

**CAMBIO CLIMÁTICO EN TEMPERATURA, PRECIPITACION Y HUMEDAD RELATIVA PARA  
COLOMBIA USANDO MODELOS METEOROLÓGICOS DE ALTA RESOLUCION  
(PANORAMA 2011-2100)**

**José Franklyn Ruiz Murcia**  
*Físico con Especialización y MSc. en Meteorología*  
*Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático*

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	5
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	7
<b>3. ANTECEDENTES</b> .....	10
<b>4. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO</b> .....	12
4.1. ESCENARIOS DE EMISIÓN .....	12
4.2. MODELOS REGIONALES DE CLIMA .....	14
<b>5. ASPECTOS METODOLÓGICOS</b> .....	18
5.1. PROYECCIÓN DE TENDENCIAS PARA LLUVIA, TEMPERATURA Y HUMEDAD .....	18
5.2. MODELOS REGIONALES UTILIZADOS .....	24
5.3. TÉCNICAS USADAS PARA OBTENER CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA .....	26
5.4. VERIFICACIÓN .....	26
5.5. ENSAMBLES .....	29
5.6. INTERPOLACIONES .....	29
5.7. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE LANG .....	30
5.8. CONFORT TÉRMICO .....	31
<b>6. ANÁLISIS Y RESULTADOS</b> .....	32
6.1. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS .....	35
6.2. EVIDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA TEMPERATURA, LLUVIA Y HUMEDAD EN EL PERÍODO DE REFERENCIA 1971-2000 .....	38
6.2.1. TENDENCIAS EN TEMPERATURA .....	38
6.2.2. TENDENCIAS EN PRECIPITACIÓN .....	38
6.2.3. TENDENCIAS EN HUMEDAD RELATIVA .....	39
6.3. INDICE DE CONFIANZA .....	41
6.4. ESCENARIOS DE EXTRAPOLACIÓN DE TENDENCIAS .....	43
6.4.1. EXTRAPOLACION DE TENDENCIAS PARA TEMPERATURA .....	43
6.4.2. EXTRAPOLACION DE TENDENCIAS PARA PRECIPITACIÓN .....	47
6.4.3. EXTRAPOLACION DE TENDENCIAS PARA HUMEDAD RELATIVA .....	49
6.5. ESCENARIOS MULTIMODELO DE CAMBIO CLIMÁTICO (PRECIS Y GSM-MRI) .....	51
6.6. RESULTADOS EN ALTA RESOLUCIÓN USADO CCSM-WRF (4kmX4km) .....	62
6.6.1. PRECIPITACIÓN .....	63
6.6.2. TEMPERATURA .....	64
6.7. ENSAMBLE MULTIMODELO (RESPUESTA PROMEDIO DEL CLIMA) .....	65
6.7.1. ENSAMBLE MULTIMODELO PARA LA TEMPERATURA DEL AIRE .....	65
6.7.2. ENSAMBLE MULTIMODELO PARA LA PRECIPITACIÓN .....	70
6.7.3. ENSAMBLE MULTIMODELO PARA LA HUMEDAD RELATIVA .....	73
6.8. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE LANG .....	76
6.9. MEDICIÓN DEL CONFORT TÉRMICO .....	77
6.10. COMPARACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN CON OTROS RESULTADOS .....	79
6.11. POSIBLE EXPLICACIÓN DE LOS ESCENARIOS MÁS PROBABLES .....	81
<b>CONCLUSIONES</b> .....	85
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	88
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	89

## MARCO REFERENCIAL DEL PROYECTO

Es ampliamente conocido y sustentado en el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) publicado en el año 2007, que está ocurriendo un calentamiento global que trae asociado fenómenos como el ascenso del nivel del mar y un cambio climático. Estos fenómenos globales de diversa forma y grado afectarán los ecosistemas y los sistemas socioeconómicos de diferentes regiones del planeta. Todos los países serán impactados por tales fenómenos y Colombia no es la excepción, razón por la cual en el país hay una alta preocupación sobre el tema en diversos niveles del Estado, en las instituciones, sectores socioeconómicos, en entes territoriales y en la comunidad nacional en general.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, en cumplimiento de las funciones de informar al Estado y a la comunidad colombiana acerca del ambiente, particularmente sobre el clima, ha venido desarrollando investigación para detectar las evidencias del cambio climático en Colombia y para elaborar los escenarios climáticos que con mayor probabilidad se presentarían en los próximos decenios. En la actualidad, el IDEAM basado en estudios propios y en el estado del tema en el país, dispone de conocimiento suficientemente sustentado sobre el cambio climático en Colombia, el cual presenta a las diferentes entidades, sectores socioeconómicos y regiones del país, así como al público en general, para que sirva de elemento en las decisiones de programas de mitigación del calentamiento global y de adaptación al cambio climático.

Este proyecto de investigación hace parte de las actividades adelantadas dentro del Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático de la Subdirección de Meteorología, El proyecto INAP y la cooperación internacional del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Para la realización de este trabajo se contó con el apoyo internacional del:

Dr, Shoji Kusunoki  
Meteorological Research Institute (Japón)

Dr. Cynthia Hays, Dr. Clint Rowe y Dr. Robert Oglesby  
University of Nebraska (NCAR) (Estados Unidos)

Dr. David Hein y Dr. Simon Tucker  
Hadley Center (Reino Unido)

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM facilitó al autor las condiciones para la realización de este proyecto dentro de sus líneas de investigación sobre la generación de Escenarios de Cambio Climático en Alta Resolución para Colombia.

## RESUMEN

Cambios del clima futuro para Colombia fueron proyectados utilizando modelos meteorológicos globales y regionales de alta resolución, con base en condiciones iniciales de modelos de baja resolución ofrecidos por centros internacionales como el Meteorological Research Institute del Japón, el Centro Hadley de Reino Unido y el Community Climate System Model (CCSM) de los Estados Unidos. Una validación de los resultados en la simulación de clima presente, se realizó a los modelos ERA40 de 25kmX25Km corrido con el modelo PRECIS para el período de referencia 1971-2000 y el GSM-MRI de 20kmX20Km para el período de referencia 1979-1998 con datos registrados de lluvia, temperatura y humedad relativa del IDEAM. Las ecuaciones de ajuste encontradas en la validación permitieron: la complementación de algunas series históricas de IDEAM, la determinación del cálculo de tendencias y la aplicación de las mismas a los datos simulados por los modelos regionales de los distintos escenarios de cambio climático, con el fin de tener resultados representativos de las variables meteorológicas a lo largo del territorio nacional; primero en los períodos de referencia mencionados y luego en los resultados de cambio climático. En particular, se obtuvieron proyecciones bajo los escenarios A1B, A2, B2, A1B con sulfatos, A2 con sulfatos y B2 con sulfatos para el período 2011-2100 y por primera vez, se lograron resultados en 4kmX4km de resolución para la región Andina, bajo el escenario A2 con el modelo WRF utilizando como datos de entrada, los resultados del modelo global CAM (Community Atmospheric Model). En este trabajo, se detectó para Colombia, un aumento de la temperatura media del orden de 0.13°C/década para 1971-2000 y, el ensamble de los escenarios de cambio climático proyectan que la temperatura promedio del aire en el país aumentará con respecto al período de referencia 1971-2000 en: 1.4°C para el 2011-2040, 2.4°C para 2041-2070 y 3.2°C para el 2071-2100; lo que causaría disminuciones en los volúmenes de precipitación en amplias zonas de las regiones Caribe y Andina, e incrementos hacia la Región Pacífica; así como, reducciones en la humedad relativa especialmente en La Guajira, Cesar, Tolima y Huila.

Palabras clave: Cambio climático, escenarios IPCC, climatología, modelos numéricos

## ABSTRACT

Future climate changes for Colombia were done using global and regional high resolution models, based on initial conditions of low resolution models offered by international institutions such as Meteorological Research Institute from Japan, Hadley Center from UK and the Community Climate System Model (CCSM) of the United States. A validation of the results in the present climate simulation was conducted to ERA40 (25kmX25Km) run with PRECIS for the reference period 1971-2000 and GSM-MRI (20kmX20Km) for the reference period 1979-1998 with data recorded of rainfall, temperature and relative humidity of IDEAM. The adjustment equations found in the validation were used for complementing some historical series of IDEAM, identifying trends and then, those equations were applied to correct the simulated data got from regional models in order to have representative values in the meteorological variables throughout the national territory over the reference periods mentioned and over the results of climate change. In particular, projections were obtained under scenarios A1B, A2, B2 and A1B, A2 and B2 with sulfates for the period 2011-2070. Also results were achieved in 4kmX4km resolution for the Andean region under the A2 scenario with the WRF model using as input data the results of global model CAM (Community Atmospheric Model). In this work was detected for Colombia an increase of mean temperature about 0.13°C/decade for 1971-2000 and the ensemble of climate change scenarios will project that mean temperature in Colombia will increase respect to 1971-2000: 1.4°C for 2011-2040, 2.4°C for 2041-2070 and 3.2°C for 2071-2100, which would cause declines in volumes of precipitation in large parts of the Andean and Caribbean regions increases towards the Pacific Region as well as reductions in relative humidity especially in La Guajira, Cesar, Tolima and Huila

Key words: Climate change, IPCC scenarios, climatology, numerical models

## 1. INTRODUCCIÓN

Para estimar el efecto que las emisiones de gases de efecto invernadero tienen sobre el clima global, los modelos climáticos globales (GCMs) han sido empleados para tal fin.

Los GCMs describen elementos físicos y procesos importantes en la atmósfera, el océano y el suelo que ocurren dentro del sistema climático. Una de las desventajas de los GCMs es su resolución espacial, la cual es adecuada para unos cientos de kilómetros por lo que no capturan detalles meteorológicos regionales y locales. Con el fin de estudiar los impactos de cambio climático a nivel regional, se necesita predecir cambios sobre escalas mucho más finas. Una de las técnicas más conocidas para hacer esto, es a través del uso de los modelos regionales de Clima (RCMs); los cuales tienen el potencial de mejorar la representación de la información climática, que a su vez, es importante para calcular la vulnerabilidad de un país al cambio climático.

Históricamente los GCMs han sido la fuente primaria de información para construir escenarios de cambio climático y siempre suministrarán la base inicial para comprender el cambio climático en todas sus escalas; desde lo local a lo regional (Mearns et al., 2001 & Carter et al., 1994)

En este sentido, el IDEAM ha consultado y corrido clima presente y escenarios de cambio climático en alta resolución para Colombia, con el fin de suministrar sus resultados como datos de entrada a otras entidades y grupos de investigación dedicados a evaluar su posible impacto sobre el nivel del mar, el recurso hidro-energético, la salud y los ecosistemas de alta montaña como páramos y glaciares, entre otros (INAP, 2003); ya que se ha generado una conciencia de que los cálculos de vulnerabilidad, dependen de las estimaciones de impactos de cambio climático, los cuales a su turno, están frecuentemente basados sobre los escenarios de clima futuro.

Debido a que los GCMs no capturan detalles locales frecuentemente necesarios para calcular impactos a nivel local y regional, se hace necesario el uso de los modelos climáticos regionales RCMs que involucran detalles topográficos, capaces de desarrollar fenómenos meteorológicos de micro y mesoescala. No obstante, otras técnicas incluyen técnicas estadísticas que enlazan la información climática de estos modelos de baja resolución con la alta resolución o puntos locales.

