después de encontrar pistas sobre el calentamiento global, llegaron a la conclusión de que el cambio climático debería ser considerado una posibilidad plausible y grave. En sus conclusiones, la responsabilidad humana, mediante el aumento de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero durante el siglo XX, se hizo evidente con la causa principal del problema. (WCED, 1991).

Los resultados de la reunión de Villach contribuyeron con la redacción del informe Nuestro Futuro Común e identificó la necesidad de crear una agencia específica para estudiar el tema, hecho que se produjo con la creación del IPCC. La reunión también recomendó en su declaración final, que la estrategia para resolver el problema debería tener cuatro puntos:

- Aumentar la vigilancia y la evaluación de los fenómenos meteorológicos
- Aumentar la investigación para mejorar nuestro conocimiento sobre los orígenes, mecanismos y efectos de los fenómenos.
- Establecer, por medio de acuerdo internacional, políticas para reducir gases de efecto invernadero
- Adoptar estrategias para reducir al mínimo los impactos del cambio climático y del aumento del nivel del mar.

El cambio climático es sin duda una consecuencia de la cultura que actualmente domina en el planeta Tierra, en la cual hay un esfuerzo de los pueblos para alcanzar el desarrollo, en

todos los sentidos. En el modelo económico actual, el consumo inmoderado de energía es su base fundamental, y desafortunadamente está basado en la quema de combustibles fósiles, que producen grandes cantidades de gases de invernadero, especialmente de CO<sub>2</sub>.

Durante el siglo XX la temperatura media global del planeta ha aumentado aproximadamente 0,7 grados celsius y en el último cuarto del siglo hizo una considerable subida. Los primeros años del siglo XXI muestran la misma tendencia, lo que sugiere que hasta el momento las iniciativas mundiales encaminadas a revertir este comportamiento no han demostrado su eficacia (Cuadernos NAE, 2007).

El IPCC ha argumentado que el componente principal de este aumento de la temperatura son las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de actividades humanas. Las emisiones vienen ocurriendo en un volumen más allá de la capacidad de límite del planeta, lo que causa una retención de la radiación solar a un nivel mayor que el necesario para la estabilidad del clima, provocando los cambios climáticos observados en la actualidad (IPCC, 2007). Para invertir la tendencia de alta de la temperatura media es necesario que la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera se quede entre 450 y 550 ppm de CO<sub>2</sub>e. Cabe señalar que la concentración actual es de 430ppm CO<sub>2</sub>, y está creciendo a una tasa superior a 2 ppm / año (Stern, 2007).

Debido a su dependencia de factores sociales, todavía existe incertidumbre que no permite cuantificar con la suficiente precisión los cambios de clima previstos, sin embargo, la información validada hasta ahora es suficiente para tomar medidas de forma inmediata.

Como señala Duarte,(2006) el calentamiento global “es una realidad en la que ya estamos inmersos y su consideración como especulación o como proceso futuro aún por llegar solo puede retrasar la adopción de medidas de adaptación y mitigación y, con ello, agravar los impactos de este importante problema”. Es necesario interrumpir esta agresión a los equilibrios del planeta para hacer posible un futuro sostenible.

## 5.2. MODELOS GLOBALES DE CAMBIO CLIMATICO

Los modelos de circulación general de la atmósfera (GCM) son algoritmos matemáticos que representan el sistema climático de la tierra, estos modelos resuelven **las ecuaciones del movimiento de los fluidos (Navier-Stokes), ecuación de continuidad (conservación de masa), termodinámica (conservación de energía) y ecuación de estado**. Son la principal herramienta para explorar y simular la evolución futura del clima en distintos escenarios de cambio de las concentraciones de gases de efecto invernadero, que afectan al forzamiento natural de la radiación solar.

### ECUACIONES ATMOSFÉRICAS:

#### Conservación de la energía:

$$\frac{dT}{dt} = (\nabla \cdot K_h \nabla)T + \frac{1}{c_p} \sum \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

#### Conservación del momento:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - fK x \vec{V} - \nabla \phi - Fr \quad (2)$$

**Conservación de la masa:**

$$\nabla(\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (3)$$

**Conservación del agua:**

$$\frac{d(\rho q_i)}{dt} = (\nabla \cdot K_h \nabla)(\rho q_i) + E - P \quad (4)$$

**Ecuación de Estado:**

$$p = \rho R_d T (1 + 0,61 q_v) \quad (5)$$

**ECUACIONES OCEÁNICAS:**

**Conservación de la energía:**

$$\frac{dT}{dt} = K_t \cdot \nabla^2 T \quad (6)$$

**Conservación del momento:**

$$\frac{dv}{dt} = fKxV - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \cdot \nabla^2 \vec{v} \quad (7)$$

**Conservación de la masa:**

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (8)$$

**Conservación de la salinidad:**

$$\frac{dS}{dt} = K_s \cdot \nabla^2 S \quad (9)$$

**Conservación de estado:**

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (10)$$

Donde,

T: Temperatura.

Q: flujos de calor.

V: Vector velocidad.

$q_i$ : Fracción de agua en el aire.

S: Salinidad.

$f: 2\Omega \sin\phi$ , donde  $\Omega$  es la velocidad angular del planeta.

p: Presión

$\rho$ : Densidad.

$\phi$ : Latitud.

$\varphi$ : Geopotencial.

$C_p$ : Calor específico del aire.

$R_d$ : Constante termodinámica del aire.

K: Coeficiente de difusión.

$\nu$ : Coeficiente de viscosidad.

$F_r$ : Fuerza de rozamiento.

Estos modelos consideran las ecuaciones fundamentales que describen la física y dinámica de los movimientos y procesos que tienen lugar en la atmósfera, el océano, el hielo y la superficie terrestre, así como ciertas parametrizaciones semi-empíricas que hacen referencia a procesos físicos que al tener una escala espacial menor que la rejilla del modelo, como por ejemplo la convección, los procesos de cambio de fase (evaporación, condensación, formación de nubes), el intercambio radiactivo (absorción, emisión y reflexión de radiación solar), procesos convectivos en escalas inferiores a la de resolución, procesos de intercambio

de calor sensible y latente en superficie a través del suelo o la vegetación, etc, no pueden ser resueltos de manera explícita. Sus efectos medios se incluyen entonces de una manera aproximada, a partir de su relación con las variables a mayor escala.

Estas ecuaciones son integradas numéricamente utilizando algoritmos apropiados que, a partir de una condición inicial, resuelven la dinámica de las ecuaciones en una rejilla discreta de puntos que cubre todo el globo, considerando las variables necesarias para describir el estado del sistema: **presión, temperatura, velocidad, humedad atmosférica, salinidad oceánica**, etc.

Estos modelos se encuentran en el extremo superior de la jerarquía de modelos del clima, son acoplados (atmósfera-océano y suelo) y predicen cambios de las variables en un mayor tiempo. Las expresiones matemáticas que configuran un GCM se pueden analizar por separado dentro de las tres principales partes de que constan estos modelos: (1) la dinámica del sistema del clima que describe el movimiento a gran escala de las masas de aire y el transporte de la energía y momentum; (2) la física del sistema climático tal como transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica, y la evaporación; y (3) otros factores tales como la interacción océano-atmósfera, y parámetros que representan la dinámica de la vegetación.

La mayor parte de las ecuaciones en los AOGCM son ecuaciones diferenciales, para la tasa de cambio de una cantidad, por ejemplo, la velocidad del fluido, de tal forma que si es conocido su valor en un determinado instante, puede evaluarse el correspondiente en un instante posterior a través de la integración de las ecuaciones apropiadas. Por tanto, los

AOGCM tienen una orientación predictiva y permiten obtener soluciones de las ecuaciones, a partir de un estado inicial del sistema (condiciones iniciales).

En los modelos climáticos globales (GCMs), la superficie de la tierra se divide en grillas o cuadros, de dimensiones iguales; dependiendo del tamaño de la grilla tendremos una resolución espacial alta o baja, por lo tanto a mayor tamaño de la grilla menor resolución, y menor tamaño mayor resolución. Los modelos climáticos globales trabajan con resoluciones espaciales muy bajas, con grillas entre 100 a 500 km de extensión en latitud y longitud aproximadamente; estos dependen del GCMs en el cual se esté trabajando.

Los GCMs describen elementos físicos y procesos importantes en la atmósfera, el océano y el suelo que ocurren dentro del sistema climático, además son capaces de reproducir las características básicas del ciclo estacional de la precipitación del presente, pero a pesar del desarrollo tecnológico de dichos modelos y del acoplamiento y la integración gradual de modelos separados de cada uno de los componentes principales como la atmósfera, el océano, la superficie terrestre y el hielo marino; los GCMs aun presentan dificultades asociadas a la no interacción de algunos factores físicos que se encuentran estrechamente ligados al mecanismo del complejo sistema climático de la tierra.

Es el caso de procesos físicos relacionados con las nubes o la convección oceánica; estos ocurren a escalas espaciales mucho más pequeñas que la rejilla de los modelos globales y en consecuencia no pueden modelarse y resolverse en forma explícita.

Igualmente, la resolución de los GCMs, no detecta los cambios en las áreas costeras, zonas de alta topografía, ni fenómenos de pequeña escala, como lluvias de gran intensidad en los

valles. Las montañas altas y empinadas de nuestro país no son bien analizadas en los modelos climáticos de baja resolución, por esta razón los errores aparecen por la necesidad de rellenar los detalles regionales que faltan utilizando interpolación lineal.

Ni los procesos físicos como el forzamiento a mesoescala asociado con montañas, líneas costeras, lagos y características de vegetación, que influyen fuertemente en los climas locales son tomados en cuenta por estos modelos.

Bhaskaran et al (1996), Zhang et al (2006), Xu et al (2006), mencionan que se ha encontrado que la precipitación tiene un fuerte componente relacionado con la orografía, que los GCM no resuelven adecuadamente.

Por consiguiente, para poder hacer proyecciones cuantitativas del cambio climático futuro, es necesario utilizar modelos climáticos que simulen todos los procesos importantes que rigen la evolución futura del clima, esto para que las predicciones del cambio climático puedan siempre tener en cuenta el efecto de las retroacciones entre los distintos componentes. En definitiva, para conocer el impacto del cambio climático a nivel local, se necesita predecir cambios sobre escalas más pequeñas.

Los métodos empleados para este propósito pueden ser 1) los modelos de circulación general de alta resolución; 2) los modelos regionales, o modelos anidados de área limitada (RCMs, por sus siglas en inglés) y 3) los métodos empírico - estadísticos o estadísticos - dinámicos. Es importante tomar en cuenta que cuanto mayor nivel de reducción de escala (temporal y espacial) se desee, mayor nivel de incertidumbre deberá asumirse debido a que cualquier método que se escoja para reducir la escala necesariamente introducirá incertidumbre adicional al escenario.

Para cada proceso orientado a la reducción de escala, hay que añadir las incertidumbres anteriormente mencionadas, que en términos generales, contaminan todos los pasos del proceso de generación de escenarios regionalizados de cambio climático. Frecuentemente, se consideran cuatro tipos de incertidumbres: a) las incertidumbres ligadas a las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero); b) las incertidumbres ligadas a los diferentes modelos globales; c) las incertidumbres ligadas a la variabilidad interna del modelo; y, finalmente, d) las incertidumbres ligadas a las técnicas de regionalización. Con estas incertidumbres, se intenta acotar el rango de variación de las proyecciones climáticas. Posteriormente se profundizará sobre las incertidumbres asociadas a los procesos de regionalización, específicamente asociados a los modelos regionales del clima o al escalamiento dinámico *Véase: Incertidumbre asociada a la Regionalización Dinámica.*

### **5.3. ESCENARIOS DEL IPCC**

Para elaborar las proyecciones del clima futuro a través de los modelos de cambio climático es necesario el uso de escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, etc.). A partir de los escenarios de emisiones es posible calcular las concentraciones globales y el forzamiento radiativo correspondiente, lo que lleva a una proyección del incremento de temperatura global.

Concretamente y de manera más clara, los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes (crecimiento demográfico, el desarrollo socio económico o el cambio tecnológico) en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de

incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de gran utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. La posibilidad de que en la realidad las emisiones evolucionen tal como se describe en alguno de estos escenarios es muy remota.

Para describir de manera coherente las relaciones entre las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución, y para añadir un contexto a la cuantificación de los escenarios, se desarrollaron cuatro líneas evolutivas diferentes. Cada una de ellas representa un cambio (o tendencia) demográfico, social, económico, tecnológico y medioambiental, que algunos pueden valorar positivamente, y otros, negativamente.

Los escenarios abarcan un gran número de las principales fuerzas determinantes demográficas, económicas y tecnológicas de las emisiones de GEI y de dióxido de azufre. Cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica de una de las cuatro líneas evolutivas. El conjunto de escenarios basados en una misma línea evolutiva constituye una “familia” de escenarios.

“El concepto de escenario no debe confundirse con el de pronóstico, ya que el objeto de cada uno de ellos es diferente, así como las causas, el manejo y la comunicación de la incertidumbre apropiadas en cada caso” (IPCC-WGI 2007).

De acuerdo con el IPCC, los escenarios climáticos se definen como “una representación posible y simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas que ha sido construida expresamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, y que en muchas ocasiones sirve como materia prima para modelos de impacto” (IPCC-WGI 2007).

A continuación se muestran las cuatro familias de escenarios (IPCC, 2007):

- La línea evolutiva y familia de escenarios **A1** describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (**A1FI**), utilización de fuentes de energía de origen no fósil (**A1T**), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (**A1B**).
- La línea evolutiva y familia de escenarios **A2** describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. El índice de natalidad en el conjunto de las regiones converge muy lentamente, con lo que se obtiene una población en continuo crecimiento. El

desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

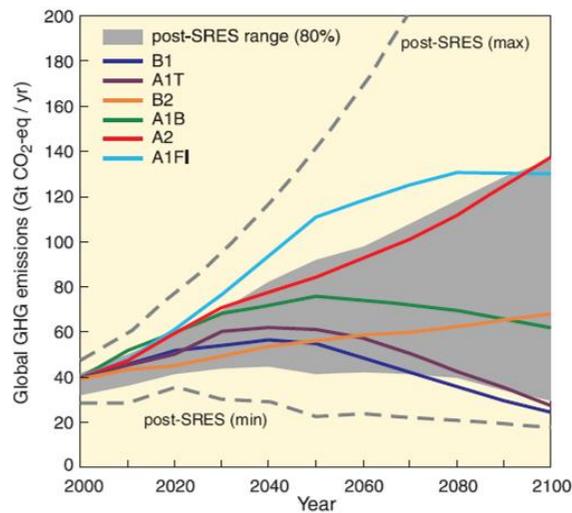
- La línea evolutiva y familia de escenarios **B1** describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y ambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.
- La línea evolutiva y familia de escenarios **B2** describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas A1 y B1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

Tema	1990	SRES escenarios para el 2100			
		A1	A2	B1	B2
Población (Billones)	5252	7,1	15,1	7,2	10,4
Concentración de CO2 (ppmv)	352	680	834	547	601
Cambio en la Temperatura Media anual global (°C)	....	2,52	3,09	2,04	2,16
Rango (°C)	....	1,70-3,66	2,12-4,41	1,37-2,99	1,45-3,14
Elevación del nivel promedio del mar (cm)	....	58	62	50	52
Rango (cm)	....	23-101	27-107	19-90	20-93
Relaciones entre países	....	Globalización	Regionalización	Globalización	Regionalización

**Tabla 1.** Características de los escenarios de cambio climático SRES (Carter et al., 1999); (IPCC, 2007)

En total, seis equipos de modeladores han desarrollado 40 escenarios IE-EE. Todos ellos son igualmente válidos, y no tienen asignadas probabilidades de hacerse realidad. El conjunto de escenarios se compone de seis grupos de escenarios tomados de las cuatro familias: un grupo de cada una de las familias A2, B1 y B2, y tres grupos de la familia A1, que caracterizan el desarrollo alternativo de tecnologías de energía: A1FI (utilización intensiva de combustibles de origen fósil), A1B (equilibrado) y A1T (predominantemente con combustibles no de origen fósil).

En la siguiente figura se presentan las emisiones previsibles de gases de invernadero, conforme a estos escenarios de cambio climático.

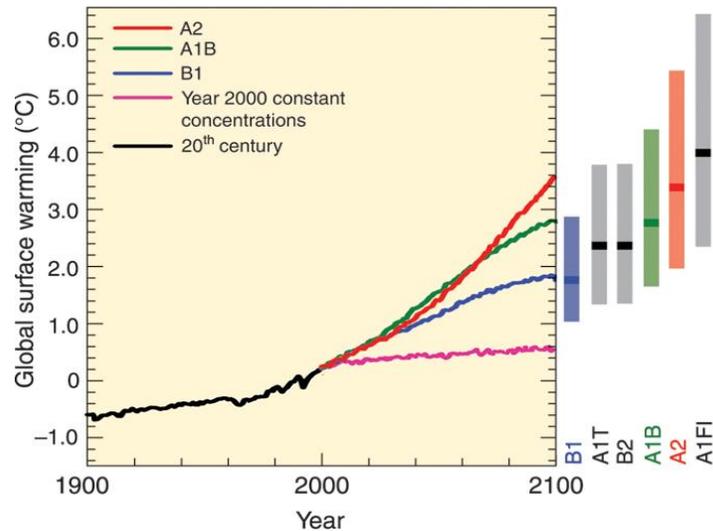


*Ilustración 2. Emisiones futuras de gases invernadero según escenarios IE-EE del IPCC, (IPCC, 2007).*

Como puede observarse, las variaciones posibles de emisiones de gases de invernadero son muy amplias, desde situaciones en que se disminuirán respecto a los valores actuales hasta otras que irán a la alza de manera importante. Los expertos piensan que la variación probable de temperatura media del planeta hacia el año 2100 será de entre 1.5 y 4.0 °C, correspondiente a un incremento del 100% en la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>. La diferencia entre ambos extremos de temperatura se debe a la incertidumbre en los modelos de simulación cuya principal causa es el efecto que tendrá el aumento de vapor de agua en la atmósfera ocasionado por el calentamiento global y que, a su vez, lo retroalimenta en una magnitud difícil de calcular.