Dentro de los modelos globales analizados, se encuentran los publicados por el National Center for Atmospheric Research<sup>1</sup>, los cuales tienen un tamaño de grilla de 1.2° (grillas de aproximadamente 133 kilómetros de lado); y a pesar de que presentan un bosquejo de lo que puede ser el cambio climático bajo distintos escenarios de emisión, queda claro que las características meteorológicas locales se pierden especialmente en un país con topografía compleja (Fig. 1). Por ello, se utilizaron las técnicas más conocidas para generar escenarios de cambio climático regional (Jones et al., 2004): Estadísticas, Dinámicas e Híbridas (Dinámico-estadístico).

La técnica estadística permitió calcular las tendencias de las variables meteorológicas una vez se establecieron relaciones entre los modelos con las observaciones. La reducción de escala dinámica, se hizo tomando como condiciones iniciales de entrada y/o frontera, los datos meteorológicos de los modelos globales de baja resolución como CCM3, ECHAM4, HadCM3Q, HadAM3P y CCSM para el modelo global GSM (Global Spectral Model) de alta resolución del MRI (Meteorological Research Institute) del Japón y los modelos regionales PRECIS (Providing Regional Climates for impact Studies) de Reino Unido y WRF (Weather Research and Forecast) de los Estados Unidos; los cuales usan física aplicable al sistema climático, permitiendo modelar directamente la dinámica del sistema físico que caracteriza el clima de una región. El método híbrido fue aplicado a los modelos regionales estableciendo relaciones estadísticas sencillas sobre el clima presente, entre los resultados de los modelos y las observaciones de las estaciones meteorológicas, aplicando posteriormente dichas relaciones a los escenarios de cambio climático. Finalmente se obtuvo la clasificación climática de Colombia para el siglo XXI y los cambios del confort térmico que el ser humano podría experimentar ante cambio climático.

---

<sup>1</sup> [www.gisclimatechange.org/](http://www.gisclimatechange.org/)

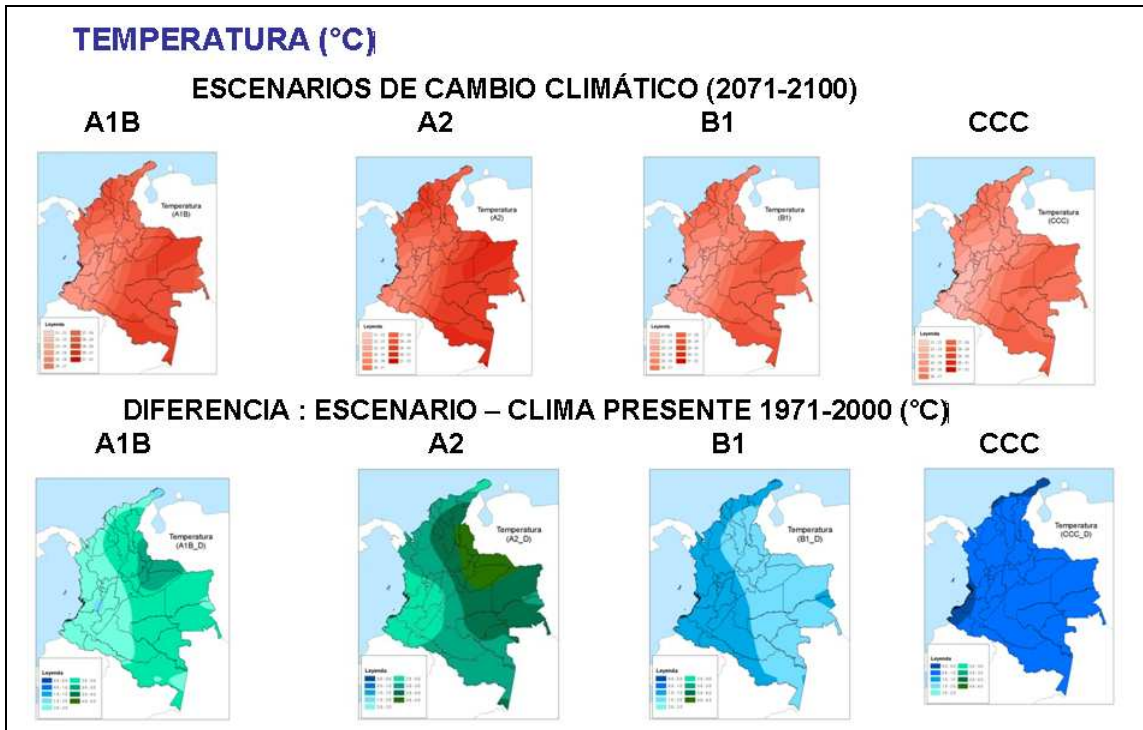


Figura 1. Resultados del cambio de temperatura resuelto por modelos de baja resolución espacial bajo diferentes escenarios de emisión propuestos por IPCC para finales de siglo XXI.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El crecimiento socioeconómico trae asociados daños a las variaciones regionales del clima sugiriendo un incremento en la vulnerabilidad al cambio climático de los ecosistemas y los distintos sectores socioeconómicos; pero saber cuáles son las proyecciones del comportamiento de los ecosistemas y sistemas socio-económicos para el futuro ante un cambio climático, es una incertidumbre; debido a que la influencia humana continuará de una u otra forma cambiando la composición química de la atmósfera a través del siglo XXI, aumentando en mayor o menor grado el promedio de la temperatura del aire, lo cual ocasionará cambios en el comportamiento de los patrones de las variables meteorológicas modificando los ecosistemas y sistemas socioeconómicos de los cuales el ser humano depende para realizar sus diferentes actividades.

No obstante, el incremento en las observaciones siempre dará una mejor idea del calentamiento mundial y otros cambios del sistema climático; con base en estos análisis, algunos cambios han sido verificados por la comunidad científica entre los cuales se destacan: el decrecimiento de la cobertura de nieve, el incremento del nivel del mar, las variaciones regionales de los patrones de precipitación y los cambios en extremos de tiempo y clima (Jones et al, 2004). Según Benavides & León (2005) en lo que tiene que ver con algunas evidencias de cambio climático en Colombia, hay tendencia al incremento de la precipitación anual excepto en la zona insular de San Andrés y Providencia, al suroeste del país y en puntos locales de cordillera oriental de los Andes de Colombia donde se presenta una tendencia a la disminución del régimen anual de lluvias. Los eventos extremos de precipitación en gran parte del país están en aumento, así como los valores de temperatura máxima y mínima; lo que quiere decir que tanto los días como las noches son más cálidos. Sin embargo, una de las desventajas de la metodología, es que no utiliza un período de referencia común de clima presente para todas las estaciones analizadas y son pocos los puntos hasta ahora analizados para llegar a conclusiones más contundentes.

En materia de glaciares, Ceballos (2009) ha calculado que la pérdida de área glaciaria en Colombia es del orden entre el 3 y 5% anual y de seguir con estas tendencias, los glaciares en el país podrían estar extintos en 30 o 40 años.

En cuanto al nivel del mar, Cadena (2010) evaluó los registros diarios sobre el Mar Caribe Colombiano y encontró que existe una tendencia al aumento del nivel del mar que puede oscilar entre 2,3 mm y 3.5 mm al año dependiendo de la zona analizada; mientras que en la costa pacífica colombiana el aumento del nivel de mar puede estar alrededor de 2,2 mm/año; datos que están de acuerdo con las tendencias globales. No obstante, Pabón (2010) recomienda que datos de nivel del mar deben manejarse con suma precaución, porque es conveniente tener en cuenta, el efecto de la actividad dinámica geomorfológica del litoral pacífico y particularmente el proceso tectónico del levantamiento de la placa suramericana.

De acuerdo con Dorado (2008), en Colombia los reportes de desastres naturales por concepto hidrometeorológico se han incrementado significativamente en las últimas dos décadas y este patrón al parecer, está relacionado con el incremento poblacional y una mejor difusión de los desastres por parte de los medios de comunicación a nivel local y regional. En su estudio, Dorado textualmente dice "Teniendo en cuenta lo analizado por Velásquez y Rosales (2003), los reportes de desastres más frecuentes en Colombia están asociados con dinámicas hídricas (inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales). Entre 1930 y 2002, los registros suman 11.561 eventos que representan el 70 % de los casos registrados en la base de datos del OSSO, cuya principal fuente de información son la Dirección General para la Prevención y Atención de Desastres (DGPAD) y el periódico El Tiempo. En términos generales, en las últimas tres últimas décadas, más de 15 millones y medio de colombianos se han visto afectados por los desastres de origen natural, más de 38.000 personas han muerto en el país a consecuencia de este tipo de eventos y en la actualidad, cerca de 15 millones de personas, el 35% de la población, está expuesta a un alto nivel de riesgo y otros 20 millones, el 47%, a un riesgo intermedio".

Benavides & León (2007), en su nota técnica también manifiestan que los sistemas naturales como las playas y marismas serían los más afectados por la erosión y la inundación del litoral. La población en Colombia que se encuentra en zonas expuestas a la inundación en áreas del Mar Caribe Colombiano, es de aproximadamente un 85% en su mayoría del sector urbano. Simulaciones por computador deducen que si el nivel del mar ascendiera 1 metro en la Isla de San Andrés inundaría el 17% de suelo, perdiendo altos porcentajes de su infraestructura turística y comercial. Los cambios de la cobertura vegetal serían significativos y los aumentos de la temperatura del aire reducirían el área de los ecosistemas de páramo ocasionando una disminución de la diversidad biológica que ellos albergan. En cuanto a la salud humana, se ha establecido que con el calentamiento, el dengue y la malaria pueden expandirse a zonas más altas del país y la oferta hídrica dependerá del nuevo régimen de lluvia; no obstante, el 50% del territorio nacional se vería afectado por el efecto del cambio climático ante una duplicación de CO<sub>2</sub> y en la región Amazónica se esperan cambios drásticos en la dinámica del régimen hidrológico (IDEAM, 2005).

El sector agropecuario se vería vulnerable especialmente por procesos de avance de la desertificación y los cultivos más vulnerables serían arroz seco manual, arroz seco mecanizado, tomate de árbol, trigo y papa. Pabón (2010) dentro del proyecto INAP, presentó algunos impactos del cambio climático en el sector agropecuario destacando que: “un incremento de la temperatura media del aire de 4°C, como el que se menciona que podría ocurrir hacia finales del siglo XXI, supone un ascenso aproximado de 700 metros de franja en la que se encuentra el umbral de temperaturas óptimas para diferentes cultivos. La reducción de la precipitación en algunas regiones del territorio colombiano acentuará el proceso de desertificación con la consecuente reducción del área de tierra productiva en el país. Los cambios de los patrones espaciales de clima incidirán en la renta de la tierra, lo que a su vez influirá en el desarrollo del sector agropecuario. Los cambios de temperatura del aire y de precipitación generarán cambios en los patrones espaciales y temporales de plagas y enfermedades de plantas y animales. Habría cambios del área con condiciones óptimas para los diferentes cultivos en el territorio colombiano; en algunos casos se produciría reducción de dicha área. También habría un incremento en los costos de producción en los casos en los que el óptimo climático para determinado cultivo se localice en donde otros factores (suelos) no sean los adecuados para ese cultivo. Las modificaciones de la distribución de las áreas de producción agrícola traerán efectos en los patrones de intercambio (comercio). Habría cambios en los patrones de comercio nacional e internacional debido a que se crearían algunas ventajas con lo que se facilitaría competir frente a otras regiones o países; también habría condiciones adversas con las que sería difícil competir.”

En cuanto a los recursos hídricos de Colombia frente a cambio climático, Pabón (2010) en su informe manifiesta que, existe evidencia de la reducción del recurso hídrico para diversos propósitos en Colombia, en especial, hacia el abastecimiento de agua potable para la población que habita los distintos municipios del país. Escenarios de cambio climático generados en el 2006 por Pabón (2010) mostraron la siguiente perspectiva para el futuro: “El aumento de temperatura conllevará a la reducción de áreas de glaciares y a su desaparición total en la primera mitad del siglo XXI. El calentamiento de la atmósfera también contribuirá al aumento de la evaporación y de la evapotranspiración con lo que se afecta el ciclo hidrológico, reduciendo la escorrentía. La reducción de la precipitación en las regiones Andina y Caribe incidirá directamente en la reducción de los caudales y la disminución de los mismos traerá efectos en la calidad del recurso”. Con lo anterior, las regiones Caribe y Andina pueden ser objeto de los siguientes impactos: “Desabastecimiento de agua para consumo humano y las actividades que desarrolla la población. Desmejoramiento del saneamiento básico con implicaciones en la salud humana. Incremento de los costos de la provisión de agua y conflictos entre la población y las entidades encargadas de la gestión de los recursos y de la provisión de agua potable (Pabón, 2010)”.

Para tener una idea de cómo se verían afectados los diferentes sistemas socioeconómicos ante el cambio climático en el siglo XXI, se requiere prever el clima del futuro; pero para ello, se necesita proyectar cómo los gases de efecto invernadero cambiarán en el futuro. Con este fin, una serie de



escenarios de emisión han sido desarrollados por el IPCC<sup>2</sup> (Special Report on Emissions Scenarios) que reflejan un número de diferentes caminos en los que el mundo se podría desarrollar y las consecuencias que conllevaría esto para la humanidad, el crecimiento económico, el uso de la energía y la tecnología (Jones et al., 2004).

Para dar en parte solución a lo anteriormente mencionado, queda claro que se hace necesario proyectar el clima del futuro simulando fenómenos meteorológicos de alta resolución, es decir, que resuelvan procesos meteorológicos de pequeña escala en el espacio y de corta duración en el tiempo, ya que sus resultados no solo servirán para el avance del conocimiento científico, sino también como insumo básico para simular los efectos e impactos del cambio climático en las diferentes componentes del sistema climático. Todo esto, con el fin de que los agentes encargados de tomar decisiones puedan diseñar políticas que nos permitan cuidar el medio ambiente a nivel regional, de tal forma que el efecto de gases de efecto invernadero interfiera lo menos posible con un cambio climático extremo, dando suficiente tiempo para que los ecosistemas logren adaptarse naturalmente y, asegurando que la producción de alimentos no sea amenazada; todo con el objeto de disponer de un desarrollo económico de manera sostenible (IPCC WGI TAR, 2001).

---

<sup>2</sup> [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

### 3. ANTECEDENTES

La Subdirección de Meteorología del IDEAM y el Departamento de Geografía de la Universidad Nacional, a través del proyecto INAP, han venido elaborando estudios de generación de escenarios de cambio climático con base en los escenarios de baja resolución suministrados por el IPCC y obteniendo resultados en alta resolución con el uso de modelos regionales.

En materia de evidencia de cambio climático y en particular con la temperatura, León (1998) encontró que la mayoría de las estaciones analizadas muestran una tendencia creciente de la temperatura, aproximadamente de 0.8°C/25 años para la media, 1.6°C/25 años para la máxima y 1.0°C/25 años para la mínima. No obstante, no se aprecia una regionalización de la tendencia de la temperatura, para ninguno de los tres parámetros (media, mínima y máxima). Su investigación afirma que algunas estaciones muestran unas tasas muy altas de tendencia, como consecuencia del rápido desarrollo agrícola, industrial y urbano que se ha dado en torno de ella. Como detalle especial, León (1998) menciona que, las estaciones que registran tendencias negativas, en su gran mayoría están relacionadas con problemas en la calidad de los datos, estado del instrumental, emplazamiento y reubicación de las estaciones y finalmente concluye que, las tasas nacionales de tendencia creciente, en su mayoría, son mayores que los valores reportados por el IPCC, a causa de que las estaciones, están ubicadas sobre o cerca de zonas urbanas o de gran desarrollo, donde los procesos de crecimiento de población, urbanización, industrialización, deforestación, tiene un efecto acumulativo sobre las tendencias de calentamiento global.

En cuanto a investigaciones recientes de modelamiento de clima futuro, Pabón (2005) revisó 22 modelos globales que permitieron tener una amplia idea del cambio climático que le esperaría al país a final del siglo XXI para las 24 regiones hidroclimáticas. Para lluvia y con el uso de los modelos globales de baja resolución, Pabón (2005) afirma que la precipitación anual se reduciría en algunas regiones y aumentarían en otras. En las regiones en las que hay cierto grado de coincidencia en la mayoría de los modelos y las tendencias actuales acerca de un incremento son: el Pacífico Norte y Central, Medio Magdalena, Sabana de Bogotá, Cuencas de los ríos Sogamoso, Catatumbo, Arauca, Piedemonte Llanero, Orinoquía central, Amazonía Central y Piedemonte Amazónico, lugares para los cuales el incremento de la lluvia comparado con el período típico 1961-1990 se podrían ubicar entre el 10 y 15% para el 2050 y entre el 15 y 25% para el año 2080. Para las demás regiones, el estudio dice que es difícil llegar a un resultado concreto ya que los distintos modelos presentan resultados contradictorios (Vergara, 2003). Para el caso de la temperatura, los resultados de los modelos globales de baja resolución del IPCC mostraron aumento de temperatura desde 2°C hasta del orden 4°C bajo distintos escenarios, desde el pesimista hasta el optimista.

No obstante, en alta resolución, se han utilizado modelos regionales como PRECIS (Providing REgional Climates for Impacts Studies) del Reino Unido y el modelo global de alta resolución GSM-MRI (Global Spectral Model) del Japón (Ruiz & Martínez, 2007); los cuales fueron implementados con criterios que tuvieron en cuenta aspectos como: consistencia con el rango de calentamiento global proyectado, concordancia con los patrones de distribución de las variables climatológicas, conservación de las leyes básicas de la dinámica del clima, consideración de las variables mínimas para la evaluación de posibles impactos y reflejando el rango de cambio que representa el clima del futuro. Los modelos regionales analizados para la segunda mitad del siglo XXI sobre el territorio colombiano muestran que el calentamiento podría estar entre 2 y 4°C con relación a las temperaturas registradas durante el período 1961-1990; pero hay regiones en las que podría sobrepasar inclusive los 4°C. En cuanto a los resultados de lluvia generados con modelos de alta resolución, Pabón (2005) encontró que las regiones interandinas y Caribe reflejarían una reducción de la cantidad anual de lluvia; algunas zonas, hasta más del 30%, mientras que posibles aumentos se obtendrían para el Piedemonte oriental de la Cordillera Oriental y en la región Pacífica en la segunda mitad del siglo XXI.

Si se tienen en cuenta las evidencias actuales de cambio climático en lluvias analizadas por Benavidez & León (2005) y los resultados de los modelos regionales obtenidos a la fecha (Pabón, 2005 & Ruiz, 2007), éstos sugieren que: la zona Caribe, Pacífica y Llanos Orientales están evolucionando hacia un escenario A1B simulado por el GSM-MRI, mientras que la región Andina y la Amazonía evolucionan hacia escenarios tipo A2 y B2 tal como lo simuló el modelo PRECIS; ya que hay tendencias actuales al aumento de precipitación con respecto a los valores normales anuales en Santa Marta, Barrancabermeja, Medellín, Quibdó, Armenia, Neiva, Puerto Carreño, Gaviotas y Leticia mientras que disminuciones importantes se están observando en San Andrés, Cúcuta, Bucaramanga, Bogotá, Cali y Pasto (Fig. 2).

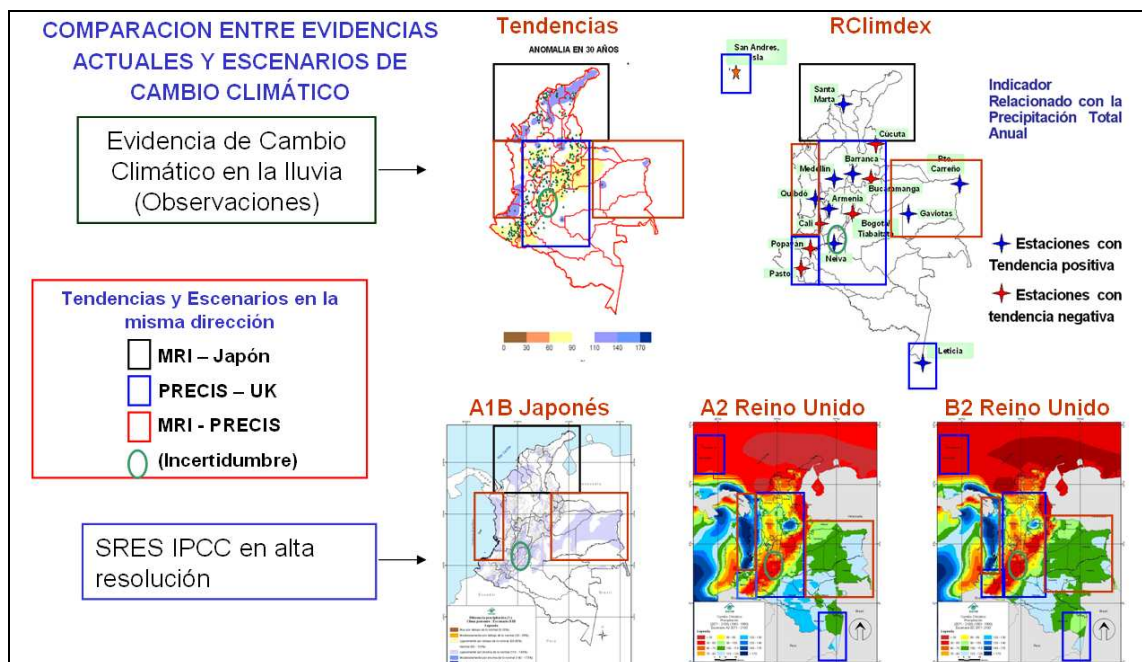


Figura 2. Comparación clima presente con clima futuro para lluvia. En cuadros negros: Los cambios actuales de lluvia estarían evolucionando hacia un escenario A1B como lo presenta el modelo GSM-MRI. En cuadros Azules: Los cambios actuales de lluvia estarían evolucionando hacia escenarios A2 y B2 como lo presenta el modelo PRECIS de Reino Unido. En cuadros Rojos: Los cambios de lluvia actuales estarían evolucionando como lo presentan ambos modelos (GSM-MRI y PRECIS). En círculo verde: Existe incertidumbre tanto en el cálculo de la tendencia actual como en los resultados de los escenarios simulados por los modelos de alta resolución.