Conforme al reporte 2007 del IPCC, la temperatura global crecerá, en el escenario A1B, entre 1.7 y 4.4 °C al final del siglo XXI; y entre 2.0 y 5.4 °C en el escenario A2 (IPCC 2007).

En la ilustración 5 se muestran los resultados de temperatura obtenidos de la simulación con un modelo de circulación general para los diversos escenarios.



*Ilustración 3. Cambios de temperatura previstos 1900-2100, (IPCC, 2007)*

Como se muestra, el cambio en la temperatura proyectado para el año 2100 se estima no será uniforme, sino que afectará más severamente a ciertas regiones en las que se desarrollen estilos de vida de acuerdo a la dinámica y forzamientos de los diferentes escenarios de cambio climáticos estudiados por el IPCC.

## 6. SIMULACIÓN Y CREACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO

En la actualidad se resalta el hecho de que no hay un método único para la generación de escenarios de cambio climático. Mucho depende de la capacidad técnica y científica de cada país. En particular, ningún país en vía de desarrollo posee un modelo avanzado que se equipare a los modelos climáticos más complejos que existen en estos días. Por tanto, somos

usuarios de las salidas de modelos complejos desarrollados en los países llamados primer mundo. Sin embargo, la generación de estos escenarios se basa en gran medida en la interpretación del problema del posible clima futuro y de cómo se maneje la incertidumbre propia de proyecciones de largo plazo en sistemas complejos, como lo es el sistema de circulación climatológica.

Los Modelos de Circulación General del Océano y la Atmósfera (AOGCMs) como anteriormente se mencionó se basan en la resolución del conjunto de ecuaciones matemáticas que expresan las leyes de la Física que gobiernan la dinámica de la atmósfera y el océano. Es un complejo sistema no-lineal de ecuaciones diferenciales que no tiene solución analítica. Por ello, han de resolverse de forma aproximada aplicando técnicas numéricas, que requieren dividir el espacio ocupado por la atmósfera y el océano en celdillas tridimensionales. En cada una de ellas se asignan valores de las variables que caracterizan el estado de la atmósfera y el océano, como temperatura, movimiento, densidad, etc. Dicha asignación se realiza a partir de observaciones directas o indirectas de tales variables a escala global en un determinado instante inicial. Para derivar las evoluciones temporales de las variables en cada celdilla de la malla del modelo se resuelven las ecuaciones a partir de los valores iniciales. Estas evoluciones se obtienen en intervalos temporales discretos (paso temporal), cuya duración debe estar en concordancia con el tamaño de las celdillas.

Lo anterior significa que debido a que la mayor parte de las ecuaciones en los AOGCM son ecuaciones diferenciales, para la tasa de cambio de algunas de las variables climatológicas simuladas por los modelos, por ejemplo, la velocidad del fluido, puede evaluarse y

determinarse el correspondiente valor en un instante posterior, si es conocido su valor en un determinado instante inicial de referencia (condición inicial). Por tanto, los AOGCM tienen una orientación proyectiva y permiten obtener soluciones de las ecuaciones, a partir de un estado inicial del sistema, como en el caso de la variable velocidad del fluido obtenida a través de mediciones a escala global (Ver tabla 2).

Centro, País de origen	Sigla	Modelo	Resolución		N°
			Latitud	Longitud	
Bjerknes Centre for Climate Research <b>Noruega</b>	BCCR	BCM2	2.8°	2.8°	1
National Center for Atmospheric Research <b>USA</b>	NCAR	CCSM3	1.40°	1.40°	2
		PCM1	2.8°	2.8°	3
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis <b>Canada</b>	CCCma	CGCM3.1	3.75°	3.75°	4
Centre National de Recherches Meteorologiques <b>Francia</b>	CNRM	CNRM-CM3	2.81°	2.81°	5
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization <b>Australia</b>	CSIRO	Mk3.0	1.88°	1.88°	6
		Mk3.5	1.88°	1.88°	7
Max Planck Institute for Meteorology <b>Alemania</b>	MPI	ECHAM5	1.88°	1.88°	8
Meteorological Institute of the University of Bonn, <b>Alemania</b> Institute of Korea Meteorological Administration, <b>Corea</b>	MIUB IKMA	ECHO-G	3.75°	3.75°	9
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory <b>USA</b>	GFDL	CM2.0	2°	2.5°	10
		CM2.1	2°	2.5°	11
Goddard Institute for Space Studies <b>USA</b>	GISS	NASA/GISS	4°	5°	12
National Institute of Geophysics and Volcanology <b>Italia</b>	INGV	ECHAM 4.6	1.13°	1.13°	13
Institute for Numerical Mathematics <b>Rusia</b>	INM	INM-CM3.0	4°	5°	14
Institut Pierre Simon Laplace <b>Francia</b>	IPSL	IPSL-CM4	2.50°	3.75°	15
Center for Climate System Research, <b>Japón</b> National Institute for Environmental Studies, <b>Japón</b>	CCSR NIES	MIROC3.2(medres)	2.8°	2.8°	16
Meteorological Research Institute <b>Japón</b>	MRI	CGCM2.3.2	2.8°	2.8°	17

**Tabla 2.** Lista de GCM's para realizar simulaciones con escenarios 20C3M (período 1961-1999), A2 (períodos 2046-2065 y 2081-2100) y A1B (período 2010-2100), a escala diaria. Fuente: (Reyes, 2012).

La resolución de los modelos climáticos empleados para simular el clima futuro a partir de los distintos escenarios oscila entre 2.5° y 5°, es decir entre 250 y 500 km aproximadamente en nuestras latitudes. Por tanto, el detalle geográfico al que pueden obtenerse actualmente las previsiones es todavía muy limitado y no permite pronosticar diferencias ni tendencias regionales.

Aunque los resultados de proyecciones de clima obtenidos con diversos AOGCM son fiables a escala global, cuando se consideran escalas regionales (10-100 km) las distribuciones de temperatura y, sobre todo, de precipitación muestran notables discrepancias con los datos observados. Esta carencia en la fiabilidad de los resultados a escala regional se atribuye en buena medida a la insuficiente resolución espacial de los AOGCMs y al uso de parametrizaciones físicas no adaptadas a procesos de mesoescala.

Una baja resolución espacial da lugar a que se distorsionen las líneas de costa y se suavicen las alturas de los accidentes orográficos. Además, ya se ha señalado que los modelos no pueden reproducir de forma realista procesos atmosféricos con un tamaño similar o inferior al de las celdillas en que se discretiza el dominio donde se aplica.

Esta deficiencia de los modelos globales hace necesario realizar un esfuerzo adicional para obtener proyecciones que estimen los efectos regionales del cambio climático.

Este problema es uno de los objetivos actuales de la comunidad investigadora y se denomina con el nombre genérico de “creación de escenarios regionales de cambio climático” o “proyección regional del cambio climático”.

Este proceso puede magnificar o reducir la incertidumbre asociada con las predicciones globales, haciendo que éstas sean más o menos útiles en distintas zonas geográficas de una misma región (ver Murphy *et ál.*, 2004); este hecho añade un nuevo componente a la cascada de incertidumbres que es necesario cuantificar para entender los escenarios finales de cambio climático que se obtengan.

Generalmente para hacer estimaciones de proyecciones regionalizadas de cambio climático utiliza la idea del descenso de las escalas grandes a las escalas pequeñas. Las escalas grandes se estiman con los modelos globales acoplados océano-atmósfera y a continuación se desciende a las escalas más pequeñas con diferentes técnicas de regionalización tal y como se describe a continuación.

En este enfoque la tarea predictiva la realizan los modelos globales y las técnicas de regionalización o *downscaling*, bien basadas en algoritmos empíricos o en modelos regionales, se limitan a introducir detalle local. La información solamente fluye desde las escalas grandes (modelos globales) a las escalas regionales (modelos regionales).

Cualquier proceso de *downscaling* consiste en aumentar la resolución de información donde se requiera mayor detalle. Existen los procesos de *downscaling* dinámico y estadístico.

Tanto el proceso de generación de escenarios regionalizados como el acceso por parte de los usuarios de la comunidad de impactos precisan de una base de datos convenientemente organizada, que deberá incluir al menos:

1. Datos climáticos de observación;
2. Extracciones, en una región suficientemente amplia, de salidas de los diferentes AOGCMs;
3. Datos de Reanálisis.
4. Datos de salida de escenarios regionalizados.

En el análisis de los sistemas de recursos hídricos, por lo general supone una situación que se puede describir estadísticamente mediante una serie temporal de eventos históricos, y depende de la utilización de registros observados en el pasado para estimar la probabilidad de eventos futuros. Se supone que los registros históricos son estacionarios y se supone que estas probabilidades continúan en el futuro. Normalmente, las proyecciones climáticas se basan en simulaciones de múltiples modelos y escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Muchos de los planteamientos que se han desarrollado para la corrección de las simulaciones del clima del Siglo XX se basan en correcciones empíricas de los datos climáticos simulados. Estas correcciones se fundamentan en la relación entre la estadística observada de algunos parámetros y su simulación para la condición climática equivalente. Esta relación es usada para corregir la simulación de estos parámetros para la condición climática futura. En su forma más simple, esa relación podría ser una simple perturbación para corregir un sesgo. Por ejemplo, la temperatura simulada por un modelo para las condiciones actuales en un lugar determinado puede ser de 5°C más frío en comparación con

las observaciones. Para el clima futuro, añadir 5°C a todos los valores simulados en ese lugar puede corregir este sesgo. El sesgo puede ser simplemente un retraso de la tasa de corrección de la topografía o pueden ser el resultado de una deficiencia en la física del modelo. Estos métodos se basan en la disponibilidad de datos de carácter histórico, o de base climática. La simulaciones de base climática deben ajustarse lo más cerca posible de los forzamientos externos (gases de efecto invernadero y las concentraciones de aerosoles, radiación solar, y la concentración de aerosoles volcánicos en la estratosfera). Esta simulación es entonces el estado de referencia contra el cual se comparan los cambios futuros.

Si se desea obtener la distribución de la proyección futura en valor absoluto y que sea consistente con las observaciones es razonable corregir la distribución de la proyección simulada con el sesgo de la simulación de control (con-obs), o lo que es lo mismo, a la distribución observada se le suma el cambio entre proyección futura y control una vez hayan sido regionalizadas:

$$Pr_{corr} = Pr - (Con - Obs) = Obs + (Pr - Con) \quad (11)$$

Donde  $Pr_{corr}$  simulación corregida,  $Pr$ , simulación proyectada,  $Con$ , simulación de control  $Obs$ , datos observados.

Por lo anterior es necesario validar dos o más modelos climáticos GCM que permita tomar la decisión más acertada en cuanto al modelo más adecuado para ser utilizado en la generación de escenarios para esa región.

Una forma de validar la calidad de simulación de los GCM es a través de la validación de la circulación atmosférica, basado en una técnica objetiva de clasificación de tipos de tiempo. Esta validación pretende en primer lugar analizar la habilidad de los GCM, para simular la circulación atmosférica a escala continental mediante su comparación con los datos de reanálisis o datos observados y, en segundo lugar, evaluar los posibles cambios en los tipos de circulación al considerar un escenario de cambio climático (SRES A2) para el período 2071-2100.

La obtención de un escenario de cambio climático requiere de una serie de pasos generales que permiten obtener información con el fin de estimar los impactos de la variación del clima en un área determinada (Ruiz, 2007). Los pasos generales a seguir son:

1. Seleccionar el escenario de emisiones de CO<sub>2</sub> (SRES) de interés.
2. Seleccionar los resultados de uno o varios modelos, preferiblemente, de cambio climático global para el área de estudio.
3. Determinar posibles cambios en la temperatura, en la lluvia, en el nivel del mar, y otros, calculando el grado de incertidumbre de los cambios encontrados.
4. Seleccionar el método para realizar la regionalización deseada puede ser dinámico, estadístico.

El IPCC ofrece datos de climatología obtenidos aplicando varios modelos climáticos globales ([http://www.ipcc-data.org/cgi-bin/ddc\\_nav/dataset=ar4\\_gcm](http://www.ipcc-data.org/cgi-bin/ddc_nav/dataset=ar4_gcm)) (ver ilustraciones 6,7). Cada modelo ofrece información para validar el clima pasado o para validar el clima

presente o para generar proyecciones de cambio climático. Las variables climáticas disponibles dependen de cada modelo. En la siguientes tablas se muestra un resumen de los datos de modelos aplicados por el IPCC y que se pueden obtener a través de su página WEB. Las tendencias o tipos de series de las variables climatológicas (ver tabla 3) simuladas por estos modelos, son por lo general a una resolución de tipo temporal **diaria, mensual y anual**.

Select	Select	Select	Change or unselect	Select
Model	Scenario	Ensemble Member	Variable=rsds	Time slice
BCC:CM1				
BCCR:BCM2				1901-1930
CCCMA:CGCM3_1-T63			huss Specific humidity	1931-1960
CCCMA:CGCM3_1-T47			huss-change Specific humidity (change)	1961-1990
CNRM:CM3			pr Precipitation rate	2010-2039
CSIRO:MK3			pr-change Precipitation rate (change)	2011-2030
CONS:ECHO-G			psl Sea level pressure	2040-2069
LASG:FGOALS-G1_0	1PTO2X		psl-change Sea level pressure (change)	2046-2065
GFDL:CM2	1PTO4X		rsds Downwelling shortwave flux at surface	2070-2099
GFDL:CM2_1	20C3M		rsds-change Downwelling shortwave flux at surface (change)	2080-2099
NASA:GISS-AOM	COMMIT	1	tas Air Temperature	2180-2199
NASA:GISS-EH	PICTL	2	tas-change Air Temperature (change)	o0001-0030
NASA:GISS-ER	SRA1B		tasmax Air Temperature, daily max	o0010-0039
UKMO:HADCM3	SRA2		tasmax-change Air Temperature, daily max (change)	o0011-0030
UKMO:HADGEM1	SRB1		tasmin Air Temperature, daily min	o0031-0060
INM:CM3			tasmin-change Air Temperature, daily min (change)	o0040-0069
IPSL:CM4			uas Eastward wind	o0046-0065
NIES:MIROC3_2-HI			uas-change Eastward wind (change)	o0061-0090
NIES:MIROC3_2-MED			vas Northward wind	o0070-0099
MPIM:ECHAM5			vas-change Northward wind (change)	o0080-0099
MRI:CGCM2_3_2				o0180-0199
NCAR:CCSM3				

**Ilustración 4.** Base de datos de variables climatológicas modeladas por diferentes MCG, de la base del IPCC.

## Data table

[Download as csv spreadsheet](#)

### Precipitation rate [mm/day], Jan

latitude	longitude																
	0.00	1.88	3.75	5.63	7.50	9.38	11.25	13.13	15.00	16.88	18.75	20.63	22.50	24.38	26.25	28.13	30.00
30.00	0.03	0.04	0.06	0.08	0.07	0.07	0.09	0.07	0.09	0.22	0.25	0.16	0.08	0.06	0.06	0.06	0.11
28.75	0.02	0.02	0.04	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.08	0.09	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06
27.50	0.02	0.02	0.03	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
26.25	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
25.00	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
23.75	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
22.50	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
21.25	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
20.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.75	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.50	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16.25	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13.75	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.75	0.01	0.07	0.11	0.19	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.50	0.16	0.23	0.27	0.39	0.24	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01

*Ilustración 5. Datos climatológicos ofrecidos por el modelo HADGEM1, para el escenario de cambio climático A1B, 2080-2099.*

Abreviatura	Significado
Huss	Humedad específica
Huss change	Cambio en la humedad específica
Pr	Precipitación
Pr change	Cambio en la precipitación
Psl	Presión a Nivel del mar
Psl Change	Cambio en la Presión a Nivel del mar
Rsds	Flujo de onda corta entrante en superficie



Rsds Change	Cambio en el flujo de onda corta entrante en superficie
Tas	Temperatura del aire
Tas change	Cambio en la Temperatura del aire
Tas max	Temperatura máxima diaria
Tas max change	Cambio en la Temperatura máxima diaria
Tas min	Temperatura mínima diaria
Tas max change	Cambio en la Temperatura mínima diaria
Uas	Viento del Este
Uas change	Cambio en el viento del Este.
Vas	Viento del Norte
Vas change	Cambio en el viento del Norte

**Tabla 3.** Abreviaturas de Variables Modeladas Globalmente

Modelos	Escenarios	Variable	Rango
UKMO: HADCM3	20C3M	Pr, Psl,	1901-1930
		Rsds, Tas,	1931-1960
		Uas, Vas	1961-1990
	SRA1B	Huss	2010 – 2039
		Pr, Pr change	2011 – 2030
		Psl, Psl Change,	2040 – 2069

		Rsds, Rsds Change	2046 – 2065
		Tas, Tas change	2070 – 2099
		Uas, Uas change	2080 – 2099
	SRA1B	Huss	2010 – 2039
		Pr, Pr change	2011 – 2030
		Psl, Psl Change,	2040 – 2069
		Rsds, Rsds Change	2046 – 2065
		Tas, Tas change	2070 – 2099
		Uas, Uas change	2080 – 2099
		Vas, Vas change	
	SRA2	Pr, Pr change	2010 – 2039
		Psl, Psl Change,	2011 – 2030
		Rsds, Rsds Change	2040 – 2069
		Tas, Tas change	2046 – 2065
		Uas, Uas change	2070 – 2099
		Vas, Vas change	2080 – 2099
	SRB1	Huss	2010 – 2039
		Pr, Pr change	2011 – 2030
		Psl, Psl Change,	2040 – 2069
		Rsds, Rsds Change	2046 – 2065
		Tas, Tas change	2070 – 2099
Uas, Uas change		2080 – 2099	

ECHAM5	20C3M	Pr, Psl,	1901-1930
		Rsds, Tas	1931-1960
		Uas, Vas	1961-1990
	SRA2	Pr, Pr change	2010 – 2039
		Psl, Psl Change,	2011 – 2030
		Rsds, Rsds Change	2040 – 2069
		Tas, Tas change	2046 – 2065
		Uas, Uas Change	2070 – 2099
		Vas, Vas Change	2080 – 2099
	SRA1B- SRB1	Pr, Pr change	2010 – 2039
		Psl, Psl Change,	2011 – 2030
		Rsds, Rsds Change	2040 – 2069
		Tas, Tas change	2046 – 2065
		Uas, Uas change,	2070 – 2099
		Vas, Vas change	2080 – 2099
		2180 – 2199	
CGCM2	20C3M	Huss, Pr, Psl,	1901-1930
		Rsds,Tas,	1931-1960
		Uas, Vas	1961-1990
	SRA1B- SRB1	Huss, Huss change,	2010 – 2039
		Pr, Pr change	2011 – 2030
		Psl, Psl Change,	2040 – 2069

		Rsds, Rsds Change	2046 – 2065
		Tas, Tas change	2070 – 2099
		Uas, Uas change,	2080 – 2099
		Vas, Vas change	2180 – 2199
MIROC3	20C3M	Huss, Pr, Psl,	1901-1930
		Rsds, Tas, Tas max, Tas min	1931-1960
		Uas, Vas	1961-1990
		Huss, Huss change, Pr, Pr change	2010 – 2039
	SRA1B- SRB1	Psl, Psl Change, Rsds, Rsds Change	2011 – 2030
		Tas, Tas change	2040 – 2069
		Tas max, Tas max Change	2046 – 2065
		Tas min, Tas min Change	2070 – 2099
		Uas, Uas change, Vas, Vas change	2080 – 2099

**Tabla 4.** Datos Disponibles en el IPCC de Modelos Globales

## **6.1. REANALISIS**

### **6.1.1. Reanálisis NCEP/NCAR**

El reanálisis NCEP/NCAR es un proyecto desarrollado en conjunto por los centros de investigación National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y The National Center for Atmospheric Research (NCAR). El objetivo del proyecto es reproducir una serie de parámetros atmosféricos en todo el mundo, usando para este fin, diversas fuentes de observaciones históricas, entre las principales se encuentran las estaciones meteorológicas alrededor del mundo y satélites. El proyecto utiliza modelos similares a los de predicción climática. Los resultados del reanálisis corresponden a un punto de referencia para la validez de los modelos meteorológicos globales como los GCM's, por lo tanto son comúnmente usados para analizar estos últimos.