Por esta razón, con este trabajo, se pretendió obtener más conocimiento acerca del cambio climático que le esperaríamos al territorio nacional, tratando cada vez más de reducir la incertidumbre ante un cambio climático regional, mediante el reanálisis de la información del modelo de alta resolución de Japón, nuevas corridas del modelo PRECIS con más escenarios simulados a lo largo del período 2011-2100 y obtención de resultados sin precedentes en alta resolución (4kmX4Km) para la zona Andina con el modelo WRF, ya que esta región del país presenta la orografía más compleja del territorio nacional.

## 4. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO

### 4.1. ESCENARIOS DE EMISIÓN

Un escenario de cambio climático no es ni un pronóstico ni una predicción climática, es una representación del clima afectada por una condición de gases de efecto invernadero. De acuerdo con Pabón (2005), en este sentido hay que distinguir las siguientes definiciones:

- Predicción: decir con anticipación lo que ocurrirá en un momento o período futuro en un medio determinado (predicción del tiempo, predicción climática).
- Proyección: Estimación de una situación futura mediante el estudio de la condición actual o a través de una extrapolación (estadística, numérica o dinámica) del curso de los procesos (por ejemplo: extrapolación de tendencias).
- Escenario: Representación de una situación posible que puede darse bajo una situación determinada.
- Escenario Climático: condición climática asumida para efecto de evaluación de impactos de la variabilidad climática (escenario El Niño/La Niña), de cambio climático (escenario del holoceno medio, del último pleniglacial) o de impactos en sectores socio-económicos o ecosistemas.
- Escenario de cambio climático: representación del clima que se observa bajo una concentración determinada de gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera.

Según Jones et al (2004), un escenario de emisión es un resultado plausible y consistente que ha sido construido para explicar las consecuencias potenciales de la influencia de las actividades humanas sobre el clima. Las principales etapas requeridas para proveer escenarios de cambio climático con el fin de calcular los impactos del mismo son:

- Establecer los escenarios de emisiones (escenarios de crecimiento población, energía y modelos socio-económicos).
- estimar las concentraciones de CO<sub>2</sub>, metano, sulfatos, simular ciclo del carbono con modelos químicos etc.
- modelar el cambio climático global – temperatura, lluvia, nivel del mar (modelos acoplados).
- determinar detalles regionales que involucra efectos de montañas, islas, tiempo extremo, etc. y
- obtener los impactos (modelos de impacto: inundaciones, suministro de alimentos).

Nunca sabremos exactamente como las emisiones antropogénicas cambiarán en el futuro. Sin embargo, el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) ha desarrollado nuevos escenarios de emisión denominados “SRES escenarios”, los cuales son representaciones posibles de futuras emisiones de sustancias que son activas radiativamente (por ejemplo, gases de efecto invernadero) o las cuales pueden afectar constituyentes los cuales son activos radiativamente (por ejemplo: SO<sub>2</sub> el cual forma aerosoles sulfatados). Ello basado sobre un conjunto de supuestos coherentes e internamente consistentes acerca de factores externos tales como demografía, desarrollo socio-económico y cambio tecnológico y sus clases de relaciones. Los escenarios SRES comprenden 4 familias: A1, A2, B1 y B2.

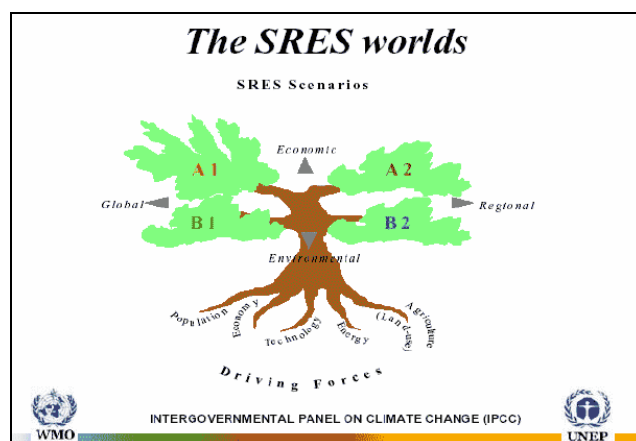


Figura 3. Escenarios de Emisión de IPCC. Los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, dependen de la dirección que en el mundo tome en el crecimiento poblacional y económico, los cambios de tecnología, el uso de la energía, el suelo y la cultura agrícola.

- A1: La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población que alcanza su valor máximo hacia mediados de siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción a tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de 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 diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B) entendiéndose por equilibrada la situación en que no dependerá excesivamente de un tipo de fuente de energía, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares.
- A2: 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 convergen 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 otras líneas evolutivas.
- B1: La línea evolutiva y familia de escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza el 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 e 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.
- B2: 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 un nivel 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 enfoca en niveles locales y regionales.

Un escenario ilustrativo fue escogido para cada uno de los seis grupos de escenarios A1B, A1FI, A1T, A2, B1 y B2. Todos deberían ser considerados plausibles pero no tenemos medios de saber sus probabilidades relativas, por ejemplo no hay razón para asumir que todas ellas son igualmente probables.

Lo anterior muestra que existe incertidumbre de cómo evolucionará nuestro desarrollo socioeconómico (Morita et al., 2001); razón por la cual el IPCC generó varios escenarios de emisión, pero su modelación, llevó también a incertidumbres en las concentraciones de los mismos; en particular, porque existe un imperfecto entendimiento de algunos de los procesos en el ciclo del carbón y de reacciones químicas en la atmósfera generando incertidumbres en la conversión de emisión a concentración; inclusive hay un potencial grande de incertidumbre en la retroalimentación entre el clima, el ciclo del carbón y la química de la atmósfera (Cox et al., 2002). Sin embargo, el uso de los modelos de circulación general océano-atmósfera servirán para simular algunos procesos en el ciclo del carbón y la química de todas las sustancias. Además de esto hay que sumar la existencia de incertidumbre debida a la variabilidad natural del clima e incertidumbres en el cambio climático regional (Giorgi et al; 2001).

#### **4.2. MODELOS REGIONALES DE CLIMA**

Un modelo numérico meteorológico, es un conjunto de ecuaciones diferenciales que gobiernan la dinámica y termodinámica de la atmósfera. Dependiendo del fenómeno meteorológico que se este resolviendo en dichas ecuaciones, se hacen aproximaciones sobre ellas o se desprecian algunos términos con el fin de observar la naturaleza física del fenómeno que se esta estudiando. También influye en ello la capacidad computacional, ya que resoluciones espaciales muy finas y de gran extensión horizontal exigen capacidad de almacenamiento de información de entrada y salida junto con recurso de computador para resolver las ecuaciones diferenciales y las parametrizaciones (Yamagishi, 2003).

Dentro de los procesos físicos que son parametrizados se destacan: los procesos de transferencia de calor en la atmósfera como la radiación, la convección y la conducción; los procesos físicos de Capa Límite Planetaria, donde el comportamiento de las variables meteorológicas están influenciadas ampliamente por la orografía junto con las características del suelo y, por último, los procesos físicos que generan la condensación de nubes, ya que esta ultima depende de la cantidad de los flujos de calor y humedad que la atmósfera superior recibe de los niveles bajos cuantificados dentro de los procesos de transferencia de calor y por las corrientes de aire junto con el estado del agua resultante al tope de la Capa Límite Planetaria; por lo tanto, estos modelos permiten simular las condiciones meteorológicas reales y proyecciones teniendo en cuenta la orografía, los datos del campo de primera aproximación de cualquier modelo meteorológico global de baja resolución que se le suministre, la información meteorológica sinóptica directa e indirecta procedentes de las estaciones meteorológicas (in situ) y a través de sensores remotos, permite definir dominios de resolución horizontal y vertical utilizando una física que aplica las ecuaciones de movimiento; los movimientos verticales son explicados a través de una meteorología dinámica no hidrostática (Ruiz & Melo, 2004).

En su forma básica, los modelos meteorológicos consideran: la ecuación de la primera ley de la termodinámica, la conservación de la masa, los cambios de fase del agua y las técnicas para resolver procesos meteorológicos de pequeña escala en términos de la gran escala denominados parametrizaciones (Yamagishi, 2003).

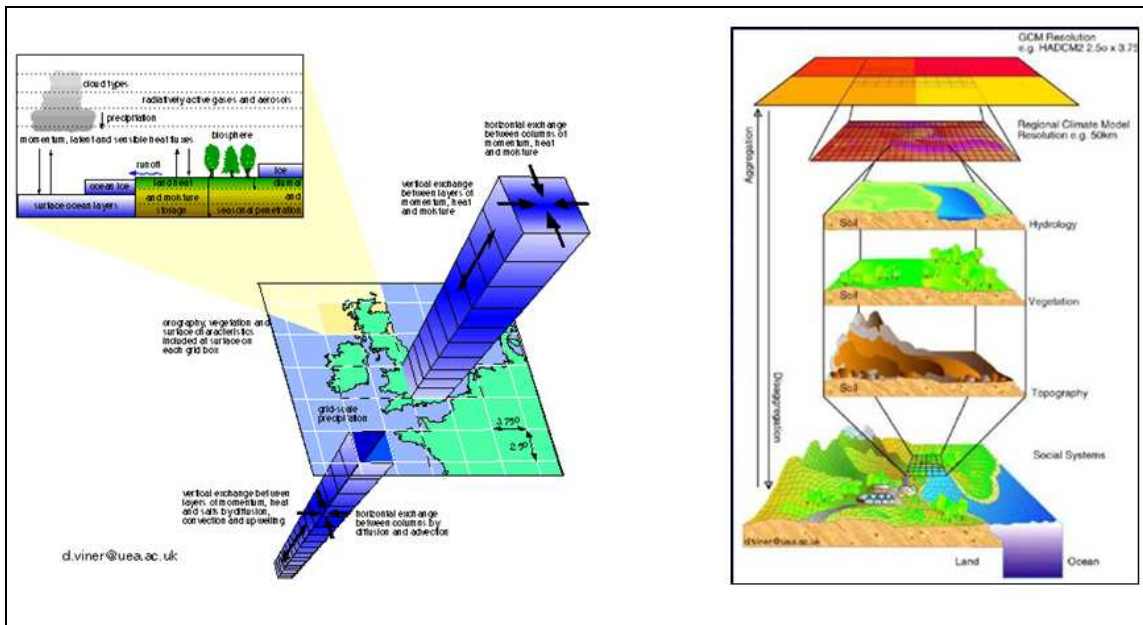


Figura 4. Representación del downscaling dinámico. Los modelos regionales de alta resolución espacial representan patrones regionales y locales de clima tomando condiciones iniciales de modelos globales de baja resolución espacial.