Los resultados del reanálisis NCEP/NCAR, o reanálisis como se denomina en el resto del trabajo, corresponden a la herramienta utilizada para la selección del GCM que mejor caracterice la zona de estudio.

### **6.1.2. Reanálisis ERA40**

ERA- 40 es un nuevo análisis de ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) de la atmósfera mundial y condiciones de la superficie por 45 años, durante el período de septiembre de 1957 a agosto de 2002. Se utilizaron muchas fuentes de las observaciones meteorológicas, incluidas las radiosondas, globos, aviones, satélites, buoyes dispersómetros. Estos datos se realizaron a través del modelo de ordenador ECMWF a una

resolución 40 km. Como modelo computacional del ECMWF es uno de los más prestigiosos en el campo de la previsión y los datos son almacenados en formato GRIB.

Ésta nueva base de datos se llevó a cabo en un esfuerzo por mejorar la precisión de los mapas meteorológicos históricos y ayudar en un análisis más detallado de los diversos sistemas meteorológicos a través de un periodo que fue una falta grave en los datos informáticos. Con los datos obtenidos de Re-análisis tales como ERA40, muchas de las herramientas informáticas más modernas para el análisis de sistemas de tormentas pueden ser utilizadas, al menos en parte, debido a que esta base de datos, constituye un acceso a una simulación rica en información del estado atmosférico.

## **6.2. TECNICAS DE REGIONALIZACIÓN**

### **6.2.1. TECNICA DE REGIONALIZACIÓN DINÁMICA**

Este escalamiento dinámico se basa en anidar un modelo climático regional (RCM, *Regional Climate Model*) de mayor resolución (grilla horizontal de celdas de 20 a 50 km) dentro de un GCM de menor resolución, de manera que la información de los GCM se utiliza para definir condiciones de frontera atmosféricas que varían en el tiempo, dentro de un dominio finito en el cual se modela la dinámica física de la atmósfera (Wilby *et al.*, 2002).

En otras palabras, para aumentar la resolución de los modelos climáticos globales, se “anida” un modelo regional de mayor resolución en el interior del modelo global, únicamente en la zona de interés. El modelo regional toma como condiciones de frontera los valores del modelo global a lo largo de toda la integración (Giorgi & Mearns, 1999). Algunos modelos

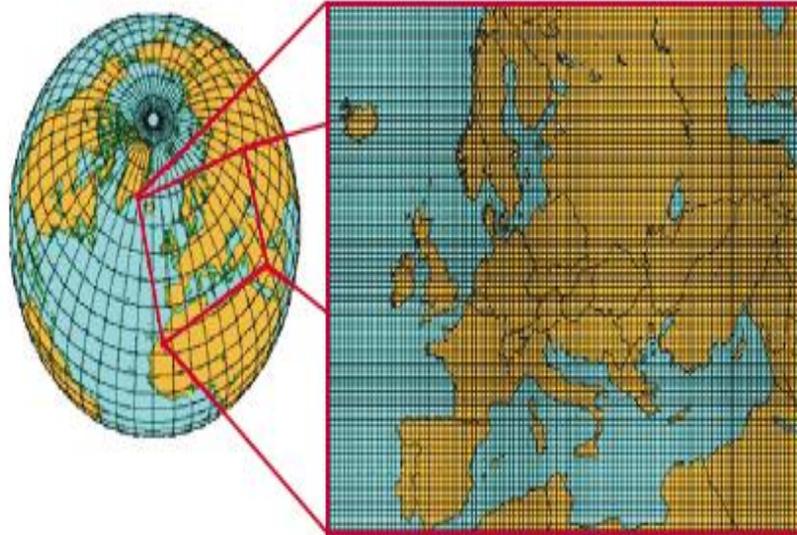
requieren de condiciones de contorno de la superficie y las condiciones de contorno laterales en los bordes del modelo.

Los modelos climáticos regionales (RCM) por lo general contienen procesos importantes en el sistema climático como por ejemplo nubes, radiación, precipitación, humedad en suelo, entre otros. Los RCM no tienen en cuenta en algunas ocasiones el componente oceánico.

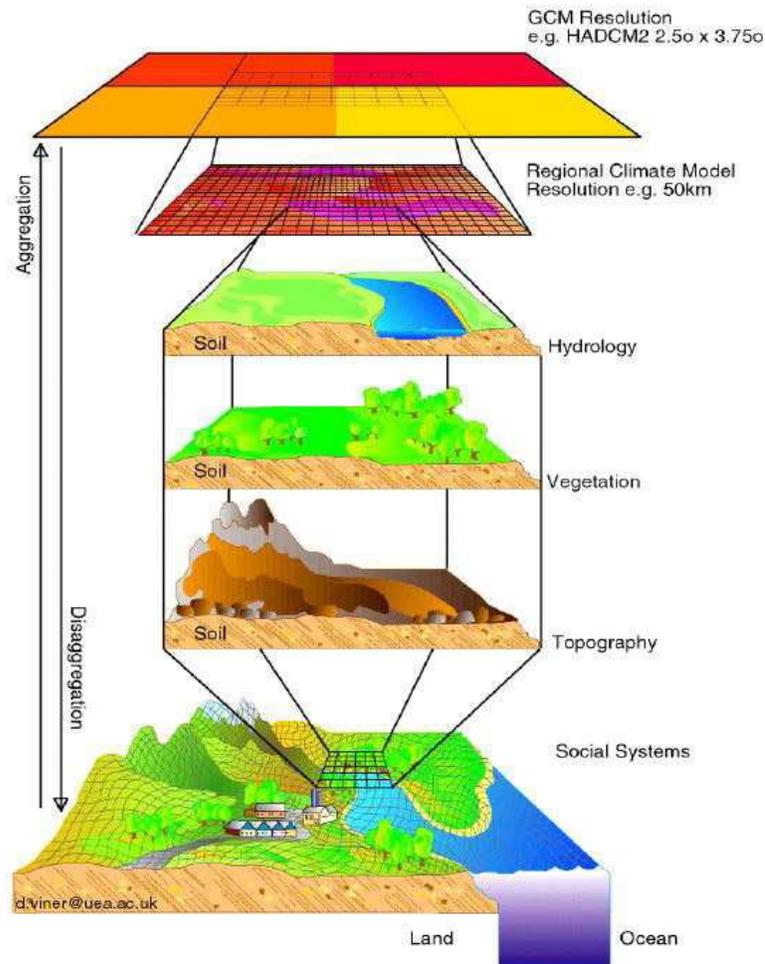
En estos modelos se encuentran descritos: el flujo dinámico, el ciclo de sulfuro atmosférico, nubes y precipitación, los procesos radiativos, la superficie terrestre y el espesor del suelo. La mayoría tienen una resolución típica de alrededor de 50 km en la horizontal (resolución de  $0.44^\circ \times 0.44^\circ$ ), y considera condiciones de la atmósfera bajo equilibrio hidrostático y tienen una representación completa de la fuerza de Coriolis, aunque estas características varían en algunos modelos de circulación regional.

Los RCM son la mejor herramienta para reducir de la escala global a regional las características del clima, ya que se obtiene información más detallada de una región en particular; Entre las principales ventajas de usar los RCM, se puede encontrar: (1) una simulación más realista del clima actual, debido a su alta resolución que permite interactuar con el terreno; (2) predicciones a más detalle del cambio de clima a futuro; (3) representación de pequeñas áreas; (4) mejor simulación y predicción en eventos extremos climáticos y (5) generación de datos a detalle para el análisis y estudios de impactos a nivel local.

En general, las técnicas dinámicas tienen la ventaja de ser físicamente consistentes y la desventaja de necesitar una gran capacidad de cálculo, lo que limita actualmente las simulaciones a resoluciones inferiores a los 20 km.



**Ilustración 6:** Ejemplo del dominio de aplicación de un RCM sobre Europa con una rejilla de 50 km. La técnica de anidamiento (“nesting”) consiste en proporcionar al RCM información de la evolución de las variables atmosféricas en los puntos del contorno del dominio. Dicha información se obtiene previamente de la simulación con un AOGCM que utiliza una rejilla con resolución más baja (celdillas con mayor tamaño)



**Ilustración 7** Esquema de uso de GCMs en RCMs. Fuente: (Viner, 2000)

Los RCM están forzados por los contornos con valores simulados por los AOGCM (del inglés “Atmosphere-Ocean Global Climate Model”), es decir modelos en los cuales la atmósfera y el océano interactúan de forma acoplada. Por tanto, el procedimiento que actualmente se sigue consiste en utilizar las salidas de un AOGCM para simular la respuesta de la circulación global a forzamientos de macroescala (gran escala) y los RCM para tener en cuenta los forzamientos a escala más pequeña (mesoescala) que el tamaño de la celdilla

en el AOGCM, de una forma acorde con principios físicos, y para resaltar la simulación de circulaciones atmosféricas y variables climáticas a escalas espaciales más finas (IPCC, 2007).

Es importante resaltar que las condiciones de contorno laterales (proporcionadas por los GCMs) ofrecen la información atmosférica dinámica necesaria en los bordes latitudinales y longitudinales del dominio del modelo; es decir, la superficie de presión, los vientos, la temperatura y la humedad y las especies químicas necesarias cuando se está modelando el ciclo del azufre. No hay restricción prescrita en el límite superior de los modelos (a excepción de la entrada de la radiación solar).

Estas condiciones de contorno provenientes de los GCMs hacen referencia como se mencionó anteriormente, por ejemplo a cambios en patrones de presión, temperaturas de la superficie de mar, así que normalmente existen RCM desarrollados para sólo unos pocos GCMs. Algunas de sus aplicaciones son para periodos de tiempo limitados, por ejemplo, para una década simulada.

La ventaja de los RCMs es que pueden proporcionar una mejor representación espacial del cambio climático que los GCMs, pero no pueden corregir los errores en condiciones fronterizas. Éstos Proporcionan resultados con mucha resolución espacial (entre 10 y 50 km) a partir de simulaciones de varias decenas de años, y son capaces de describir mecanismos climáticos de realimentación a escala regional. Sin embargo, se ha de tener presente que un RCM no puede corregir los errores generados en el AOGCM en que se anide, por lo que

conviene elegir un AOGCM bien validado que represente de forma realista los rasgos de la circulación global que afecten a la región de interés, o bien considerar el anidamiento en un conjunto de diferentes AOGCMs para tener en cuenta la incertidumbre asociada a éstos.

Uno de los aspectos climáticos donde la regionalización dinámica puede proporcionar información difícilmente obtenible mediante otros métodos es el relativo al cambio en los llamados extremos climáticos. Generalmente se entiende por extremos climáticos los valores de variables atmosféricas muy alejados de los promedios climatológicos, que se producen en situaciones meteorológicas excepcionales. El interés que presenta este otro tipo de análisis radica en que se considera que los impactos de las alteraciones del clima futuro debidos a cambios en los extremos climáticos serán probablemente más severos que los relacionados con el cambio del clima promedio. Aunque la frecuencia con que ocurren tales eventos es relativamente pequeña, su impacto social, económico y medioambiental suele ser muy notable. La simulación de extremos climáticos requiere alta resolución espacial, dado que se trata a menudo de fenómenos de escala relativamente pequeña, por lo que los RCMs los representarán en general mejor que los GCMs.

A pesar de que el dominio de aplicación de los RCM abarca una pequeña parte del planeta, el tiempo de computación es muy superior al que precisa un AOGCM para simular un mismo periodo. A lo largo de la última década, el incremento de potencial computacional ha permitido pasar de simulaciones de pocas décadas de duración, por ejemplo utilizando periodos discontinuos de 30 años (1961-1990) para el clima actual y 2071-2100 para el clima futuro.

Los modelos AOGCM que se utilizan para cuantificar la respuesta futura del clima a perturbaciones inducidas por actividades humanas han de ser previamente evaluados. El examen de la fiabilidad que presenta un AOGCM para reproducir los principales procesos en el sistema climático, se realiza mediante una comparación sistemática entre resultados de simulaciones con condiciones de clima actual y datos climatológicos observados. Las simulaciones de clima actual con AOGCMs se llevan a cabo considerando la evolución de valores observados de concentraciones atmosféricas de GEIs. Los modelos también pueden evaluarse considerando condiciones paleoclimáticas, por ejemplo la pasada era glacial. Una vez que se ha evaluado satisfactoriamente su calidad, el modelo se utiliza para realizar simulaciones de la evolución temporal del futuro cambio climático.

A manera de resumen de lo anteriormente descrito, para realizar escenarios regionales o locales de cambio climático dinámicamente se debe:

1. Seleccionar el modelo dinámico regional a utilizar, o varios, preferiblemente.
2. Evaluar la capacidad que tiene cada modelo dinámico seleccionado para representar el clima presente y calcular la incertidumbre con que representa el clima (validación)
3. Incluir como condiciones de frontera en los modelos regionales de cambio climático (RCM), los valores encontrados con los modelos climáticos globales.
4. Incluir la información de topografía, uso del suelo y cuerpos de agua para la región a modelar.
5. Cuantificar la incertidumbre de los resultados obtenidos con el modelo regional y presentarla con el resultado final de los modelos utilizados.

6. Aplicar modelos de impacto que ofrecen información acerca de oferta hídrica que puede ser extrapolada a inundaciones, sequías, escases de alimentos.

Debido a que los RCM, no pueden corregir los sesgos generados por los AOGCM, es necesario validar los resultados simulados por dichos modelos (RCM), tal y como se describió en la etapa 2 del procedimiento para realizar escenarios regionales de cambio climático; dicha validación puede realizar por dos caminos:

1. Comparar las simulaciones realizadas para condiciones iniciales (simulaciones para el siglo xx, IPCC 20C3M) con datos históricos observados para el mismo periodo, durante 1961-1990, o 1951-2000 según disponibilidad de datos climatológicos del sitio en estudio. Las comparaciones deben incluir, al menos, las estadísticas de medios anuales o estacionales (por ejemplo, la precipitación de verano) y, probablemente, otras medidas, por ejemplo, como una prueba más severa, la distribución de frecuencias de las cantidades simuladas, así como la temperatura diaria sobre una grilla específica de la cuadrícula.
2. La Simulación del RCM es impulsado, no por la salida de un GCM, por observaciones mundiales reales llamadas Re-analisis en el mismo período de tiempo. El re-análisis utiliza un modelo de predicción del tiempo (PNT), teniendo datos de observación y asimilación que suministrase la estimación óptima del estado de la atmósfera en un día determinado (o el intervalo de tiempo más corto, por ejemplo, 6 horas).

La comparación de la simulación del Re-análisis puede hacerse con observaciones diarias para el mismo tiempo, lo cual puede proporcionar una prueba más rigurosa del modelo.

#### **6.2.1.1. GENERACIÓN DE PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO**

Los modelos acoplados océano-atmósfera GCM utilizados como punto de partida para las proyecciones climáticas regionales usualmente se ejecutan en un modo "transitorio", es decir, que la concentración de gases de efecto invernadero aumenta gradualmente (observado y proyectado) por lo general en periodos de 30 años y así mismo el cálculo de la evolución resultante del clima. Normalmente, esto se hace en períodos de 240 años, desde 1860 hasta 2100, con las concentraciones observadas utilizados para el período 1860-2000, y las concentraciones futuras calculadas a partir de uno o más escenarios de emisiones. Este lapso de tiempo transitorio no se realiza con los RCM debido al costo computacional; en cambio el RCM son usualmente impulsado con un "intervalo de tiempo" de 10 a 30 años de salida del GCM para proporcionar buenas estadísticas sobre el cambio climático para los períodos particulares de interés.