Un modelo climático regional (RCM) es un modelo de clima de alta resolución que cubre un área limitada del globo, típicamente 5000 Km.X5000 Km., con una resolución horizontal típica de 50 kilómetros (Jones et al., 2004). Como se ha venido mencionando, Los RCMs están basados sobre leyes físicas, representados por ecuaciones matemáticas que son resueltas usando grillas tridimensionales. Por lo tanto, los RCMs son modelos físicos comprensivos que usualmente incluyen componentes de suelo y atmósfera del sistema climático y contienen representaciones de importantes procesos del sistema climático (por ejemplo: lluvia, radiación, nubosidad, hidrología). Muchos de esos procesos físicos toman lugar sobre escalas mucho más pequeñas que la grilla del modelo no puede modelar y resolver explícitamente. Sus efectos son tomados en cuenta usando parametrizaciones, por lo cual este proceso es representado por los efectos de las relaciones entre el área o tiempo promediado del proceso de la subgrilla y el flujo de gran escala.

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

- a. 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 desempareje 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.

- Escoger un dominio que asegure que la simulación de RCM no diverge del que da el GCM. Si ésta consistencia no se mantiene entonces los valores de las proyecciones del cambio climático en el RCM son cuestionables.

b. Resolución: La resolución de un RCM debe ser suficientemente alta para resolver detalles de escala fina que caracterice forzamientos regionales. La resolución debería ser también capaz de suministrar información útil para aplicaciones específicas que capturen escalas relevantes de movimiento (Giorgi & Mearns, 1999).

c. Condiciones iniciales: las condiciones iniciales para comenzar la integración en un RCM son tomadas o de los GCM o de las observaciones de Reanálisis. Sin embargo, el estado inicial de las variables de superficie en el modelo de uso del suelo pueden ser importantes para que éste pueda tomar uno o más ciclos anuales manteniendo un equilibrio con el forzamiento atmosférico. En este caso, simulaciones de temperatura en superficie, precipitación y variables relacionadas podrían ser preferibles dentro del período de inicialización.

Ahora, en cuanto a las condiciones de frontera, hay dos métodos comunes usados para manejar el modelo regional (Kida et al., 1991 & Sasaki et al., 1995):

- El método de Relajación: consiste en la aplicación de un término Newtoniano, el cual lleva la solución del modelo hacia los campos de gran escala sobre la zona intermedia. El término de forzamiento es multiplicado por un factor de peso.
- Anidamiento espectral: los campos de gran escala forjan la componente con un número de onda pequeño a través de todo el dominio, mientras que el modelo regional resuelve la componente de altos números de onda.

d. Condición baja de frontera: la mayoría de los RCMs desarrollados hasta la fecha incluyen representaciones de la atmósfera y el suelo solamente. Como un resultado, ellos necesitan ser alimentados con condiciones superficiales sobre los océanos (por ejemplo: Temperatura Superficial del Mar) e información apropiada de extensión y espesor de hielo de mar. En algunas ocasiones, el modelo de suelo requiere información de temperatura de algunos espesores subsuperficiales.

e. Longitud de la simulación: Con el fin de investigar el estado del clima regional, la longitud de la simulación debe ser al menos de 10 años para dar una idea razonable de los cambios climáticos medios; aunque 30 años es preferible para determinar cambios en estadísticas de orden superior. Esto es particularmente importante para analizar aspectos de variabilidad climática, tales como distribuciones de lluvia o climas extremos.

f. Representación de los procesos físicos: Errores en las simulaciones de clima regional se derivan de las condiciones de frontera y la formulación del modelo. En general hay dos aproximaciones que considerar en la formulación de RCM:

- Uso de diferentes formulaciones para el modelo global y regional: La ventaja es que cada modelo está desarrollado y optimizado para su respectiva resolución. La desventaja es que cualquier diferencia de formulación entre el GCM y RCM causa resultados menos claros para que las proyecciones del RCM puedan ser interpretadas como una versión de alta resolución de la proyección de GCM.
- Uso de la misma formulación para el modelo global y regional: La ventaja es la máxima compatibilidad y uso de la información diseñada para correr sobre todas las condiciones climáticas. La desventaja es que cualquier dependencia de la resolución en la formulación del modelo necesita ser corregida o puede traer prejuicios.



Como valor agregado que tienen los modelos regionales de clima (RCMs) sobre los globales, se destaca (Jones et al., 2004) que:

- Simulan el clima actual de forma más real: donde el terreno es llano por miles de kilómetros y lejos de las costas, la resolución de la malla gruesa de un GCM puede no ser importante. Sin embargo, la mayoría de los suelos tiene montañas, líneas de costa, etc., sobre escalas de 100 kilómetros o menos y los modelos regionales pueden tener en cuenta muchos de los efectos del terreno que los GCMs no hacen.
- Proyectan el cambio climático con mayor detalle: La alta resolución espacial también será aparente, por supuesto, en proyecciones. Cuando el calentamiento es incrementado por gases de efecto invernadero cambian los patrones de viento sobre una región, luego la presencia de montañas y otras características locales que interactúan con este flujo, también cambiarán. Esto afectará la cantidad de lluvia y la posición de las áreas de barlovento y sotavento. Para muchas montañas incluso para cordilleras, tales cambios no son vistos por los GCMs, pero la fina resolución de los RCMs los resolverán.
- Representan las islas más pequeñas: Sin embargo, la superficie del suelo tiene una capacidad calorífica más baja que los océanos y se calentarán más rápido. Si la superficie de la isla tiene montañas significativas, estas tendrán una influencia sustancial sobre los patrones de precipitación. En un RCM, muchas de las islas son vistas y los cambios proyectados pueden ser muy diferentes a aquellos sobre los que se presentarían en el océano cercano.
- Pueden simular ciclones y huracanes: no sabemos si los huracanes serán más o menos frecuentes con la aceleración del calentamiento global, aunque hay indicadores que ellos serán más severos. Resoluciones de unos cientos de kilómetros de los GCMs no permiten representar propiamente huracanes, mientras que RCMs, con su alta resolución puede representar tales características de mesoescala.

## 5. ASPECTOS METODOLÓGICOS

En esta investigación básicamente se siguió la metodología expuesta por Jones et al. (2004) y explicada en su mayor parte en la sección 4.2 donde, se presentaron referencias para tener en cuenta en la modelación regional del clima. En particular, el dominio escogido fue lo suficientemente grande, de tal forma que permitiera desarrollar circulaciones internas de mesoescala e incluir forzamientos regionales relevantes, razón por la cual en el caso de PRECIS y WRF la condición inicial del modelo de baja resolución estuvo lo suficientemente retirada del área de Colombia para evitar ruidos innecesarios en la zona de frontera y en especial al sur de la región Andina, donde los efectos topográficos son relevantes en la respuesta de los patrones meteorológicos.

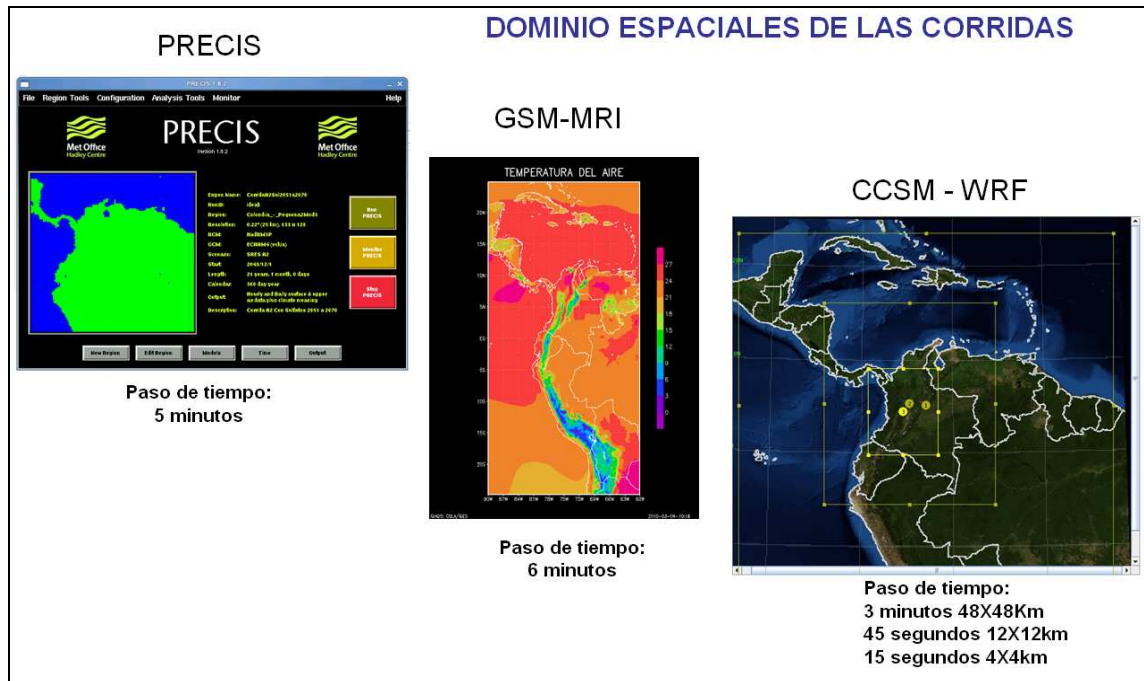


Figura 5. Dominios espaciales y paso de tiempo de integración de los modelos regionales de alta resolución usados por IDEAM para generar escenarios de cambio climático

### 5.1. PROYECCIÓN DE TENDENCIAS PARA LLUVIA, TEMPERATURA Y HUMEDAD

De acuerdo con Pabón (2005) una proyección de clima es una estimación de una situación futura mediante el estudio de la condición actual o a través de una extrapolación (estadística, numérica o dinámica) del curso de los procesos (por ejemplo: extrapolación de tendencias). Una desventaja de las proyecciones estadísticas es que las relaciones estadísticas no se mantienen en el clima del futuro; es decir, la precipitación no va aumentar o disminuir paulatinamente a una tasa de cambio constante (Jones et al., 2004); en la naturaleza atmosférica; los procesos no son lineales, siempre hay una variabilidad dinámica que puede alterar los valores estadísticos de la normal climatológica<sup>3</sup>, similar con lo que ocurre en los ciclos ENOS (El Niño/Oscilación del Sur) en la variabilidad climática, el cual modifica los valores promedios y otros estadísticos de los patrones

<sup>3</sup> La normal climatológica o línea base climatológica es la información (promedios multianuales, amplitud, valores máximo y mínimos, varianza) de las variables climatológicas para el período que se tomará como referencia. Este es el período que representaría el clima presente. Sobre este se cuantifican los cambios al compararlo con las variables en otro período.

de lluvia y temperatura entre otras; por lo tanto, extrapolaciones a más de 30 años no son recomendables.