Para generar las proyecciones del cambio climático, dos de estos períodos de tiempo se utilizan para conducir el RCM. El primer período puede ser cuando no hay aumento de las emisiones (es decir, para representar el clima pre-industrial), o puede ser por un período climático reciente. 1961-1990 se elige a menudo, ya que es escogida por la Organización Meteorológica Mundial con períodos promedios de 30 años. El segundo período puede ser cualquier periodo en el futuro, aunque a menudo se toma al final del siglo (por ejemplo, 2071-



2100) cuando la señal de cambio climático será más clara contra el ruido de la variabilidad climática.

Algunos aspectos a tener en cuenta en la modelación regional del clima son:

Dominio del modelo: En general el dominio del modelo debe ser lo suficientemente grande para que permita desarrollar circulaciones internas de mesoescala e incluir forzamientos regionales relevantes (Giorgi & Mearns, 1999). Hay muchos factores a considerar:

- Escoger el dominio donde el área de interés este bien retirada de la zona lateral intermedia. Esto prevendrá ruido de las condiciones de frontera la cual contaminaría la respuesta en el área de interés.
- Todas las regiones que incluyen forzamientos y circulaciones, que afectan directamente detalles de fina escala del clima regional, deberían ser incluidos en el dominio.
- Es aconsejable no localizar las condiciones de frontera en áreas de terreno complejo para evitar ruidos debido al despareje entre los datos de resolución gruesa y el modelo topográfico de alta resolución en el interior adyacente a la zona lateral intermedia.
- Cuando sea posible, localizar las condiciones sobre el océano para evitar posibles efectos de balance energético superficial no realista cerca de las fronteras.

Algunos modelos de regionalización dinámicos son descritos a continuación:



1. **PRECIS:** Es un sistema de modelado regional derivado del GCM de tercera generación del Hadley Center en el Reino Unido el cual puede ser configurado para correr sobre cualquier área del globo, en ordenadores personales relativamente potentes. El modelo PRECIS está disponible gratis para ser usado por científicos en países en desarrollo involucrados en estudios de vulnerabilidad y adaptación llevados a cabo por sus gobiernos. Flujo dinámico, e involucra procesos como el ciclo del azufre; y los asociados a las nubes y a la dinámica de la precipitación. Los procesos radiativos, la superficie de la tierra y la profundidad del suelo son todos descritos dentro del modelo. El modelo requiere superficie prescrita y condiciones de frontera laterales. El modelo climático regional PRECIS usa como condiciones de fronteras los datos suministrados por el GCM del Hadley Centre correspondiente a un rango de escenarios de emisión. El modelo PRECIS produce enormes cantidades de datos climáticos incluidos variables estándares como la temperatura y la precipitación para períodos futuros (2070-2100). Debido a su alta resolución, se pueden recrear escenarios de cambio climático nacionales para países pequeños como los que componen el área del Caribe. Además con el modelo PRECIS se proveen software para el postprocesamiento, análisis y graficación de los datos generados por el modelo.
2. **CCM3:** El modelo CCM3 es derivado del modelo espectral australiano y del European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), versión adiabática no viscosa, siendo la versión original el Modelo CCM0A y el CCM0B

desarrollado en la División Climática y Global (CGD) del National Center for Atmospheric Research (NCAR). La nueva versión CCM3 presenta modificaciones sustanciales en el tratamiento de la difusión vertical, radiación, interacción nube-radiación y la mejora en los procesos en superficie (Land-surface).

3. NEWETA: Este modelo se implantó en el CPTEC (En el Centro de Pronóstico del Tiempo y Estudios Climáticos) de Brasil en 1996, para complementar la predicción numérica del tiempo que ha llevado a cabo desde principios de 1995 con el modelo de circulación general atmosférica. En Sudamérica principalmente desarrollado por Brasil pero con la capacidad de adaptarse más allá de sus fronteras. El modelo NewETA tiene en cuenta seis parámetros; temperatura, presión, humedad relativa del aire y viento- con tres componentes, uno para cada eje cartesiano del espacio. Con el modelo regional NewETA, es posible obtener, para toda América del Sur y océanos adyacentes, resoluciones de 40 km x 40 km. El NewETA tiene también una descripción más detallada de la topografía y una evaluación más sofisticada del mecanismo de formación de las lluvias. El modelo cubre un área que va desde los 55 grados de latitud sur (en el extremo sur del continente) hasta los 15 grados de latitud norte (en el Mar de las Antillas) y desde los 30 grados de longitud oeste (en el Océano Atlántico) hasta los 90 grados de longitud oeste (en el Océano Pacífico, a la altura de las Islas Galápagos). Se extiende, por lo tanto, mucho más allá de las fronteras de Brasil, y esto ayuda a detectar e incorporar las interferencias de factores externos, tales como la



temperatura de los océanos. En esta escala continental, el modelo NewETA permite efectuar pronósticos a cada hora para plazos de 12, 24, 36, 48, 60 y 72 horas.

4. RegCM3: El modelo de RegCM3 que se originó en el NCAR (National Center for Atmospheric Research) surge de una versión de meso-escala. El modelo RegCM describe los procesos de interacción suelo-planta-atmósfera utilizando el BATS (Biosfera-Atmósfera del Esquema de Transferencias; Este modelo considera la presencia de la vegetación y la interacción del suelo con los cambios de tiempo, energía y vapor de agua entre la atmósfera y la superficie. Este modelo regional posee una capa de vegetación, una de nieve y tres capas de suelo a diferentes profundidades.

La versión RegCM3 conserva la misma estructura de las versiones anteriores, pero incluye nuevas características tales como los gases de efecto invernadero (NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CFC), los aerosoles atmosféricos, y hielo en las nubes.



<b>Modelo</b>	<b>Resolución X*Y</b>	<b>Niveles</b>	<b>Convección</b>	<b>Procesos a mesoescala (pequeña escala)</b>	<b>Superficie terrestre</b>	<b>Radiación</b>
<b>CHRM</b>	0.5° (55 km) 81 x 91	20	Flujo de masa de aire, Tiedtke 1989	Kessler type, Lin et al. 1983	4 capas de temperatura y 3 de humedad. Dickinson 1984	Ritter y Geleyn 1992
<b>HadRM</b>	0.44° (50 km) 106 x 111	19	Flujo de masa de aire, Gregory and Rowntree 1990	Smith 1990, Jones et al. 1995	4 capas de temperatura y 4 de humedad. Cox et al. 1999	



<b>HIRHAM</b>	0.44° (50 km) 110 x 104	19	Flujo de masa de aire, Tiedtke 1989 + Nordeng 1996	Sundqvist 1988	5 capas de temperatura, 1 nivel 3D de humedad Dümenil and Todini 1992	Morcrette 1991, Giorgetta y Wild 1996
<b>REMO</b>	0.5° (55 km) 97 x 109	19	Flujo de masa de aire, Tiedtke 1989		5 capas de temperatura, 1 nivel 3D de humedad. Dümenil and Todini 1992	

*Tabla 5 Modelos de Circulación Regional*

### **6.2.1.2. INCERTIDUMBRE ASOCIADA A LA REGIONALIZACIÓN DINAMICA**

Existe un efecto relacionado con las escalas de movimiento, donde fenómenos más pequeños que la resolución de la retícula en la malla tridimensional, no son resueltos y que deben ser incluidos para darle la consistencia física y real al modelo.

La falta de datos climáticos en el tiempo o regiones con pocos registros de su clima, introducen incertidumbre a los modelos globales, incertidumbre que se dispersará en todo el modelo y, dicha región, se verá especialmente afectada en cuanto a la cantidad y calidad de sus proyecciones; esto sucede principalmente porque los puntos de observación de las variables meteorológicas no se localizan en los mismos puntos de la retícula o celda y no se tienen series históricas que cubran todo el periodo a modelar.

Según diversos autores, se dice que la menor incertidumbre corresponde a un alcance de 30-50 años. Inicialmente la incertidumbre está dominada por las condiciones iniciales, en cambio para alcances superiores a 50-60 años la incertidumbre está dominada por los escenarios de emisión.

La generación de modelos regionales y locales tiene asociada una incertidumbre que es la suma de varias incertidumbres. La primera corresponde al escenario de emisiones de CO<sub>2</sub> seleccionado, la cual viene desde el planteamiento mismo de las posibles dinámicas económicas del globo que darían como resultado una cantidad de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas

a la atmósfera, como es el caso de los escenarios SRES, los cuales tienen una probabilidad de ocurrencia difícil de cuantificar.

La segunda incertidumbre que afecta la exactitud de los modelos es la asociada con la variabilidad interna de los mismos (tanto globales como regionales y locales). A mayor tiempo de proyección, mayor es la incertidumbre, ya que predecir el clima en varias decenas de años involucra más factores a tener en cuenta en las simulaciones, con el agravante de que no se pueden conocer todas las condiciones futuras. Los modelos mismos tienen una incertidumbre propia que se suma a las dos anteriores.

Los modelos dinámicos deben tener la capacidad de involucrar los procesos físicos que intervienen en las condiciones atmosféricas y en su relación con la biosfera, principalmente con la hidrosfera. Factores tales como la nubosidad, que es un proceso físico a pequeña escala, deben ser parametrizados, lo cual implica hacer simplificaciones de la realidad para facilitar los cálculos. La cantidad de elementos que se simplifiquen, la forma como se realice dicha parametrización y los valores que se seleccionen, tendrán influencia en el resultado e implicarán una incertidumbre que en cada caso será diferente.

Es así, como el resultado de diferentes modelos pueden diferir entre sí aunque las condiciones de inicio sean iguales ya que suelen resolver el mismo problema de diferentes maneras.

Los modelos globales actuales trabajan con vegetación estable, no se contemplan las modificaciones que ocurrirían en la cobertura vegetal de acuerdo con el cambio de las condiciones climáticas y debido a que las proyecciones de cambio climático se realizan en la

escala cercana al siglo, los eventuales cambios de vegetación que se llegasen a presentar en el tiempo de proyección introducen mayor incertidumbre a las simulaciones realizadas.

La misma falta de certeza de qué ocurrirá con la economía, la población, la oferta de combustibles y los demás aspectos que se contemplan en la definición de los escenarios de emisiones de CO<sub>2</sub> del IPCC introduce incertidumbre a la modelación de cambio climático. Se suma a todo lo anterior que los diferentes escenarios de emisiones no tienen en cuenta cambios catastróficos asociados, por ejemplo, a guerras, crisis económicas, caídas drásticas en la población y por lo tanto, no las podemos cuantificar ni tratar en los escenarios regionales.

Contrario a las anteriores incertidumbres, están aquellas que se derivan de los resultados de los modelos climáticos globales relacionadas con la destreza del modelo para reproducir los fenómenos físicos de la atmósfera. Estas incertidumbres se pueden tratar y cuantificar ya que es factible evaluar los modelos de acuerdo a su desempeño en la zona estudiada.

Al llevar los resultados de los modelos globales a escala regional, las técnicas de regionalización utilizadas tienen un error asociado que incrementa la incertidumbre del resultado final que puede ser llevada a términos de error.

Una forma de disminuir la incertidumbre es mediante la construcción de ensambles de múltiples modelos que permitan reducir la incertidumbre total unido al uso de varios métodos de regionalización para evaluar incertidumbres adicionales. Mayor coincidencia entre modelos, simulaciones y técnicas se verá reflejada en menor incertidumbre y en la posibilidad de dar valores extremos. La unión de modelos es un trabajo estadístico del cual se recomienda mostrar la curva obtenida con más o menos una desviación estándar.

Para cuantificar la incertidumbre se requiere conocer la incertidumbre de los datos que se utilizan para parametrizar el modelo, por ejemplo, se debe conocer no solo el valor de la nubosidad a ingresar en el modelo sino también la incertidumbre que ese dato por sí mismo contiene.

### 6.2.2. TECNICA DE REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA

Los métodos estadísticos de regionalización se basan en el uso de técnicas estadísticas que relacionan de forma empírica las variables climáticas a gran escala proporcionadas por los AOGCMs con las variables locales/regionales observadas en superficie relacionadas con el fenómeno bajo estudio. La ventaja de estas técnicas de downscaling estadístico es que, además de ser aplicables a variables estándar, como la precipitación y la temperatura, también pueden aplicarse a cualquier otra variable, como la altura de oleaje en un punto de rejilla o la producción de cereales en una región, que son dependientes de la circulación a gran escala, pero que no son proporcionadas por los modelos globales y regionales. Por otra parte, las necesidades de cálculo de estas técnicas son, en general, modestas, y en algunos casos las técnicas no lineales utilizadas (para hallar predictores óptimos, o para ajustar los modelos) consumen también grandes cantidades de recursos en los procesos de optimización involucrados.

Este método consiste en establecer relaciones empíricas entre los campos atmosféricos proporcionados por los GCMs denominados Predictores. Estos predictores pueden ser:

Para la temperatura máxima y mínima; la **presión media al nivel del mar** y **altura geopotencial**, la **humedad relativa superficial**, la **velocidad zonal** y la **humedad**



**específica superficial.** Para la precipitación, la humedad específica superficial, el uso de otras variables predictoras como la **velocidad zonal superficial, vorticidad superficial, velocidad zonal, divergencia, humedad relativa y humedad relativa superficial** (ver tabla 6). Lo anterior se correlaciona con los campos de alta resolución en superficie, como temperatura y precipitación (denominados Predictandos) (Willby et al., 1998).

Estas características hacen que la regionalización estadística se haya potenciado en los últimos proyectos de cambio climático, que incluyen tareas específicas a este respecto.

Algunas de estas técnicas se han desarrollado y aplicado en el ámbito de la predicción a corto plazo y han sido posteriormente adaptadas a las escalas propias del cambio climático y al tratamiento de la incertidumbre asociada con la predicción por conjuntos.

Código	Nombre	Nivel	Tiempo	Unidades
Z	Geopotencial	3D	00	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
T	Temperatura	3D	00	K
Q	Humedad específica	3D	00	kg/kg
U	Componente U del viento	3D	00	m/s
V	Componente V del viento	3D	00	m/s
W	Velocidad vertical	3D	00	Pa/s
RV	Vorticidad relativa	3D	00	m/s
SLP	Presión a nivel del mar	2D	DM	Pa
2T	Temperatura a 2 metros	2D	DM	K
TP	Precipitación	2D	D	mm
Tx	Temperatura máxima	2D	D	K
Tn	Temperatura mínima	2D	D	K

**Tabla 6.** Predictores utilizados en el proyecto estcena. Las variables “3D” contienen información de los niveles 850, 700 y 500 hPa; las “2D” se refieren a datos de superficie “00” son valores instantáneos a las 00UTC; “DM” son medidas diarias y “D” son valores.

En este conjunto de técnicas se incluyen los métodos de regresión lineal (regresión múltiple, CCA, etc.) y no lineal (redes neuronales, etc.), y los métodos de condicionamiento o clasificación del tiempo (incluyendo las técnicas de análogos, 30 modelos de Markov ocultos, redes Bayesianas y otras técnicas de agrupamiento). Estas técnicas permiten trabajar con la máxima resolución temporal disponible y regionalizan los resultados mejorando la resolución espacial. Por otra parte, los generadores de tiempo (weather generators) han sido desarrollados para la predicción estacional, decadal y de cambio climático, trabajando con promedios mensuales o estacionales de los datos y permitiendo obtener al final del proceso series simuladas de datos diarios compatibles con las predicciones del modelo y con la estadística local observada. Una descripción más detallada de estas técnicas de downscaling, así como recomendaciones para su uso en la regionalización de cambio climático se tiene en (Wilby *et al.*, 2004).

En primer lugar, dado que existe un amplio abanico de técnicas de downscaling estadístico será necesario aplicar y comparar el mayor número de técnicas posibles en un marco común utilizando los mismos escenarios y las mismas redes de observación haciendo uso de datos de reanálisis y una rejilla común de observaciones de alta resolución, o un conjunto de observaciones fiables en una red de puntos representativa de la geografía. La validación de resultados permitirá descartar las técnicas no apropiadas y descubrir las ventajas de cada técnica en las distintas regiones y escalas temporales. La interacción entre la circulación a gran escala y la orografía a escala regional/local así como las particularidades geográficas de cada zona perfilan el carácter espacialmente heterogéneo del clima. Por tanto, es de

esperar que unas técnicas sean más apropiadas que otras para distintas variables y distintas zonas y, por tanto, resulte necesario este estudio comparativo para cuantificar adecuadamente la incertidumbre que, en cada zona, añade el uso de la técnica de downscaling estadístico.

En segundo lugar, una de las principales críticas al uso de técnicas de downscaling en estudios de regionalización de escenarios de cambio climático es la imposibilidad de demostrar que los modelos son apropiados para el clima futuro, con forzamientos distintos a los del período utilizado para inferir los modelos. Este problema es crítico para los estudios de cambio climático dada nuestra gran variabilidad climática. Podría ocurrir que los modelos fuesen estacionarios para un tipo de clima, pero no para otro. Por tanto, es necesario realizar un estudio que estime la significación de la estacionariedad de los modelos en presencia de distintos forzamientos radiativos y distintos períodos del clima presente, aunque existen ya algunos estudios al respecto. Para ello será necesario diseñar pruebas estadísticas apropiadas que permitan cuantificar la variabilidad de los modelos respecto de la ventana temporal y los escenarios utilizados para entrenarlos. También será necesario determinar las variables de gran escala que son más resistentes a estos cambios y que, por tanto, serían los predictores idóneos para las técnicas estadísticas, aun cuando no proporcionasen la mejor predicción del clima presente. De otra forma, se corre el peligro de sobreajustar los modelos a las condiciones actuales, perdiendo la capacidad de extrapolación.

En toda metodología de downscaling estadístico se necesitan tres grupos de datos: 1) un banco de datos de un reanálisis con el que verificar la metodología; 2) uno o varios GCMs



con uno o varios escenarios de clima futuros sobre los que aplicar la metodología y obtener las simulaciones futuras y 3) un conjunto de datos de observaciones reales procedentes de estaciones meteorológicas de la zona de estudio.