Para obtener la proyección de tendencias, lo primero que se realizó fue una complementación de las series de tiempo mes a mes en el período 1971-2000 para alrededor de 3241 estaciones de lluvia, 685 de temperatura y 616 estaciones que tienen reportes de humedad relativa (Ver Fig. 6), utilizando la metodología sugerida por Jones et al (2004); donde recomienda que, para generar clima presente en puntos locales, se pueden establecer relaciones estadísticas entre un Reanálisis o un modelo regional con las observaciones para un período dado. El método de ajustes por mínimos cuadrados fue utilizando y su complementación de datos fue considerada sí y solo sí los coeficientes de correlación eran mayores o iguales a 0.8 entre las observaciones y el modelo ERA40.

$$ERA40_{COR} \approx OBS = A + B \times ERA40_{PRECIS} \quad (1)$$

Donde  $A$  y  $B$  son constantes,  $ERA40_{PRECIS}$  son los resultados arrojados por el modelo y  $ERA40_{COR}$  es el modelo ajustado el cual debe ser aproximado a las observaciones  $OBS$ , razón por la cual, la variable independiente siempre fue el resultado calculado por el modelo PRECIS, mientras que la variable dependiente eran los datos obtenidos de la base de datos de IDEAM.

Cuando el coeficiente de correlación lineal fue menor a 0.8, se generaron ecuaciones no lineales mediante el uso del software CurveExpert, el cual permitió mejorar las correlaciones en aquellos lugares donde el ajuste de mínimos cuadrados no fue óptimo entre las observaciones y el Reanálisis ERA40; para ello, el software evaluó el mejor modelo y determinó si el ajuste obedecía a ecuaciones polinomiales, logarítmicos, exponenciales, potenciales entre otros. Dentro de las ecuaciones típicas que el software resolvió se encuentran:

$$ERA40_{COR} \approx OBS = A \times e^{B \times ERA40_{PRECIS}} \quad (2)$$

$$ERA40_{COR} \approx OBS = A + B \times \ln(ERA40_{PRECIS}) \quad (3)$$

$$ERA40_{COR} \approx OBS = \frac{1}{A + B \times \ln ERA40_{PRECIS}} \quad (4)$$

$$ERA40_{COR} \approx OBS = A \times B^{ERA40_{PRECIS}} \quad (5)$$

$$ERA40_{COR} \approx OBS = A \times (ERA40_{PRECIS})^{B/ERA40_{PRECIS}} \quad (6)$$

Situación que permitió llevar los resultados del modelo a valores representativos de cada estación favoreciendo la complementación de series y de paso la realización de un ajuste no solo para clima presente simulado por el modelo PRECIS sino también permitiendo la calibración del clima futuro una vez que se realizaron ajustes por fase y amplitud entre las observaciones y los modelos analizados tal como se expone en la verificación de los modelos de la Sección 5.4.

Los resultados del trabajo pueden ser discutibles porque a pesar de que la densidad de las estaciones escogidas es buena; sus series de tiempo presentan demasiados vacíos (Ver Fig. 7); además que, los resultados de tendencias y clima futuro son sensibles al periodo de referencia escogido para clima presente tal como se muestra en la Fig. 8. Una vez las series fueron completadas, se obtuvieron las tendencias de temperatura del aire, precipitación y humedad relativa utilizando el ajuste por mínimos cuadrados.

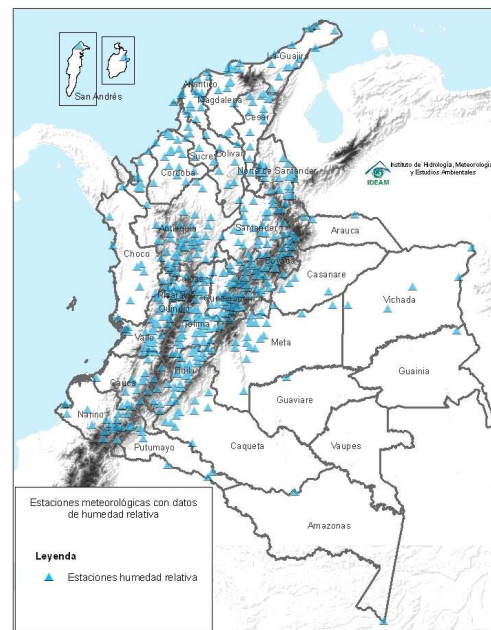
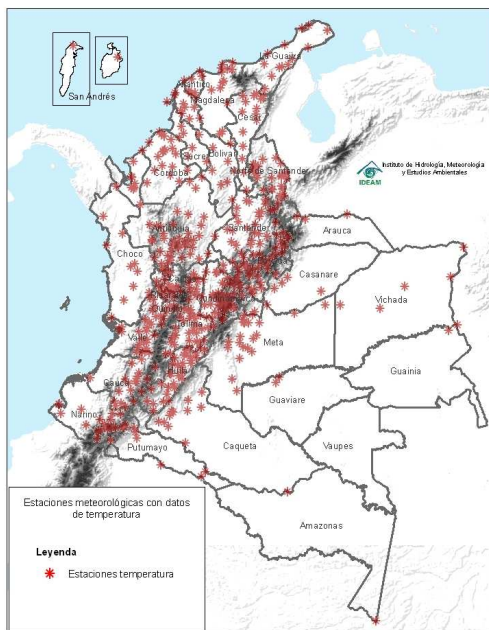
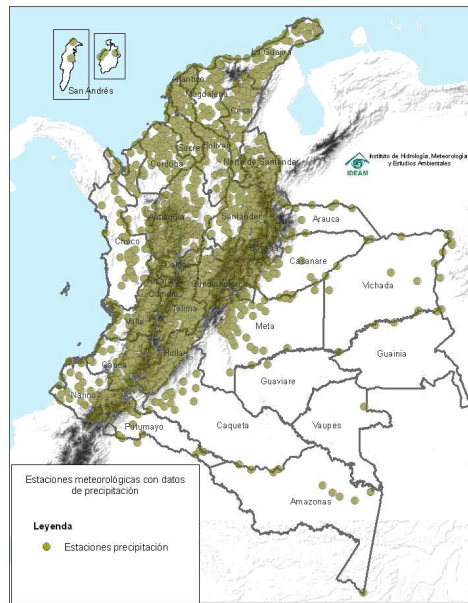


Figura 6. Densidad espacial de estaciones analizadas para precipitación, temperatura y humedad relativa

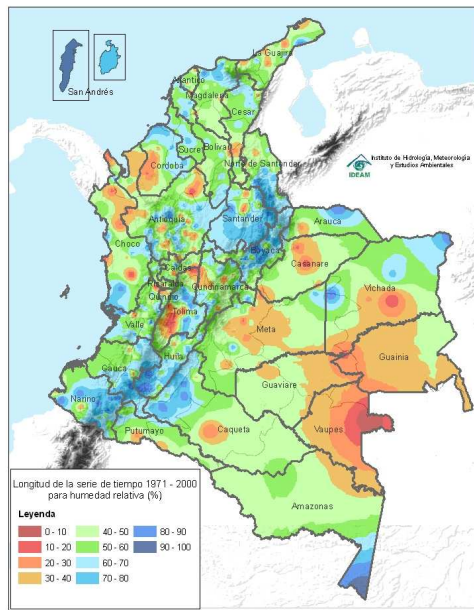
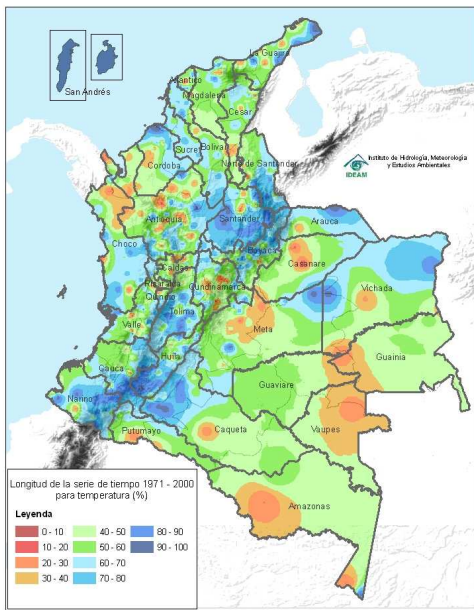
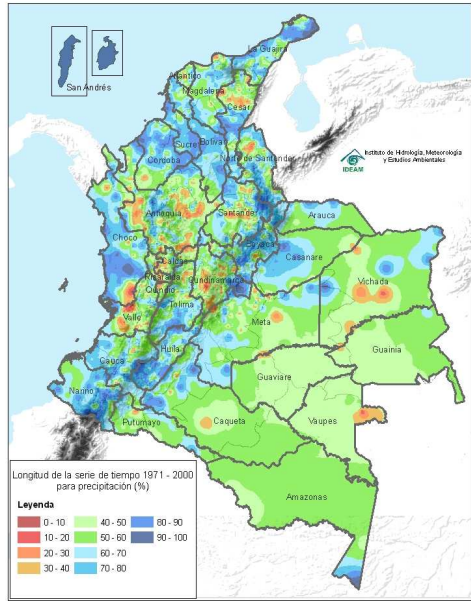


Figura 7. Longitud de las series de tiempo utilizadas en % para el período 1971-2000

Tabla 1. No. De estaciones analizadas e información disponible de lluvia, temperatura y humedad relativa por departamento

DEPARTAMENTO	No. ESTACIONES ANALIZADAS PRECIPITACION	% INFORMACIÓN DISPONIBLE
Amazonas	15	54.4
Antioquia	412	51.0
Arauca	11	62.9
Atlántico	47	51.6
Bogotá	70	40.1
Bolívar	108	67.2
Boyacá	195	65.5
Caldas	121	44.8
Caquetá	22	60.7
Casanare	25	63.0
Cauca	136	61.3
Cesar	128	53.8
Chocó	52	74.8
Córdoba	95	71.4
Cundinamarca	308	49.5
Guainía	7	56.1
Guaviare	7	40.1
Huila	103	69.8
La Guajira	85	67.6
Magdalena	99	61.2
Meta	72	56.7
Nariño	73	69.8
Norte de Santander	139	61.9
Putumayo	41	59.7
Quindío	31	38.1
Risaralda	76	43.4
San Andrés	8	64.6
Santander	196	56.5
Sucre	43	73.7
Tolima	190	57.1
Valle	287	49.6
Vaupés	10	44.7
Vichada	29	53.6
<b>TOTAL</b>	<b>3241</b>	<b>57.5</b>

DEPARTAMENTO	No. ESTACIONES ANALIZADAS TEMPERATURA	% INFORMACIÓN DISPONIBLE
Amazonas	4	48.3
Antioquia	75	51.8
Arauca	3	63.9
Atlántico	12	49.9
Bogotá	24	37.2
Bolívar	21	63.1
Boyacá	43	62.7
Caldas	21	48.5
Caquetá	11	72.1
Casanare	8	38.5
Cauca	28	67.7
Cesar	22	51.1
Chocó	15	57.4
Córdoba	22	62.4
Cundinamarca	62	51.4
Guainía	3	34.4
Guaviare	2	52.5
Huila	37	64.1
La Guajira	18	56.7
Magdalena	17	54.8
Meta	26	49.2
Nariño	20	70.1
Norte de Santander	30	62.3
Putumayo	12	52.2
Quindío	5	52.6
Risaralda	15	47.9
San Andrés	2	95.3
Santander	33	73.1
Sucre	6	63.5
Tolima	43	66.5
Valle	38	54.7
Vaupés	1	25.6
Vichada	6	68.4
<b>TOTAL</b>	<b>685</b>	<b>56.7</b>