En la metodología para obtener proyecciones regionales de cambio climático a partir de simulaciones de GCM, utilizando downscaling estadístico, se deben realizar diversas actividades entre las cuales se destacan:

1. Selección adecuada de datos de reanálisis y los modelos de circulación globales utilizados para realizar las proyecciones.
2. Seleccionar la metodología de regionalización.
3. Selección de predictores: El éxito de una metodología de regionalización no reside únicamente en lo buena que es dicha metodología simulando el clima local sino que además una buena elección de los predictores supone un valor añadido a la misma. Por ese motivo se debe trabajar siempre con los predictores que mejor se adecuen a la región de estudio y a la variable a simular.
4. Verificación: El proceso de verificación se utiliza para estudiar la capacidad de la metodología a la hora de simular el clima a escala local. Este proceso consiste en comparar los resultados obtenidos al regionalizar los datos procedentes del reanálisis con las observaciones propias de las estaciones, la cual permitirá descartar las técnicas no apropiadas y descubrir las ventajas de cada técnica en las distintas regiones y escalas temporales.
5. validación, en el cual se comparan los resultados de realizar la regionalización tanto al reanálisis como al modelo de circulación general, para el escenario de control 20C3M.



Esto permite cuantificar el grado de incertidumbre y que tan robustas son las salidas de los GCM, y tanto el modelo como reanálisis deben trabajar a la misma resolución temporal y espacial y abarcar el mismo periodo.

Se puede observar que el procedimiento para el downscaling estadístico no pierde la esencia de las técnicas de regionalización anteriormente descritas, en las que la verificación y la validación de los modelos globales juegan un papel protagónico. Además de lo anterior, para la regionalización estadística se debe tener en cuenta lo siguiente:

1. Seleccionar los puntos de observación suficientes que cubran toda la región a proyectar.
2. Se deben asegurar series de mínimo 30 años con buena calidad de los datos y homogeneidad en las series.
3. Cuantificar la incertidumbre de los resultados obtenidos con la regionalización estadística y presentarla con el resultado final de los modelos utilizados.
4. Aplicar modelos de impacto que ofrecen información acerca de oferta hídrica que puede ser extrapolada a inundaciones, sequías, escasez de alimentos.

En este informe se explicará brevemente dos métodos empíricos más relevantes de regionalización estadística. Uno de ellos está basado en técnicas de análogos, otro basado en técnicas de regresión lineal que se suele utilizar como referencia habitual en este tipo de estudios.

### **6.2.2.1. Descripción del método de análogos FIC (Fundación para la Investigación del Clima, Madrid- España):**

En todos los métodos estadísticos son esenciales los criterios con los que se seleccionan los predictores procedentes de los GCM. Preferentemente, los predictores se seleccionarán bajo consideraciones teóricas y teniendo en cuenta el uso final de la técnica a desarrollar.

Si se denomina “X” al día problema, los campos atmosféricos de baja resolución (geopotenciales, temperaturas a diversos niveles de presión, etc) de este día “X” son “conocidos” (por ejemplo, la simulación de cierto GCM para ese día “X”).

A partir de estos campos conocidos, se desea estimar el valor de variables meteorológicas de superficie (en el caso de la versión actual, precipitación acumulada en 24 horas, temperaturas máxima y mínima) en ese mismo día “X” y en un punto (observatorio) concreto del territorio. Para realizar esa estima, el método trabaja en dos pasos.

En el primer paso, que podemos denominar estratificación analógica, se seleccionan, de un banco de datos que abarca un amplio período (1958-2000), aquellos “n” días con configuraciones atmosféricas más similares a las del día problema “X”. En algunos casos, el banco de datos utilizado es el reanálisis. La medida de similitud empleada atiende al parecido en los flujos geostroóficos o geopotenciales en las superficies de 1000 y 500 hPa. Estos flujos geostroóficos determinan el forzamiento sinóptico para la elevación/descenso de masas de aire y, por tanto, influyen directamente sobre los fenómenos de precipitación y nubosidad. Además, el flujo geostroófico en 1.000 hPa contiene información sobre la dirección del viento en superficie y, por tanto, sobre los efectos que la topografía puede ejercer en el reparto espacial de las variables nubosidad y precipitación.

En el segundo paso, se aplican procedimientos diferentes para la estima de las variables precipitación y temperaturas.

Para el caso de las temperaturas máxima y mínima diarias, se realiza, para cada una de estas variables, una regresión lineal múltiple con selección automática de predictores. La población de trabajo está compuesta por los “n” días seleccionados en el paso anterior. Los predictores ofrecidos para su eventual selección son, por una parte, valores de variables atmosféricas (espesores de capas bajas de la atmósfera) en la vertical del punto para el que se desea estimar la temperatura en superficie.

Una vez determinada la relación lineal existente entre los predictores seleccionados y la variable predictando (temperatura máxima o mínima), se aplica dicha relación a los valores de los predictores del día “X” para estimar el valor del predictando en este día problema.

Para el caso de la precipitación, se contempla la estima por simple promediado de los “k” días análogos más parecidos a “X”. Se pretende mejorar la metodología empleando el método de los “k” vecinos. De nuevo la población de trabajo está compuesta por los “n” días seleccionados en el paso anterior. La medida de similitud utilizada para elegir esos «k» vecinos en la población de “n” días, se determina en un proceso de selección automática de predictores en el que se mide la capacidad discriminante con respecto a la cantidad de precipitación. Los predictores ofrecidos para su posible selección son valores de variables atmosféricas (humedades, convergencia de flujo, advecciones térmicas o de humedad, estabildades) en la vertical del punto para el que se desea estimar la precipitación. Una vez determinada la medida de similitud, se buscan los “k” días de la población de “n”, con valores

(de los predictores seleccionados) más similares al día problema “X”. Del análisis de los valores de precipitación de esos “k” días se obtiene la estima de precipitación para el día “X”.

#### 6.2.2.2. Modelo de Regresión SDSM:

El método de regionalización estadístico SDSM (*Statistical DownScaling Method*) (Wilby *et al.*, 2002) está basado en la regresión lineal. Este método establece relaciones empíricas entre predictandos a escala regional (temperaturas extremas, precipitación, etc.) y predictores de escala global, normalmente extraídos de los modelos de circulación general. Una de las principales ventajas de este método es su fácil aplicación, al no necesitar grandes requerimientos de computación. Normalmente, está indicado para zonas heterogéneas o con orografía compleja. Sin embargo, para aplicar este método es necesario disponer de datos climáticos homogéneos durante períodos largos de tiempo. Además, como en el resto de los métodos empíricos, la obtención de proyecciones climáticas futuras conlleva la aceptación de una serie de hipótesis entre la que se encuentra que el modelo paramétrico ajustado tenga validez bajo condiciones futuras de cambio climático.

La aplicación del método SDSM consta de los siguientes pasos:

1. **Selección de los predictores:** Es la parte más delicada del método por la sensibilidad del mismo a la elección de los predictores y a la función de transferencia estadística obtenida (Wilby *et al.*, 2002). Esta selección se ha realizado mediante la aplicación del método de selección del mejor subconjunto de variables. Este método parte de una variable inicial y va incorporando variables sucesivas hasta que la incorporación de una nueva variable no mejora el ajuste. La variable inicial es aquella que está mejor

correlacionada con el predictando. Las variables sucesivas se van incorporando en función de la mejora que introduce en ajuste, evaluada a partir del coeficiente de determinación corregido por grado de libertad. El proceso finaliza cuando la mejora obtenida en dicho coeficiente es inferior a un umbral establecido.

2. ***Obtención del modelo de regresión:*** Según las características del predictando, se consideran dos modelos diferentes. Un primer modelo no condicional y un modelo condicional. El modelo no condicional supone una relación directa entre el predictando y los predictores, mientras que el modelo condicional supone que dicha relación no es directa, sino a través de una variable intermedia (la probabilidad de ocurrencia del fenómeno). Entre los métodos existentes para estimar los parámetros de la regresión lineal múltiple, se han considerado el método de mínimos cuadrados (MC) y el método MSAE (Suma de mínimos errores absolutos). En el primero, los parámetros se obtienen minimizando la suma de los errores al cuadrado y, en el segundo, se minimiza la suma de los errores absolutos.
  
3. ***Validación del modelo y aplicación para la obtención de escenarios futuros:*** En el modelo no condicional, y con objeto de aumentar la varianza de las series obtenidas, se añaden unos residuos aleatorios a la componente determinista. Estos residuos son números pseudoaleatorios obtenidos a partir de una distribución normal con media cero y desviación típica igual a la de los residuos del modelo ajustado. En el modelo condicional se contempla un proceso estocástico adicional, en la selección de

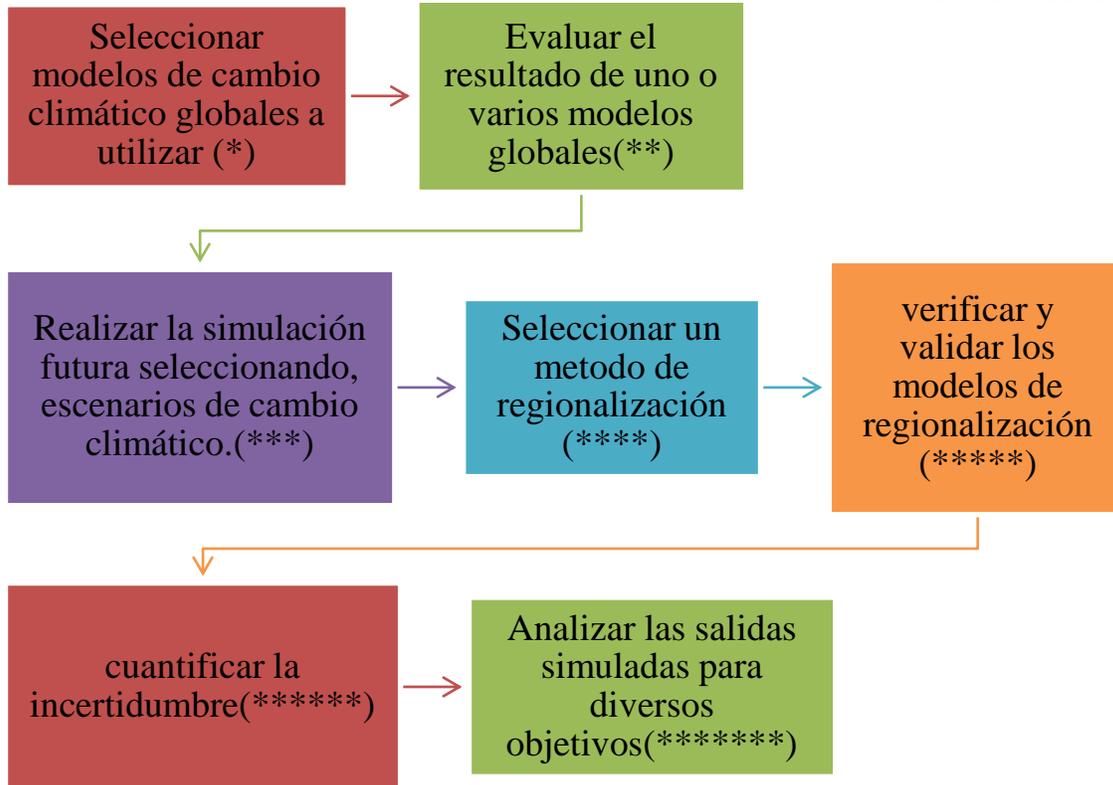
ocurrencia del fenómeno para un día determinado. Si la probabilidad obtenida a partir de los predictores es inferior a un número pseudoaleatorio extraído de una distribución uniforme, se considera que no se produce el fenómeno, en caso contrario se procede a la evaluación del valor del predictando. Este número pseudoaleatorio toma valores entre 0 y 1.

Otros tipos de métodos empíricos que pueden ser utilizados en estos estudios para la reducción de escala son el Método de índice de circulación y Método de análogos INM.

A manera de resumen y para concluir el apartado de las técnicas de regionalización regional y estadística, presentamos la siguiente tabla.

Método	Ventajas	Inconvenientes
<p><b>Regionalización Dinámica</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información con alta resolución espacial y temporal.</li> <li>• Información basada en modelos físicos, con inclusión de realimentaciones entre componentes del sistema climático.</li> <li>• Gran número de variables, físicamente consistentes entre sí.</li> <li>• Capacidad para generar nuevos extremos climáticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran coste computacional.</li> <li>• Valores en celdillas representativos de promedios sobre al área de cada celdilla, no de valores puntuales.</li> </ul>
<p><b>Regionalización estadística</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo coste computacional.</li> <li>• Aplicación rápida a muchos escenarios y modelos globales distintos.</li> <li>• Información con resolución espacial muy alta en localidades puntuales o rejillas regulares</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hipótesis de estacionariedad estadística: Supone que las relaciones empíricas deducidas en el clima actual son también validas en el futuro.</li> <li>• Necesita observaciones diarias de calidad para un periodo climático representativo.</li> <li>• Proporciona resultados sólo para las variables para las que se dispone de observaciones</li> </ul>

**Tabla 7 : Ventajas y desventajas de la regionalización dinámica y estadística. Fuente: Miguel Ángel Gaertner, José Manuel Gutiérrez y Manuel Castro. Escenarios regionales de cambio climático.**



**Ilustración 8:** Diagrama de flujo, resumen del proceso operativo para la generación de escenarios de cambio climático a través de MCGs.

#### EXPLICACIÓN DEL DIAGRAMA

(\*) Asignar, valores de condiciones iniciales para resolver numéricamente las ecuaciones que expresan las leyes de la física que gobiernan la atmosfera (temperatura, humedad, presión viento y otras componentes atmosféricas en todas y cada una de las celdillas que componen la malla del modelo), resultado de observaciones meteorológicas a escala global.

(\*\*)La evaluación de los modelos comprende comparar los resultados, con información histórica disponible (datos de reanálisis para el mismo periodo y resolución espacial del MCG) y se determina el sesgo en los valores obtenidos para determinar el modelo que

mejor se ajuste a la “realidad”. Se recomienda simular inicialmente para el siglo XX.

(Escenario 20C3M-periodo comprendido 1961-1990).

(\*\*\*) Generalmente para un periodo comprendido entre 2071 y 2100 o periodos de 30 años.

(\*\*\*\*) Puede ser regionalización dinámica o estadística. La regionalización se debe hacer tanto para estimaciones de SRES, como para modelación del siglo XX para el escenario 20C3M.

(\*\*\*\*\*) Se realiza a través de a través de datos observados de estaciones climatológicas, disponibles para el área de estudio.

(\*\*\*\*\*) Determinar los modelos de regionalización que menor incertidumbre arrojen

## **7. EXPLICACION DE BALANCE HIDRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES MEDIOS ANUALES.**

Tanto en el escenario de calentamiento pesimista tales como SRES A2, como en el de un calentamiento moderado (SRES B1), el agua es uno de los factores principales. Esto incluye cambios en los regímenes **de lluvias, evaporación y escorrentía**.

En Colombia se han realizado diversos estudios como los de (Mesa et al 1997), (Pérez et al 1998), (Ochoa y Poveda 2008), (Poveda 2009), (Poveda y Pineda 2009) los cuales han realizado análisis en búsqueda de señales de cambio climático en series largas de variables hidrológicas y climáticas (40-45 años), incluyendo cambios en la media y en la varianza, así como tendencias. Los resultados de estos estudios han confirmado la presencia de tendencias

crecientes estadísticamente significativas en variables tales como las **temperaturas mínimas** y **medias**, así como de **humedad relativa** y de **evaporación**. El balance hídrico se establece para un lugar y un período dado por comparación entre los aportes y las pérdidas de agua en un volumen de control definido por una cuenca y para uno o dos períodos futuros (2071-2100), con respecto a un periodo base (1961-1990). Por ejemplo, los aportes de agua a una zona (detección superficial) provienen de la precipitación, y las salidas, corresponden a la evaporación, por lo tanto el almacenamiento o volumen de control de una cuenca está dada por la tasa de cambio resultante entre los promedios de entrada y salidas de flujos de agua durante un intervalo de tiempo  $t$ .

### 7.1 Estimación de Caudales medios anuales.

La metodología empleada para la estimación de los caudales medios anuales fue tomada del trabajo de (Poveda *et ál.*, 2007) y se enuncia a continuación.