DEPARTAMENTO	No. ESTACIONES ANALIZADAS HUMEDAD	% INFORMACIÓN DISPONIBLE
Amazonas	2	75.2
Antioquia	68	49.4
Arauca	3	56.2
Atlántico	9	51.8
Bogotá	15	43.5
Bolívar	20	58.8
Boyacá	38	63.0
Caldas	20	50.0
Caquetá	12	65.1
Casanare	8	33.9
Cauca	27	65.2
Cesar	18	52.7
Chocó	14	48.9
Córdoba	22	54.8
Cundinamarca	41	56.7
Guainía	2	30.3
Guaviare	2	38.8
Huila	36	61.3
La Guajira	17	46.6
Magdalena	14	55.1
Meta	26	43.1
Nariño	28	57.7
Norte de Santander	19	68.6
Putumayo	11	50.7
Quindío	6	45.4
Risaralda	13	50.7
San Andrés	2	84.7
Santander	33	66.6
Sucre	6	57.1
Tolima	42	44.8
Valle	35	55.5
Vaupés	1	4.0
Vichada	6	58.9
<b>TOTAL</b>	<b>616</b>	<b>52.9</b>

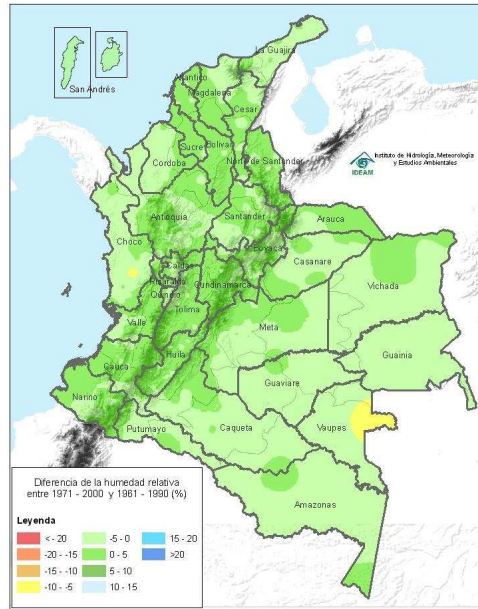
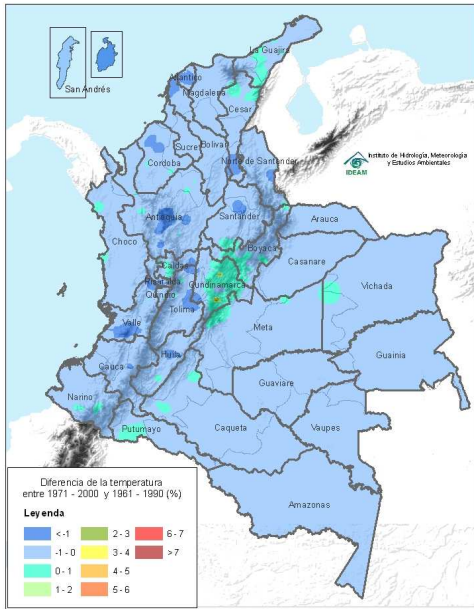
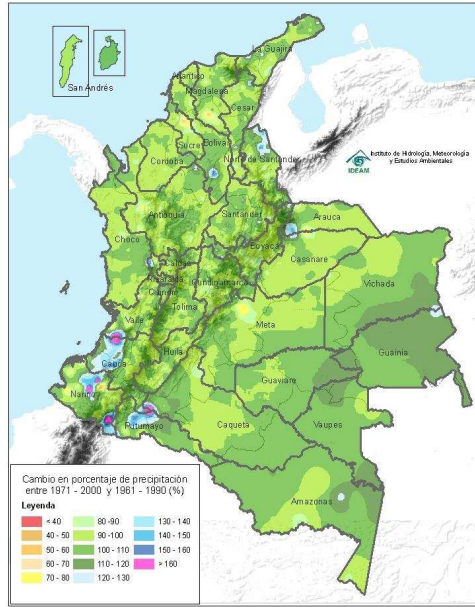


Figura 8. Comparación de los cambios en precipitación, temperatura y humedad relativa entre (1971-2000) vs. (1961-1990). Aumentos significativos de lluvia, se aprecian en sectores de la Región Pacífica y Piedemonte Amazónico e incrementos de temperatura cercanos a 1°C se aprecian en el centro del país para el período 1971-2000 frente al período 1961-1990. Lo anterior pone de manifiesto que los análisis de cambio climático son sensibles al período de referencia escogido. La humedad relativa no presentó cambios significativos cuando se compararon los dos períodos de referencia.

## 5.2. MODELOS REGIONALES UTILIZADOS

Para generar escenarios de cambio climático, 3 modelos regionales fueron utilizados: El modelo global de alta resolución del Japón GSM-MRI con resolución horizontal de 20kmX20km, PRECIS de Reino Unido con resolución horizontal de 25kmX25km y el modelo WRF con el cual se generaron resultados a 4kmX4km para la región Andina.

Tabla 2. Modelos globales y regionales utilizados para la generación de escenarios de cambio climático en Colombia

CONDICIONES INICIALES MODELOS DE BAJA RESOLUCION	MODELO PARA DOWNSCALING DINAMICO	RESOLUCION	ESCENARIOS	PERIODO ANALIZADO
<b>CLIMA PRESENTE</b>				
ERA40 (UK)	PRECIS (UK)	25KMx25KM	Clima presente	1971-2000
CCM3 (USA)	GSM-MRI (Japón)	20KMx20KM	Clima presente	1979-1998
CAM (USA)	WRF (R. Andina) – USA	4KMx4KM	Año de Referencia	1990
<b>CLIMA FUTURO</b>				
HadAM3P (UK)	PRECIS (UK)	25KMx25KM	A2	2011-2100
HadAM3P (UK)	PRECIS (UK)	25KMx25KM	B2	2011-2100
ECHAM4 (Alemania)	PRECIS (UK)	25KMx25KM	A2(S)	2071-2100
ECHAM4 (Alemania)	PRECIS (UK)	25KMx25KM	B2(S)	2071-2100
HadCM3Q (UK)	PRECIS (UK)	25KMx25KM	A1B(S)	2011-2100
CAM (USA)	WRF (R. Andina) – USA	4KMx4KM	A2	Cada 10 años entre 2020-2100
CCM3 (USA)	GSM-MRI (Japón)	20KMx20KM	A1B	2080-2099

(S) indica que el escenario tuvo en cuenta el efecto de los sulfatos en la atmósfera

- GSM-MRI: El modelo GSM-MRI de 20kmX20km tomó condiciones iniciales del modelo CCM3 (NCAR) con resolución T239L18; es decir, de un modelo que ya tenía representada las variables meteorológicas en 18 niveles de altura en la atmósfera con grillas de 50kmX50Km de resolución horizontal. (Ohfuchi et al; 2004). Para simular el clima futuro, el modelo tomó como condiciones iniciales los resultados de un modelo oceánico que proyecta la temperatura superficial del mar a lo largo del siglo XXI y fue considerada como condición de baja frontera para un escenario A1B (Mizuta et al., 2005). Análisis de sus resultados para Colombia en lluvia y temperatura fueron presentados por Ruiz (2007)<sup>4</sup> y por el Banco Mundial (Ruiz & Martínez, 2007); pero como valor agregado, en este trabajo se presenta una corrección estadística considerando las calibraciones del modelo en clima presente teniendo en cuenta los registros históricos de lluvia, temperatura y humedad del IDEAM, la cual fue aplicada para el escenario A1B del clima futuro. El modelo fue corrido en el supercomputador Earth Simulator; que en el año 2004, era la cuarta computadora más poderosa del mundo y la primera para investigación en ciencias de la Tierra usando procesamiento paralelo con 5120 procesadores (Habata et al., 2004). En la actualidad la supercomputadora ocupa el puesto 31 del Top500<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> <http://www.cambioclimatico.gov.co/clima-futuro.html>

<sup>5</sup> [www.top500.org](http://www.top500.org)



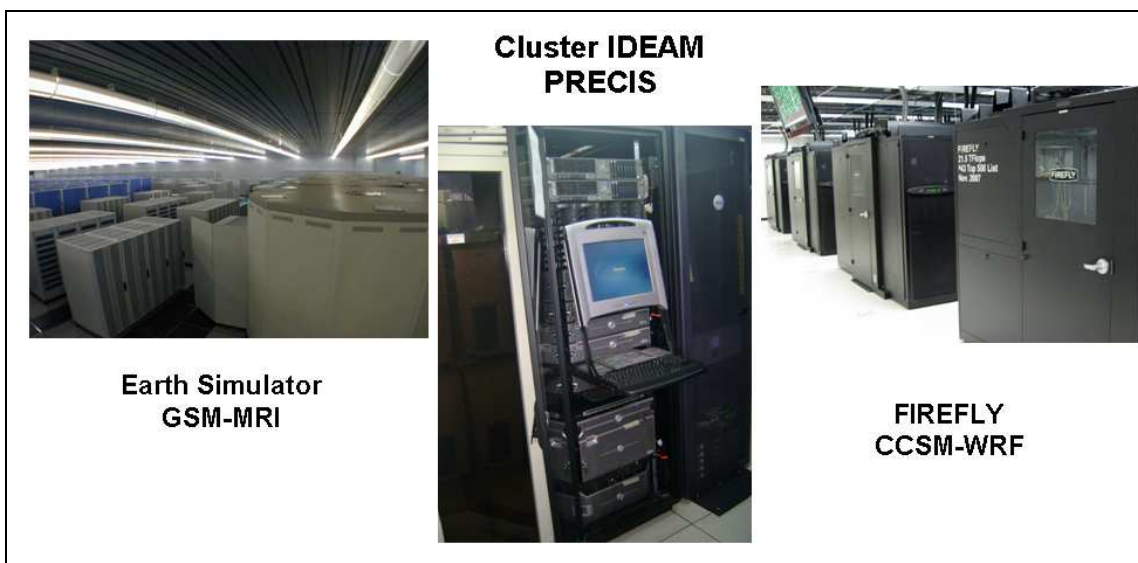


Figura 9. Tecnología utilizada por IDEAM para generar escenarios de cambio climático.