Para formular el balance hídrico se considera la **ecuación de masa** dentro de una columna de suelo-atmósfera, que bien podría ser una cuenca hidrográfica, una región o un continente. Se define  $W$  como el almacenamiento de agua en una atmosfera, en unidades de longitud (volumen por unidad de área),  $P$  es la precipitación,  $E$  es la evaporación (incluyendo la transpiración),  $H$  es el flujo neto de humedad en la atmosfera,  $S$  es el almacenamiento de agua en el suelo, también en unidades de longitud,  $R$  es el flujo de agua hacia fuera de la columna de suelo; constituido por escorrentía superficial y/o subterránea.  $P$ ,  $E$ ,  $H$  y  $R$  están expresados en unidades de lámina de agua por unidad de tiempo [ $LT^{-1}$ ], o equivalente, flujo o caudal por unidad de área. El balance de agua para la atmosfera está dado por la ecuación,

$$H + E - P = \frac{dw}{dt} \quad (12)$$

Y el balance para la columna de suelo es,

$$P - E - R = \frac{ds}{dt} \quad (13)$$

Combinando las ecuaciones (12) y (13) se obtiene la ecuación de balance de agua para el volumen de control.

$$H - R = \frac{d(w+s)}{dt} \quad (14)$$

Se considera la integración sobre un intervalo de tiempo largo (varias décadas), de modo que los cambios en las cantidades almacenadas  $W$  y  $S$  sean despreciables. Se tiene entonces que el promedio a largo plazo del influjo atmosférico neto  $H$  debe ser igual al promedio de largo plazo de la escorrentía neta,  $R$  y que ambos son iguales a la diferencia entre los respectivos promedios de precipitación,  $P$ , y evaporación,  $E$  (Poveda *et ál.*, 2007). La ecuación de balance de agua para la columna queda,

$$R = P - E \quad (15)$$

Por lo anterior, se puede observar que las ecuaciones (12) a (14) son exactas, no hay en ellas ninguna aproximación. La ecuación (14) es una aproximación que supone que el cambio en la cantidad almacenada en el suelo (o en la atmósfera), en el largo plazo, es mínima o despreciable respecto a las demás variables. Esta aproximación es muy buena para el cálculo de los promedios de largo plazo. Para ilustrar cómo esta aproximación es excelente se puede estimar la magnitud del error máximo como.

$$P - E - R \leq \frac{S_{max}}{n} \cong 15 \frac{mm}{año} \quad (16)$$

Todos los campos de los promedios de largo plazo para la precipitación,  $P$  y la evaporación real,  $E$  están estimados espacialmente. Para clarificar la exposición se indicará su

dependencia espacial usando como argumentos las coordenadas espaciales  $(x, y)$  (este, norte) en el caso ideal continuo o mediante subíndices  $i, j$ ; en el caso real discreto. El caudal  $Q_A$  a la salida de la cuenca, se calcula como:

$$Q = \iint_A (P(x, y) - E(x, y)) dx dy \quad (17)$$

## 7.2 PROMEDIO DE LA EVAPORACIÓN REAL ANUAL DE LARGO PLAZO.

Para el cálculo de la evaporación real existen diferentes métodos que permiten su estimación. En (Poveda *et ál.*, 2007) se estudiaron diferentes métodos para obtener la evapotranspiración potencial en Colombia, allí se encontró que los métodos que menor error presentaban en el cierre del balance de largo plazo eran: Turc, Morton's, Cenicafé, Holdridge y Penman. El método de Turc es el más adecuado para ser utilizados en este trabajo ya que se basa en la media de la temperatura y la precipitación ambas asociadas fuertemente con la topografía en los trópicos.

La ecuación de Turc (Vélez *et ál.*, 2000) estima la evaporación real con base en un balance de masas, en función de elementos meteorológicos simples como valores promedio de largo plazo de temperatura y de precipitación en una cuenca. Turc en 1954, adopta una familia de curvas,  $E = f(P, T)$  (evaporación) establecida a partir de observaciones hechas en 254 cuencas situadas en todos los climas de la tierra de la forma:

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} ; \text{para } \frac{P}{L} > 0,316 \quad (18)$$

$$E = P ; \text{para } \frac{P}{L} < 0,316 \quad (19)$$

E, es la evaporación real en mm/año, P es la precipitación del año considerado en mm, parámetro heliotermico expresado como  $L=300+25T+0,005T^3$ . Este último parámetro fue hallado por medio de regresiones hechas en las 254 cuencas y T es la temperatura media anual en grados centígrados.

ESCENARIO	P(mm/año)	E (mm/año)	L (mm)	Q medio(m <sup>3</sup> /s)
<b>20C3M 1981-2000</b>	1554	950	604	4882
<b>SRES A2 2046-2065</b>	1746	1080	666	5388
<b>SRES A2 2081-2100</b>	1948	1211	737	5962
<b>SRES B1 2046-2065</b>	1705	1040	665	5379
<b>SRES B1 2081-2100</b>	1705	1054	651	5264

**Tabla 8:** Ejemplo de balance hidrológico de largo plazo para el modelo CCSM3 para la cuenca del Rio Magdalena. Fuente:

(Acevedo Aristizabal, L. 2009).

ESCENARIO	P(mm/año)	E (mm/año)	L (mm)	Q medio(m <sup>3</sup> /s)
<b>20C3M 1981-2000</b>	1966	1086	880	7116
<b>SRES A2 2046-2065</b>	2036	1391	644	5212
<b>SRES A2 2081-2100</b>	2206	1486	720	5826
<b>SRES B1 2046-2065</b>	1963	1171	792	6406
<b>SRES B1 2081-2100</b>	2023	1236	787	6365

**Tabla 9:** Ejemplo Resultado de balance hidrológico de largo plazo para el modelo ECHAM5 para la cuenca del Rio Magdalena. Fuente:

(Acevedo Aristizabal, L. 2009).

## 8 USO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

### 8.1 MODELO HIDROLÓGICO WEAP

#### 8.1.1 Generalidades del modelo

Una vez obtenidos los resultados para las proyecciones de las variables meteorológicas en una región mediante el escalamiento de un GCM o con un modelo de circulación regional (RCM), es posible aplicar un modelo hidrológico para simular los caudales de una cuenca y así caracterizar y simular detalladamente los recursos hídricos dentro de esta región para un período determinado y una escala temporal definida.

WEAP (sistema de “Water Evaluation and Planning”) es una herramienta computacional desarrollada por Stockholm Environment Institute (SEI, 2012), que provee un orientación integral a la planificación de recursos hídricos.

Este modelo es generalmente utilizado para proyectos relacionados con el manejo del agua dulce, la asignación de recursos hídricos limitados, las preocupaciones respecto a la calidad ambiental, la planificación frente a la variabilidad del clima, y la necesidad de desarrollar e implementar estrategias sostenibles del uso del agua. Todo esto dentro de un contexto de cambio climático global y/o regional.

El Modelo WEAP ha sido utilizado ampliamente tanto a nivel mundial como nacional, por lo que se podrían nombrar muchos trabajos. Por otro lado, dentro de las aplicaciones más

usadas del modelo en diversos países tales como Chile, se encuentran las relacionadas con el análisis de recursos hídricos producto de cambios climáticos en cuencas chilenas (Cortés, 2010; Mena, 2009; Vicuña *et al.*, 2010; Salgado, 2011). Cabe resaltar que la mayoría de los trabajos consultados calibran el modelo WEAP a escala temporal mensual, mientras que otros tienen como objetivo principal conseguir una calibración del modelo a escala diaria para así realizar una proyección de las variables hidrológicas a nivel diario.

El Modelo WEAP está diseñado para operar en distintos modos:

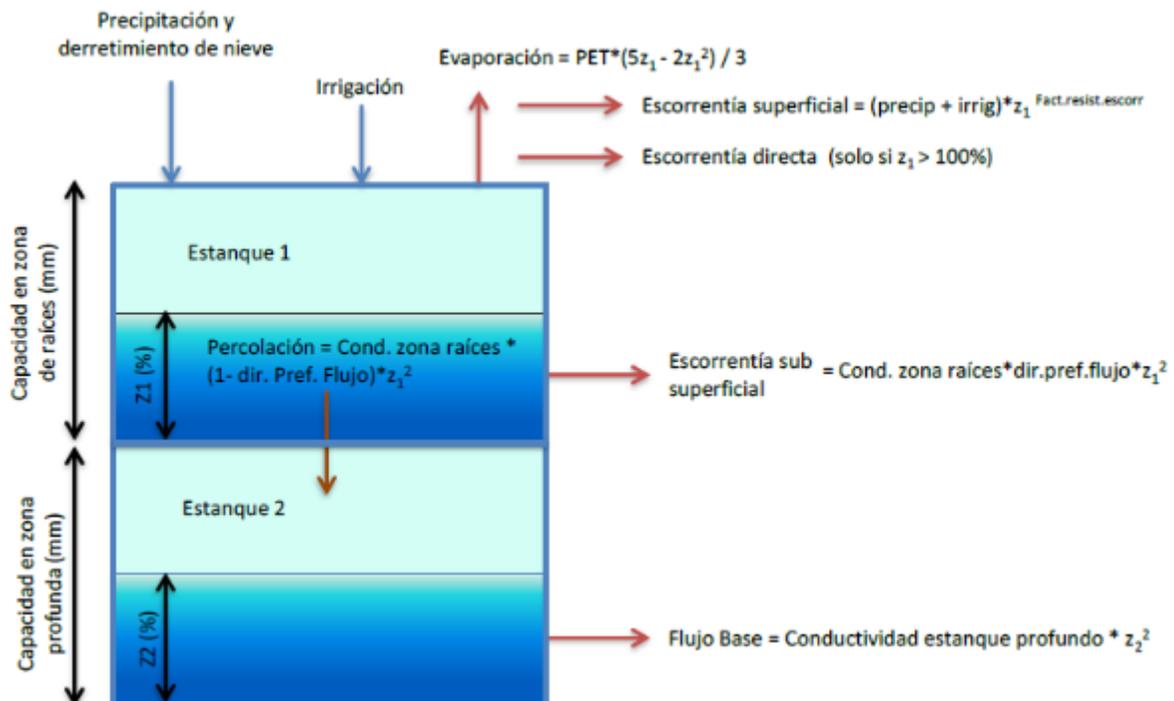
- Base de datos de balance de agua: proporciona un sistema para mantener información de oferta y demanda de agua.
- Herramienta de generación de escenarios: simula la demanda, oferta, esorrentía, caudal, almacenaje, generación, tratamiento y descarga de contaminantes y calidad del agua en los ríos.
- Herramienta de análisis de políticas: evalúa una completa gama de las opciones de desarrollo y manejo del agua, tomando en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.

**La utilización del modelo incluye generalmente varios pasos:**

- Definición del estudio: Se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
- Condición actual de la cuenca: Se desarrolla una caracterización de la demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema. Esto se puede ver como la etapa de calibración en el desarrollo de una aplicación.

- Escenarios: Se pueden estimar y cuantificar los impactos que tendría un sistema bajo diferentes supuestos sobre las políticas futuras, costos y clima, por ejemplo, en la demanda y oferta de agua, hidrología y contaminación a varios años.
- Evaluación: Los escenarios se evalúan con respecto a la disponibilidad de agua, los costos y los beneficios, compatibilidad con los objetivos ambientales, y la sensibilidad a la incertidumbre en las variables forzantes.

Para el modelo WEAP, la unidad básica que representa un área, corresponde a un *catchment* o “*elemento*” como se le llamará en el resto del trabajo. Y es mediante estas unidades como se puede desagregar la superficie de una cuenca, ya sea por subcuencas, bandas de elevación, áreas de cultivo, etc. Cada *catchment* o *elemento*, queda representado por dos estanques como los de la ilustración No. 9 y es a estas unidades a las que se les puede asignar valores específicos para las variables forzantes como para los parámetros del modelo. Los *elementos* a su vez, funcionan de forma independiente, es decir, no existe trasvases desde un *elemento* a otro y los balances que rigen el método, se hacen para cada *elemento* por separado. La forma de conectar los resultados de los balances de cada unidad es mediante un cauce que conduce el agua hasta la salida de la cuenca.



**Ilustración 9:** Esquema método de humedad del suelo

Si la superficie total de la cuenca se divide en  $N$  *elementos* o sub-áreas, las ecuaciones que rigen el método que aplican a los estanques de cada *elemento* son:

En el estanque superficial

$$:Sw_j \frac{dZ_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{(c,j)}(t) \frac{5Z_{1,j} - Z_{1,j}^2}{3} - P_e(t)Z_{1,j}^{RRF_j} - f_j K_{s,j} Z_{1,j}^2 - (1 - f_j) K_{s,j} Z_{1,j}^2 \quad (21)$$

Donde:

$Sw_j$ : Almacenamiento en la zona de raíces del *elemento*  $j$  (mm)

$Z_{1,j}$ : Almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento en la zona de raíces [0,1]

$P_e$  : Precipitación efectiva que incluye el derretimiento de nieve del manto nival de la subcuenca

PET: Evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia (Penman-Montieth)

$k_{(c,j)}$ : Coeficiente de cultivo para el *elemento* j

$K_{s,j}$  : Conductividad en la zona de raíces para el *elemento* j

$RRF_j$  : Resistencia a la escorrentía en el *elemento* j

$f_j$ : Coeficiente de partición relacionado al suelo, tipo de cobertura y topografía. Representa la dirección preferida del flujo que fluctúa entre horizontal y vertical [0,1]

$$RT(t) = \sum_{j=1}^N A_j (P_e(t)Z_{1,j}^{RRF_j} + f_j K_{s,j} Z_{1,j}^2) \quad (22)$$

Donde:

Escorrentía superficial total.

$Z_{1,j}^2$ : Almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento en la zona de raíces [0,1].

$P_e$ : Precipitación efectiva que incluye el derretimiento de nieve del manto nival de la subcuenca.

$K_{s,j}$ : Conductividad en la zona de raíces para el *elemento* j.

$RRF_j$  : Resistencia a la escorrentía en el *elemento* j.

$f_j$ : Coeficiente de partición relacionado al suelo, tipo de cobertura y topografía. Representa la dirección preferida del flujo que fluctúa entre horizontal y vertical [0,1]

$A_j$ : Área del elemento j



## 8.1.2 DATOS DE ENTRADA DEL MODELO HIDROLÓGICO

Para cada *elemento* de la cuenca (subdivisión del área) es necesario contar con las variables forzantes que definen la modelación hidrológica. Las variables forzantes que se utilizan son **precipitaciones** y **temperatura**, dado que corresponden a las exigencias mínimas para modelar con WEAP. Además, debido a que muchas veces no existe información disponible, en la cuenca y sus alrededores, de otras variables relevantes como viento, humedad, radiación, etc, sólo se toman la precipitación y temperatura como variables forzantes del modelo.

## 8.2 PROYECCIONES BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

### 8.2.1 Generación de series de datos de entrada al modelo

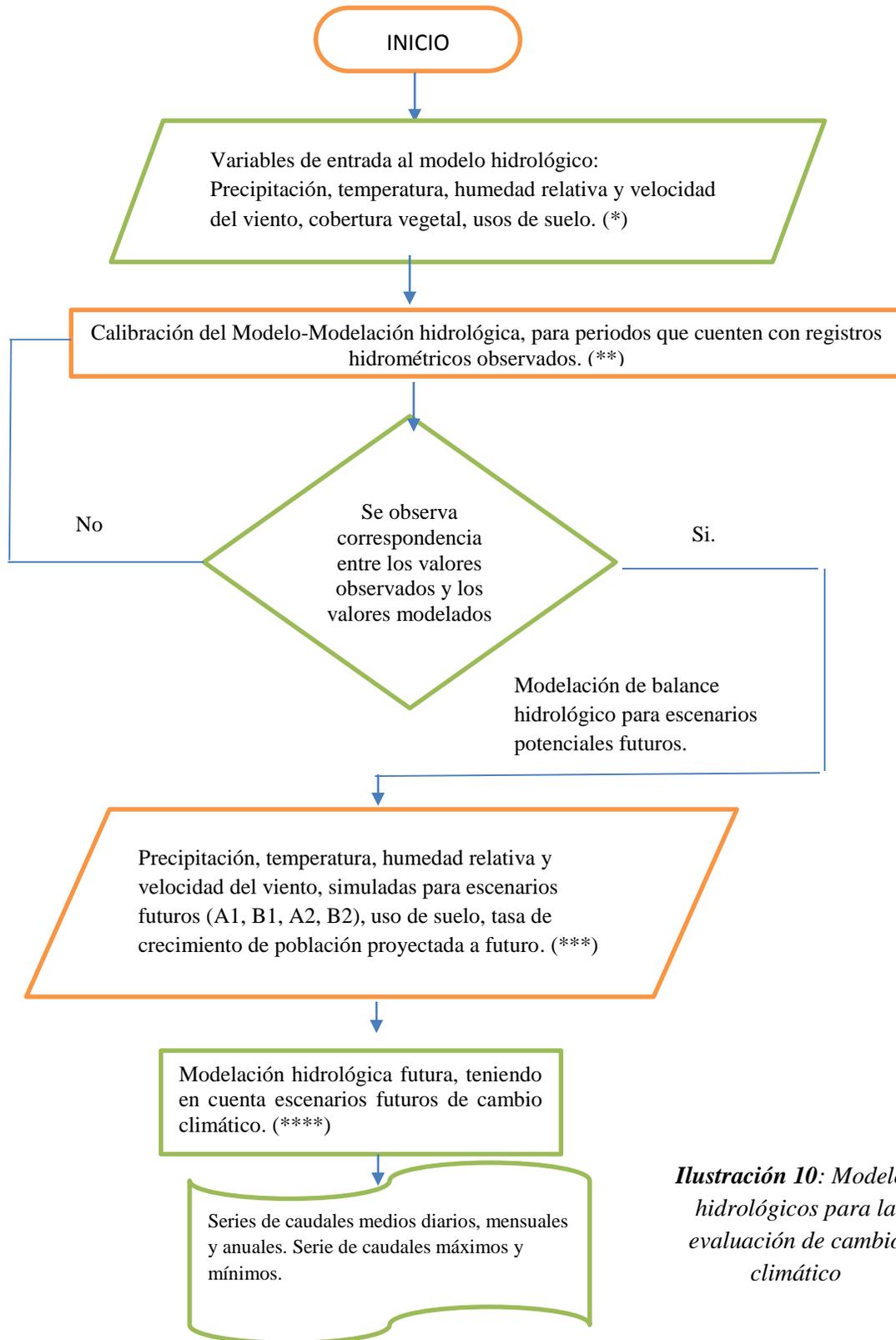
Antes de definir las series de datos necesarias para las proyecciones, es necesario distinguir y diferenciar lo siguiente:

- 1- GCM utilizado para proyectar variables meteorológicas
- 2- Escenarios de cambio climático utilizados.
- 3- Períodos futuros de proyección de variables hidrometeorológicas para cada escenario:

Antes de correr el modelo para proyectar los caudales futuros, se generan las series de datos de precipitaciones y temperaturas simuladas que rigen el modelo. Para esto, se toman los resultados de los escalamientos para las estaciones de precipitaciones y temperatura y se aplican los ajustes de calibración para generar las series futuras de los datos de entrada al modelo (escenarios de cambio climático de GCM).

Con las series de precipitaciones y temperaturas correspondientes a los escenarios de cambio climático escogidos escalados en las ubicaciones de las estaciones base (estaciones meteorológicas reales) que se utilizan en WEAP, es posible generar las series de datos para cada uno de los *elementos* que componen la cuenca, para así poder simular los caudales para los períodos futuros comprendidos entre los años 2071-2100.

Por lo tanto, se corre el modelo WEAP para los escenarios de cambio climático con sus correspondientes series de tiempo y se obtienen los caudales modelados para el futuro (períodos 2071-2100). Los análisis de estos resultados se realizan con base a la línea base modelada, es decir, los resultados del modelo para el periodo 1961-1990 (calibración + validación del modelo WEAP).



**Ilustración 10:** Modelos hidrológicos para la evaluación de cambio climático

## EXPLICACIÓN DEL DIAGRAMA

(\*) Entradas de variables climatológicas simuladas por los MCGs, para un intervalo de años que cuenten con información o registros históricos observados. Así como también información de uso de suelo y cobertura vegetal de la zona de estudio.

(\*\*) En la etapa de calibración del modelo se busca lograr un set de parámetros hidrológicos y operaciones que permitan obtener una representación de caudales simulados por el modelo hidrológico, que asemeje los datos históricos de la forma más cercana posible. Con base en estas comparaciones se realizan medidas estadísticas para estimar la precisión del modelo y de esta manera ajustar los parámetros hasta lograr la mejor respuesta de dichas medidas estadísticas.

(\*\*\*) Entradas de variables climatológicas al modelo hidrológico, simuladas previamente por los MCGs, y debidamente regionalizadas.

(\*\*\*\*) Una vez que se cuente con el modelo para la cuenca completamente calibrado se pueden realizar una serie de estudios específicos. Una clase de estos estudios corresponde a la evaluación de diferentes escenarios potenciales futuros (escenarios de cambio climático).

### 8.3 VALIDACIÓN DE MODELOS HIDROLOGICOS

Refsgaard y Knudsen (1996) definen la validación de un modelo como “el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para períodos fuera del período de calibración”. De esta manera, se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación muestran errores o límites aceptables.

Como se menciona, la validación de un modelo se hace para un lugar determinado pues es imposible, realizar una validación generalizada (así como es imposible realizar una calibración generalizada).

Usualmente, la validez de un modelo para un período diferente al de calibración se asume como verdadera considerando condiciones futura similares a las actuales. Estas asunciones son válidas para casos simples como completar datos, pues el período desconocido se encuentra “dentro” del período calibrado y las características pueden asumirse iguales, pero tratándose de proyecciones futuras con condiciones y forzamientos no predecibles, las circunstancias cambian.

Transponer un modelo a condiciones que podrían ser diferentes en el tiempo genera una gran incertidumbre. Para superar esta incertidumbre, Klemes (1986) propone un modelo jerárquico el cual será descrito a continuación.

### **8.3.1 MODELO JERÁRQUICO**

Este esquema de validación es llamado jerárquico porque las tareas son ordenadas de acuerdo a su complejidad y las demandas de las pruebas se incrementan en la misma dirección (Klemes, 1986).

Las categorías principales para diferenciar la prueba de validación son:

- condiciones estacionarias (similares al período de calibración); y
- condiciones no estacionarias (diferentes a las del periodo de calibración).

Cada una de estas categorías se subdivide en dos subgrupos de acuerdo al lugar donde se realizará la simulación:

- si se realiza en la misma cuenca que fue usada para la calibración; o
- si se realiza en una cuenca diferente.

La combinación de estos tipos genera cuatro posibles escenarios. Por ejemplo:

- Si se desea completar una serie de caudales: las condiciones son estacionarias y se trabajará en la misma cuenca.
- Si se desea simular caudales en una cuenca sin registro: las condiciones son estacionarias y se trabajará en otra cuenca.

Un tema importante es la posibilidad de validar un modelo para un período que incluya variaciones en el uso de tierras o causadas por el cambio climático (condiciones estacionarias). Klemes (1986) propone cuatro pruebas que considera como “mínimas” correspondientes a cada uno de los casos planteados:

#### **a. Prueba de muestra dividida (split-sample test)**

Aplicable para condiciones estacionarias y validación en una misma cuenca. En esta prueba, el registro se divide en dos sub-muestras de igual longitud, cada una de las cuales es utilizada en el proceso de calibración y la otra en el proceso de validación, y viceversa; es decir, se deben realizar dos procesos de calibración – validación intercambiando las sub-muestras, y los resultados deben ser comparados entre sí: el modelo se acepta solamente si los resultados son similares y los errores se encuentran dentro de un rango aceptable.

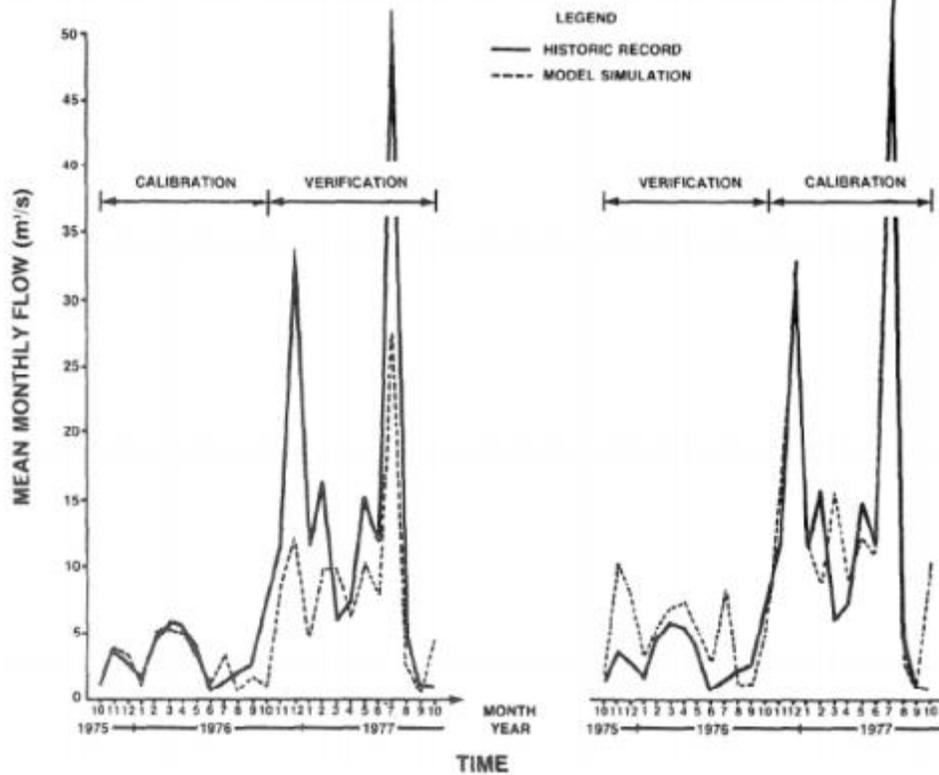
Si el registro disponible de información no permite la división en partes iguales u otra división significativa de las muestras, deberá utilizarse un modelo de nivel superior.

### **b. Prueba de muestra dividida diferencial (differential split-sample test)**

Esta prueba es necesaria para modelos que van a simular caudales en una cuenca determinada para condiciones distintas a las del registro disponible. Requiere una calibración utilizando los datos previos a los cambios de condición, el ajuste de los parámetros para caracterizar los cambios, y la validación en el período siguiente.

Por ejemplo, para simular el efecto de un cambio en el clima, la prueba debe tener la siguiente secuencia: se debe identificar en el registro histórico dos períodos con diferentes valores de los parámetros climáticos de interés, por ejemplo, uno con alta precipitación promedio y el otro con baja. Si el modelo está diseñado para simular el caudal para un clima húmedo, entonces debe ser calibrado en un segmento seco del registro histórico y validado en un segmento húmedo, y viceversa. En general, el modelo debe demostrar su capacidad para cambiar de condiciones secas a condiciones más húmedas o lo contrario. Si no se puede identificar segmentos con parámetros climáticos significativamente diferentes, el modelo debe probarse en otra cuenca (cuenca sustituta) en la que pueda hacerse la diferenciación.

En este caso, se deben utilizar dos cuencas sustitutas, calibrar y validar el modelo en ambas cuencas: solamente si los resultados son similares el modelo se considera adecuado. Es importante mencionar que en este caso, la prueba se realiza en cada cuenca de forma independiente, muy diferente a la prueba de cuenca representativa como se verá más adelante.



*Ilustración 11: Ejemplo de aplicación de la prueba de muestra dividida diferencial. Obsérvese los segmentos seco y húmedo, y como el período que fue utilizado para la calibración es posteriormente utilizado para la validación. Fuente: (Klemes, 1986).*

### c. Prueba de cuenca representativa (proxy basin test)

Se utiliza para transponer geográficamente un modelo. Si el caudal en una cuenca no aforada es C, se deben seleccionar dos cuencas aforadas A y B dentro de la región: el modelo debe ser calibrado en la cuenca de A y validado en la cuenca B y viceversa. Sólo si los dos resultados de la validación son aceptables y similares el modelo tendrá un nivel básico de credibilidad para simular el caudal en la cuenca C.

Esta prueba también se aplica cuando se desea extender el registro de caudales de una cuenca C y los registros no son adecuados para una prueba de muestra dividida; es decir, los registros

de C no se utilizan por ser inadecuados y la extensión se trata como la simulación de una cuenca no aforada.

**d. Prueba de muestra dividida diferencial de cuenca representativa (proxy-basin differential split-sample test)**

Al igual que la prueba anterior, la calibración es indirecta y se utiliza información de otras cuencas. Esta prueba se aplica cuando se busca transponer un modelo geográfico y climáticamente. La prueba puede tomar diferentes formas dependiendo de la tarea específica involucrada en el modelamiento. En el caso más simple de extrapolación geográfica y climática dentro de una región, la prueba tendrá la siguiente forma: se seleccionan dos cuencas aforadas, A y B, con características similares a las de la cuenca C y se diferencian segmentos con diferentes parámetros climáticos (por ejemplo, húmedo **h** y seco **s**) en los registros históricos de ambas; luego, para evaluar el impacto de un **escenario de clima seco**, el modelo se calibra primero en **A-h** y se valida en **B-s**, para finalmente calibrarlo en **B-h** y validarlo en **A-s**. El modelo se considera adecuado si los errores de ambas validaciones son aceptables y no difieren significativamente. Análogamente, un modelo diseñado para evaluar el impacto de un **escenario de clima húmedo** tendría que ser calibrado / validado sobre **A-s** / **B-h**, y en **B-s** / **A-h**.

## 9 EXPERIENCIAS EN COLOMBIA

A Continuación citamos junto a una breve descripción algunos estudios realizados en Colombia:

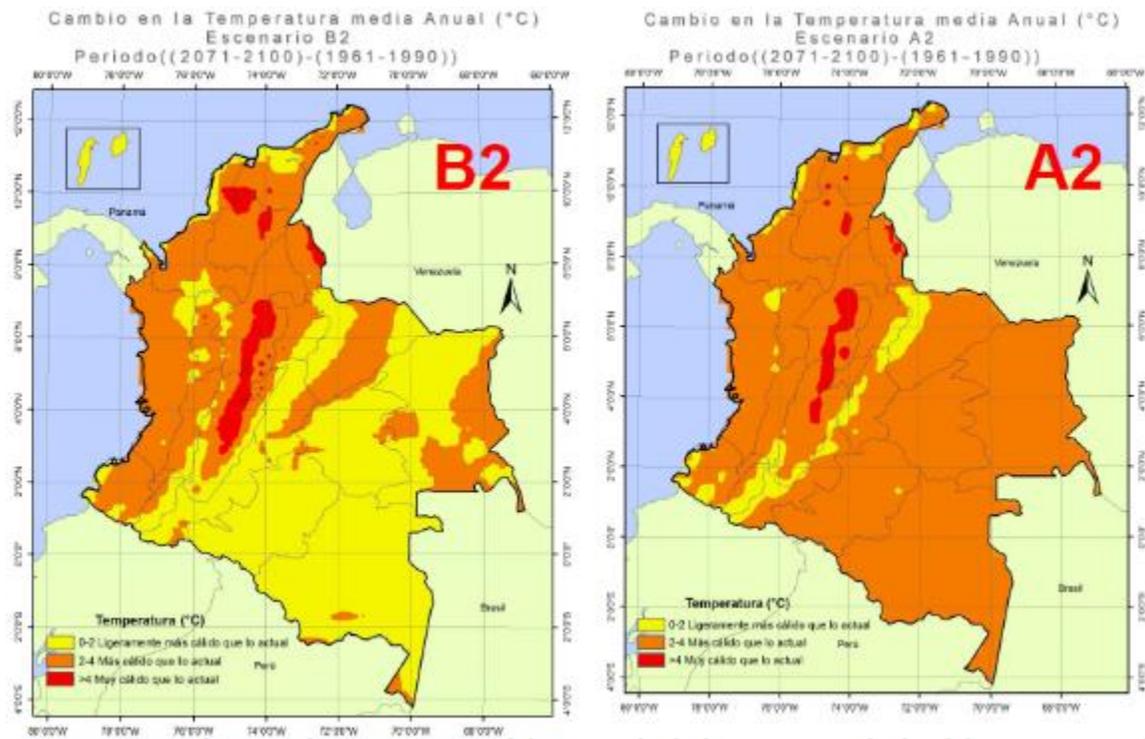
- **Acevedo L.A, Poveda G. (2008).** Comparación de series de precipitación con los GCM CCSM3, ECHAM5, HADGEM1, Y MIROC3.2 HIRES, PARA EL SIGLO XX EN COLOMBIA. XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA (pág. 12). Cartagena

**Descripción:** Se realiza una comparación de los resultados obtenidos de precipitación en el siglo XX por los Modelos de Circulación Global ECHAM5, CCSM3, HADGEM1 Y MIROC 3.2 con series puntuales de precipitación, las cuales fueron tomadas de las siguientes bases de datos: HidroSig, Red Río, CeniCafé, LBA, WhyBam, Bogotá y IDEAM para toda Colombia y para el intervalo de tiempo comprendido entre 1950 y 1999. Se realizaron comparaciones entre los datos, encontrando la correlación existente entre cada estación y el pixel asociado; y encontrando la correlación entre el promedio de las estaciones dentro de un pixel del modelo y el modelo. Se realiza el promedio trimestral de largo plazo y se compara porcentualmente.

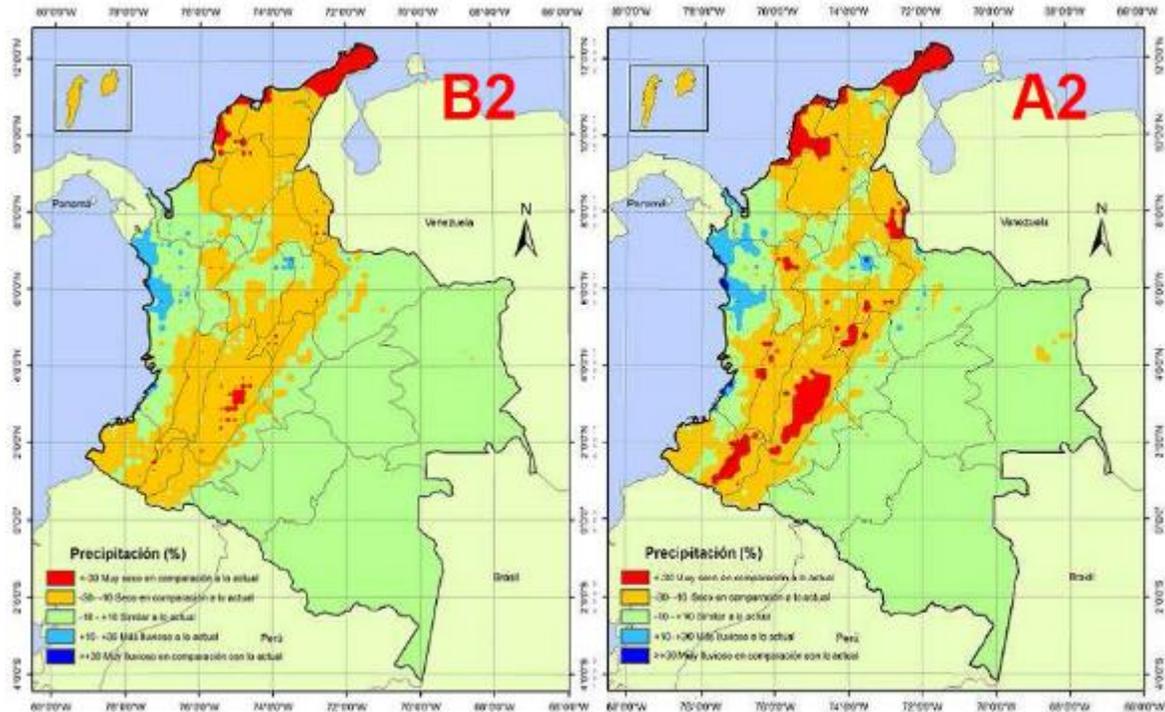
- **IDEAM. (2009).** *“Elaboración de escenarios de cambio climático para la segunda mitad del siglo XXI en diferentes regiones del territorio colombiano y de un informe de evaluación del cambio climático en Colombia que incluya entre otros las tendencias actuales y futuras y los posibles impactos del cambio climático en los sectores socioeconómicos y regiones del país”*. Bogotá: Conservación Nacional, Universidad Nacional de Colombia.

**Descripción:** Generación de proyecciones de cambio climático para el territorio Colombiano bajo los escenarios A2 y B2 del IPCC en el periodo comprendido entre 2070-2100. Para el efecto se utilizó el modelo PRECIS en resolución espacial de 25 x 25 kilómetros. Con el modelo se reprodujo el clima del norte de Suramérica y del Caribe en la escala espacial. Para tal fin, el procedimiento básico que se realizo fue en primera medida la Simulación del clima

de Colombia para el período 1961-1990 con PRECIS utilizando los datos de ERA40 del Centro Hadley; posteriormente se realizó la validación de la distribución espacial y temporal de las variables temperatura del aire y precipitación simuladas con PRECIS para el período 1961-1990 comparando con la distribución basada en las mediciones del mismo periodo y finalmente la Simulación de la distribución de las variables temperatura del aire y precipitación para el período 2070-2100 bajo escenarios A2 y B2 (ver ilustraciones 12 y 13).



**Ilustración 12.** Cambios en la temperatura del aire calculados a partir de la diferencia entre las temperaturas medias anuales de los períodos 1961-1990 y 2070-2100 (escenario B2 – izquierda; escenario A2 – derecha) Modelos PRECIS. Fuente: (IDEAM, 2008).



**Ilustración 13.** Cambios en la precipitación anual (en % del promedio multianual 1961-1990) calculados a partir de la diferencia entre las precipitaciones anuales de los períodos 1961-1990 y 2070-2100 (escenario B2 – izquierda; escenario A2 – derecha Modelos PRECIS. Fuente: (IDEAM, 2008).



**Earth Simulator  
GSM-MRI**

**Cluster IDEAM  
PRECIS**



**FIREFLY  
CCSM-WRF**

**Ilustración 14.** Tecnología utilizada por IDEAM para generar escenarios de cambio climático

## 10 CONCLUSIONES

La proyección regional de los escenarios de cambio climático es un problema actual de gran importancia, que se ha convertido en una herramienta esencial para poder realizar los estudios de impacto del cambio climático a futuro, y son necesarios para tener en cuenta la variabilidad espacial del clima y sus implicaciones inherentes a la agricultura, ecología, hidrología, recursos energéticos, infraestructura, estructuras hidráulicas etc. En la actualidad existen distintas metodologías complementarias para abordar este problema, que han sido desarrolladas y aplicadas en distintas regiones del mundo, mostrando sus ventajas e inconvenientes. En este documento se abordan dos de las principales metodologías para generar escenarios de cambio climático, para las cuales se encontraron las siguientes ventajas y desventajas:

1. Las técnicas de downscaling estadístico ofrecen una serie de ventajas para la regionalización de escenarios de cambio climático. Por una parte, al tener una menor necesidad de cálculo que las técnicas dinámicas, se pueden realizar todos los cruces posibles con los GCMs y escenarios disponibles, permitiendo así un análisis exhaustivo de las incertidumbres y de la contribución de cada una de sus componentes (escenarios, modelos globales, técnicas de regionalización). Por otra parte, estas técnicas permiten trabajar con predictores transformados (por ejemplo, datos estandarizados), que muestran un mayor grado de consistencia entre re-análisis y GCMs (Brands 2011), permitiendo así eliminar los errores debidos a los sesgos sistemáticos de los GCMs (nótese que los modelos dinámicos han de trabajar con los datos originales del GCM para garantizar la consistencia de las variables). Otra ventaja de las técnicas de regionalización estadística es que utilizan la climatología

observada de la variable local de interés, durante el periodo de referencia, que permiten obtener proyecciones que pueden ser utilizadas directamente en estudios de impacto, sin necesidad de ser calibradas posteriormente (la calibración es un problema complicado que añade otra fuente de incertidumbre y no estacionalidad a la regionalización dinámica). Algunos de los factores anteriores también constituyen una limitación para los métodos de downscaling estadístico ya que, por ejemplo, solo permiten realizar proyecciones para aquellas variables y localidades/regiones en las que se disponga de información histórica.

Existen también una serie de problemas que han de ser tenidos en cuenta cuando se aplican estas técnicas a escenarios de cambio climático. El principal de estos problemas es la posible falta de robustez, ya que el modelo aprendido en unas condiciones dadas (clima presente), se aplica en condiciones distintas (clima futuro) donde las relaciones empíricas puede no ser ya validas (nótese que este problema también es relevante para aquellas parametrizaciones de los modelos dinámicos que son ajustadas de manera empírica a partir de una muestra observada).

2. Por su parte las técnicas de regionalización dinámica utilizan modelos regionales del clima con mayor resolución y entregan una descripción más fidedigna del relieve, acoplándose a los modelos globales que proporcionan las condiciones de frontera para las simulaciones a mayor resolución. Estos modelos representan las ecuaciones de balance de materia, balance energético, equilibrio hidrostático, movimiento y todas aquellas involucradas en la descripción física de los movimientos atmosféricos, por lo que ofrecen resultados precisos y confiables, sin embargo, requieren buenas

máquinas de cómputo, tiempo de preparación de los datos de entrada, claridad en la definición de las condiciones de inicio y tiempo y capacidad de procesamiento.

Ningún MCR puede señalarse como superior a los demás, siendo los promedios del “ensemble” los que generalmente mejor se ajustan a la climatología.

Es importante analizar **eventos extremos** con miras a estudios de vulnerabilidad y definición de planes de mitigación y adaptación, debe partir de las diferentes etapas ya mostradas para la generación de escenarios de cambio climático para las que posteriormente, no resulta suficiente elaborar solo las series de precipitación y de escurrimiento medio anual, si no también **caracterizar eventos extremos de precipitación y caudales de gran magnitud** en las principales corrientes del país y con esto poder **elaborar mapas de riesgo donde ubiquemos las principales planicies de inundación y plantear diversas estrategias para mitigar los daños debido a inundaciones**. Esto es posible por medio del uso de Modelos Hidrológicos que precisan los resultados de los modelos climáticos, para fines aplicativos, correctivos y de adaptación.

### **Trabajos futuros:**

1. La realización trabajos posteriores a partir de esta revisión bibliográfica, los cuales se puedan enfocar en la implementación de modelos de cambio climático para la estimación de eventos extremos a futuro en zonas (cuencas) de estudio del país.
2. Realización de curvas IDF para cuencas de estudio, en zonas de interés del país, a través de las variables climatológicas simuladas a futuro.



3. Modelación hidrológica para la predicción de escorrentías futuras dados los escenarios de cambio climático.
4. Analizar los resultados de variables climatológicas para futuros escenarios de cambio climático, emitidos por el **IDEAM**, para una zona de interés y plantear su validez.
5. Cómo influyen las proyecciones climatológicas en actividades como la agricultura, protección civil, gestión de recursos hídricos, energía, transporte, entre otros.

Por otra parte, debido a la alta exigencia computacional para la modelación de escenarios de cambio climático, para el año 2010 se realizaron estas modelaciones para 24 regiones de Colombia (Escenarios de cambio climático, modelados por el **IDEAM**), pero en el Departamento de Bolívar aún no se han realizado este tipo de simulaciones.

Una propuesta alternativa, para realizar este tipo de modelación es estableciendo convenios con centros, entidades, institutos de investigación que cuenten con la tecnología asequible y estudios previos realizados, para la simulación y creación de escenarios de cambio climático, y permitir que grupos de investigación integrado por profesores y estudiantes puedan desarrollar a corto, mediano o largo plazo estudios en diversos temas relacionados con la implementación de modelos de cambio climático. Esta propuesta se ha estado gestionando con la subdirección de Hidrología y la subdirección de Meteorología del **IDEAM**, quienes han mostrado gran interés por establecer este tipo de iniciativas, durante el primer semestre de 2014.

## 7. RECOMENDACIONES

El conocimiento del cambio climático en el País se debe hacer de tal forma que se convierta en una base científica para la toma de decisiones. La definición de políticas para el sector agropecuario, para el manejo del recurso hídrico, para los planes de ordenamiento territorial, para el manejo de bosques, etc. Se deben hacer teniendo en cuenta información de calidad que se genere bajo el concepto de cambio climático. Para obtener una base científica consistente y encaminada al marco adaptativo y de desarrollo; los tomadores de decisiones, las diferentes corporaciones y organizaciones interesadas, deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones a la hora de generar escenarios de cambio climático.

- Como punto de partida, se debe utilizar información sobre la variabilidad histórica y los cambios del clima (en especial los eventos extremos), así como sobre experiencias de adaptación.
- La adaptación es un proceso de aprendizaje social e institucional. Se debe congregar distintos actores involucrados (instancias de decisión, científicos, desarrolladores de modelos, grupos objetivo, especialistas sectoriales, etc.) para discutir la información que se ha recogido sobre el cambio climático y sus implicaciones.
- Intentar hallar diferentes escenarios regionales
- Fomentar la investigación sobre el impacto del cambio climático, a fin de incrementar la base de conocimientos.
- Recopilar información relevante y ponerla a disposición de otras personas.
- Realizar proyecciones de cambio climático a largo plazo.
- Obtener información de escenarios de cambio climático globales.



- Generar escenarios regionales y locales de cambio climático.
- Acopiar los resultados de escenarios de cambio climáticos regionales y locales de terceros.
- Suministrar asistencia técnica para la realización de escenarios climáticos regionales y locales.
- Facilitar los estándares de generación de información climática y de proyecciones climáticas para el País.

Uno de los principales desafíos será el manejo de la incertidumbre. Para ello, pueden serle útiles las siguientes sugerencias:

- Distinguir entre las incertidumbres relacionadas con modelos y las que se vinculan con los escenarios de emisiones.
- No se debe suponer que la incertidumbre significa que no habrá cambio. Una de las opciones más improbables es que nada cambie.
- En las proyecciones del cambio climático siempre habrá una incertidumbre inherente e imposible de resolver. Se requiere un cambio de paradigmas. Los tomadores de decisiones deben manejar la incertidumbre, no superarla.
- En lugar de recurrir a un único modelo, se recomienda utilizar “rangos de posibilidad”. Los niveles de incertidumbre divergen en relación con el área geográfica, el tiempo y las variables climáticas (ej: siempre habrá menos incertidumbre sobre la temperatura que sobre la precipitación). Trate de identificar tanto el origen de la información sobre el cambio climático en su región (escenarios, modelos, evaluaciones de impacto), como el nivel de incertidumbre implícito.

- Ser exacto cuando mencione las escalas temporales (un aumento en el nivel del mar de un metro en 2100 o en 2030 puede hacer una gran diferencia).
- Ser transparente y preciso (y cuando discuta una incertidumbre, ponga en claro cuáles son las principales fuentes de la misma: ¡los escenarios de emisiones más que los modelos!).

Se sugiere que las entidades interesadas en realizar escenarios de cambio climático regionales y locales se especialicen en una o algunas de las anteriores líneas de acción para que perfeccionen su conocimiento, generen datos sólidos comparables entre sí y aprovechen más sus recursos humanos, tecnológicos y de tiempo de procesamiento

## 11 BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Estatal de Meteorología. (2009). *Generación de Escenarios Regionalizados de Cambio Climático para España*. España. Ministerio de Ambiente y medio rural y Marino.
- Acevedo Aristizabal, L. (2009). *Estimación Hidrológica Bajo escenarios de Cambio Climático*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. CO
- Reyes , C. A. (2012). *proyección de variables hidrológicas diarias a largo plazo en la cuenca del río tinguiririca en bajo los briones, bajo escenarios a1b y a2 de cambio climático*. Santiago de Chile
- Brands, S., Herrera, S., San-Martin, D., & Gutierrez, J. M. (2011). Validation of the ENSEMBLES Global Climate Models over southwestern Europe using probability density functions: A downscaling perspective. *Climate Research*, 145-161.

- Bhaskaran B., Jones R. G., Murphy J. M. and Noguera M. (1996). Simulation of the Indian Summer Monsoon Using a Nested Regional Climate Model: Domain Size Experiments. *Climate Dynamics*, (12) ,573-587.
- Conservación Internacional, Universidad Nacional de Colombia. (2008). *Informe Final del contrato: Elaboración de escenarios de cambio climático para la segunda mitad del siglo XXI en diferentes regiones del territorio colombiano y de un informe de evaluación del cambio climático en Colombia que incluya entre otros las tendencias actuales y futuras y los posibles impactos del cambio climático en los sectores socioeconómicos y regiones del país*. Bogotá, Colombia.
- Cortés, G. C. (2010). *Evaluación de un modelo hidrológico semi distribuido para la estimación de la esorrentía de deshielo en el río Juncal*. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Danish Meteorological Institute. (2005). *ENSEMBLES, An Integrated Project under the 6th Framework Programme of the EU. Project overview and update for RT6 Meeting*. Copenhagen.
- Duarte, C. (2006). *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. CSIC.
- Klemes, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. Hydrological Sciences. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 31,1, 3/1986



- Kropp, J., & Scholze, M. (2009). *Cambio Climático Información para una adaptación eficaz* . Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit.
- Feddersen, H., & Andersen, U. (2005). A method for statistical downscaling of seasonal ensemble predictions. *Tellus*.
- Giorgi, F., & Mearns, L. (1999). Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Geophysical Research*,(104), 6335-6352.
- IDEAM- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2008). *Escenarios de Cambio Climático para Colombia*. Bogotá, CO
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2001). *Comunicación Nacional Ante la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático*. Bogotá, CO.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). *Adaptación al Cambio Climático, Brochure Proyecto INAP*. Bogotá, CO.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). *Segunda Comunicación Nacional Ante la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático*. Bogotá, CO.
- IPCC – The Intergovernmental Panel of Climate Change. (1995). *Cambio Climático: glosario del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. New York, USA.

- IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2000). *SRES: Special Report on Emissions Scenarios*. New York, USA.
- IPCC – The Intergovernmental Panel of Climate Change. (2001). *Informe de Síntesis. Anexo B: Glosario de términos utilizados en el Tercer Informe de Evaluación del IPCC*. New York, USA
- IPCC – The Intergovernmental Panel of Climate Change. (2001). *CLIMATE CHANGE 2001: THE SCIENTIFIC BASIS. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. New York, USA.
- IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *AR4 (Fourth Assessment Report): Climate Change<2007, The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. New York, USA.
- IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. New York, USA.
- Klein, T. A., Zwiers, F., & Zhang, X. (2009). *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for Adaptation*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- Mena, D. (2009). *Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca andina del río Teno, usando un modelo WEAP*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Moss, R., & Schneider, S. (2000). *Uncertainties in the IPCC TAR: recommendations to Lead Authors for more consistent assessment and reporting*. En: *Guidance Papers on the Cross-Cutting Issues of the Third Assessment Report of the IPCC*. New York: Grupo de Expertos Intergubernamentales sobre Cambio climático.



- Murphy, J.M. et al. (2004) Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature* 430, 768-772.
- Narula, S. C., & Wellington, J. F. (2002). *Sensitivity analysis for predictor variables in the MSAE regression*. Ginebra, Suiza: Cambio Climático, Organización Meteorológica Mundial. Recuperado de <http://www.gispri.or.jp>. Narula.
- Ochoa, A., & Poveda, G. (2008). Distribución Espacial de Señales de Cambio Climático en Colombia. *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Cartagena de Indias.
- Oviedo, B., & León, G. (2010). *GUÍA DE PROCEDIMIENTO PARA LA GENERACIÓN DE Escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales*. Bogotá: IDEAM
- Pérez C.A. et al. Evidencias de cambio climático en Colombia: Tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual [Publicación periódica] // *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines* (27). - 1998. - págs. 537-546.
- Poveda, G. et al. (2007). HydroSIG: An Interactive Digital Atlas of Colombia's Hydro-climatology. *Journal of Hydroinformatics* (9), 145-156.
- Poveda, G. et al. (2007). Linking Long-term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering*, (12), 4-13.

- Poveda, G. (2009). Calentamiento climático global: Causas, efectos y retos para Colombia y el mundo. *I Encuentro Internacional Cambio Climático Carbono Neutral*. Bogotá: Universidad del Rosario.
- Poveda G., & Pineda K. (2009). Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: Are they bound to disappear during the 2010-2020 decade? *Advances in Geophysics*.
- Ribalaygua, J. (2009). Escenarios de Clima Futuro. *Memorias del 5º Congreso Forestal Español*. España.
- Refsgaard, J., & Knudsen, J. (1996). Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 7, Pages 2189–2202.
- Ruiz, F. (2007). *Escenarios de Cambio Climático, Algunos Modelos y Resultados de Lluvia para Colombia Bajo el Escenario A1B*. (Nota técnica). Bogotá, CO: Instituto de Higrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Salgado, B. A. (2011). *Disponibilidad y demanda futura del recurso hídrico. Análisis del escenario A2 en una cuenca agrícola de la VI Región*. Santiago, Chile: Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile.

- San Martín, S. D. (2009). *Robustez de las Técnicas Estadísticas de Regionalización en Condiciones de Cambio Climático*. Tesis del Master en Matemáticas y Computación. Universidad de Cantabria. España.
- Zhang Y., Y. Xu, W. Dong, L. Cao, & M Sparrow .(2006).A Future Climate Scenario of Regional Changes in Extreme Climate Events over China using the PRECIS Climate Model”, *Geophysical Research Letters*, (33) L24702, doi:10.1029/2006GL027229.
- Stern, N. (2007). *The Economic of Climate Change*. Cambridge.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (1992). *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (1998). *Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*.
- Vélez, J. I., Poveda, G., & Mesa, O. J. (2000). *Balances hidrológicos de Colombia*. Medellín: Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.
- Vogel, R. M.,&Sankarasubramanian,A. (2000). Spatial scaling properties of annual streamflow in the United States. *Hydrological Sciences Journal*, 45, 465-476.
- Vicuña, S., Garreaud, R., & McPhee, J. (2010). Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, 627-645.
- WCED (1991). *Nosso futuro comum*. Rio de Janeiro: FGV.

- Wilby, R. L., Wigley, T. M., Conway, D., Jones, P. D., Hewitson, B. C., Main, J., & Wilks, D. S. (1998). Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water Resources Research*,(34), 2995-3008.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W., & Barrow, E.M. (2002): SDSM — a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling Software*, **17**, 145-157.
- Wilby, R.L., Charles,S.P., Zorita, E., Timbal,B., Whetton. P., & Mearns, L.O. (2004). Guidelines for Use of Climate Scenarios developed from Statistical Downscaling Methods.
- Xu Y., Xiaoying H., Yong Z., Wantao L, & Erda L. (2006).Statistical Analyses of Climate Change Scenarios Over China in the 21st Century. *Adv. Clim. Change*, (2) ,50-53.