- PRECIS: El modelo PRECIS fue implementado en el IDEAM inicialmente en un clúster de PCs de 3 nodos compuesto de 12 procesadores; en cada nodo se instaló el modelo, permitiendo correr varios escenarios al mismo tiempo. Los escenarios considerados fueron A2, B2 y A1B; éste último consideró la presencia de sulfatos en la atmósfera. Las condiciones iniciales fueron tomadas de los resultados de los modelos globales ECHAM4, HadAM3P y HadCM3Q. La resolución de los resultados se obtuvo en grillas de 25kmX25Km. También se consideraron los escenarios A2 y B2 con sulfatos; con estos últimos, se pretendió obtener incrementos de temperatura más bajos y posiblemente otras distribuciones de la lluvia; ya que se tiene el concepto de que la presencia de los sulfatos en la atmósfera hacen un “efecto espejo” reflejando la luz solar al espacio y generando un efecto de enfriamiento (Benavides y León, 2005). El modelo PRECIS es un modelo atmosférico y de suelo, de área limitada y alta resolución el cual requiere la descripción de la superficie y condiciones laterales de frontera. Las condiciones de superficie son solo requeridas en el agua, donde los modelos necesitan series de tiempo de temperatura superficial del mar y extensiones de hielo. Las condiciones laterales de frontera suministran información de la dinámica atmosférica en los bordes latitudinales y longitudinales del dominio. No hay restricción prescrita en las condiciones de altura del modelo. Las condiciones laterales de frontera comprenden variables atmosféricas estándar como la presión en superficie, las componentes horizontales del viento y medidas de temperatura y humedad. También ciertas configuraciones de PRECIS contienen la representación total del ciclo de azufre y un conjunto de condiciones de frontera (incluyendo SO<sub>2</sub>, aerosoles sulfatados y especies químicas asociadas) que también son requeridas. El clima presente en alta resolución fue obtenido con las condiciones iniciales que suministró el Reanálisis ERA40.
- WRF: A pesar de que el modelo WRF ya es usado en Colombia con fines de pronóstico del tiempo desde 2007 (Ruiz, 2008)<sup>6</sup> y de predicción climática dentro del proyecto CIIFEN<sup>7</sup>; éste fue implementado con una nueva parametrización asesorada por investigadores de la Universidad de Nebraska de los Estados Unidos y la experiencia que el autor tiene en el uso del modelo. El modelo WRF se instaló y configuró sobre el supercomputador FIREFLY de la misma universidad, el cual permitió hacer corridas en paralelo sobre 288

<sup>6</sup> <http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/>

<sup>7</sup> <http://mediawiki.cmc.org.ve/index.php/Portada>

procesadores. En 2007 este supercomputador ocupó el puesto 42 entre las máquinas computacionales más poderosas del mundo. Las condiciones iniciales se tomaron del CCSM (Community Climate System Model)<sup>8</sup> con resultados de baja resolución del modelo CAM (Community Atmospheric Model) y debido al límite de uso que tenía el autor, se decidió por correr el escenario pesimista A2 para el siglo XXI a través de la técnica de anidamiento con el fin de obtener resultados a 4kmX4Km de resolución horizontal en la región Andina.

Es fácil ver que la principal ventaja de esta técnica es que estos modelos son capaces de suministrar información en alta resolución de un conjunto de variables climáticas físicamente consistentes y representando mejor los eventos meteorológicos en alta resolución (Jones et al., 2004). La principal desventaja de este tipo de modelación, es que son computacionalmente costosos.

### **5.3. TÉCNICAS USADAS PARA OBTENER CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA**

Tres metodologías son las más utilizadas para obtener cambio climático regional: Estadístico, Dinámico e Híbrido (Dinámico-Estadísticas).

La técnica Dinámico-estadística fue utilizada con los resultados de alta resolución de los modelos GSM-MRI y PRECIS construyendo relaciones estadísticas entre los modelos regionales y los datos históricos, sabiendo que, como se mencionó en la Sección 5.1, su utilidad depende de la alta calidad de los datos locales, los cuales además deben ser suficientes, en un largo período de tiempo para establecer relaciones robustas con el clima actual (Jones et al., 2004).

En esta parte, las relaciones estadísticas encontradas para clima presente fueron luego aplicadas a las variables climáticas de los escenarios de cambio climático para estimar las correspondientes características locales y regionales. No obstante, antes de ello, se verificó el comportamiento de la estacionalidad entre los modelos y las observaciones y, se detectaron los lugares donde los modelos sobrestimaron y subestimaron cada una de las variables meteorológicas para clima presente con respecto a las observaciones. En el caso del modelo WRF, la técnica usada fue netamente dinámica; en este caso se tomó como línea base el año 1990, ya que el acumulado anual de lluvia, de los registros de IDEAM, terminó dentro de valores normales en gran parte del territorio nacional y las diferencias en clima futuro se hicieron con respecto al año mencionado.

### **5.4. VERIFICACIÓN**

Complementando lo que se viene mencionando desde la sección 5.3, no sobra decir que ningún modelo dará una perfecta validación de la climatología o de las observaciones. Jones et al (2004) recomienda validar dos o más modelos climáticos (GCM o RCM) para escoger el más apropiado con el fin de ser usado en el escenario para una región y, agrega que, la corrida de clima-presente es requerida para las proyecciones futuras de cambio climático ya que sus resultados deben ser comparados con la climatología de las observaciones sobre el mismo período de tiempo dado.

Dentro de esta metodología, vale la pena destacar que, cada valor meteorológico de lluvia, temperatura y humedad relativa registrado por la estación meteorológica, se comparó con el punto de grilla más cercano suministrado por los modelos, luego se analizó su estacionalidad y, en particular, si se encontraba que el modelo adelantaba o atrasaba la temporada lluviosa, se corregía a través de un desplazamiento de la serie del modelo, sincronizando el desfase del modelo. Una vez realizado esto, se procedió a calibrar la amplitud mediante el error cuadrático medio (*ECM*) característico de cada mes.

---

<sup>8</sup> <http://www.earthsystemgrid.org/>

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (ERA40_n - OBS_n)^2} \quad (7)$$

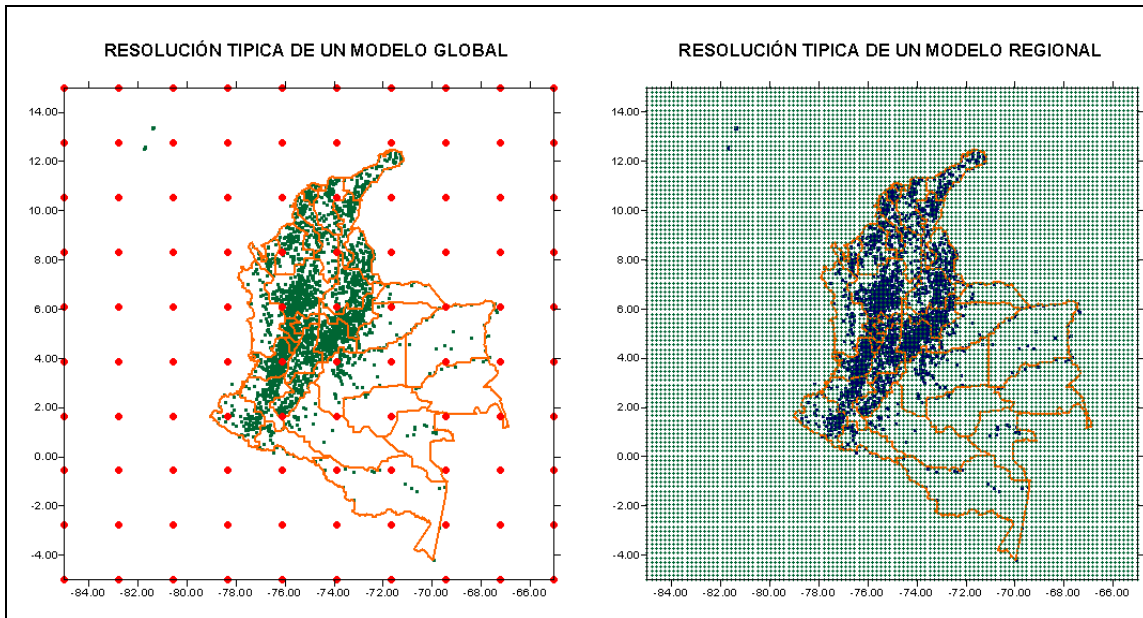


Figura 10. Superposición de las estaciones de lluvia de IDEAM con los puntos de grilla de un modelo típico global de baja resolución (2.5°) y de un modelo regional de alta resolución (20kmX20km o 25kmX25km). En los análisis de validación, se utilizó el punto de grilla más cercano que ofrecía el modelo regional con respecto a la ubicación de la estación meteorológica.

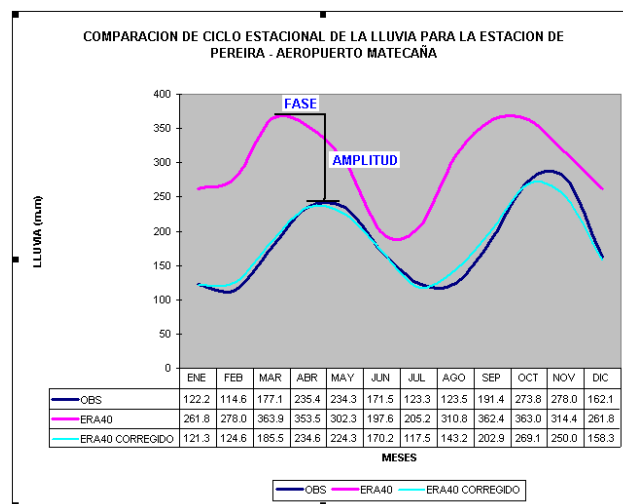


Figura 11. Corrección por fase para sincronizar el ciclo estacional del modelo con las observaciones y de amplitud para corregir los valores del modelo a valores representativos del lugar.

Estos ajustes fueron posteriormente tenidos en cuenta para la elaboración de los escenarios de cambio climático. No obstante, de acuerdo con Brookshaw & Davey (2005), ajustes lineales, cuando se utiliza el promedio de los 4 puntos de grilla con el promedio de los datos de las

estaciones meteorológicas dentro de ella, ofrecen mejores ajustes y, por lo tanto, deberían ser considerados en una próxima fase.

Una vez los modelos fueron corregidos por fase y amplitud, se calculó el coeficiente de correlación para el ciclo anual de clima presente entre los modelos ERA40 y GSM-MRI con las observaciones registradas por el IDEAM durante 1971-2000 y 1979-1998 respectivamente para precipitación, temperatura y humedad relativa.

De acuerdo con Pabón (2005), la homogeneidad de las series deberá ser evaluada por quienes desarrollan los estudios de impacto de cambio climático dependiendo de sus propósitos y del grado de relación clima-sistema impactado.

Una vez comparados los modelos ERA40 y GSM-MRI en clima presente con respecto a las observaciones, se catalogaron sus resultados como: muy confiables, confiables, poco confiables y nada confiables, con base en 4 indicadores que permitieron dar una idea de la calidad de los resultados de los modelos regionales, así:

1. La correlación entre los datos de los modelos y las observaciones.

$$I_1 = 100 \times (\text{Coef\_de\_correlación}) \text{ Si la correlación esta entre 0 y 1}$$

$$I_1 = 0 \text{ Si la correlación esta entre -1 y 0}$$

2. La longitud de las series utilizadas de IDEAM

$$I_2 = \% \text{ de los datos IDEAM}$$

3. La dirección de la tendencia de los modelos y las observaciones

$$I_3 = 100\% \text{ Si la tendencia del modelo y la observación, ambas aumentan}$$

$$I_3 = 100\% \text{ Si la tendencia del modelo y la observación, ambas disminuyen}$$

$$I_3 = 0\% \text{ Si la tendencia del modelo y la observación van en sentidos opuestos}$$

4. La diferencia entre los valores de tendencias simuladas por los modelos y obtenidas con las observaciones.

$$I_4 \rightarrow 0\% \quad \text{Diferencia} \rightarrow \infty$$

$$I_4 \rightarrow 100\% \quad \text{Diferencia} \rightarrow 0$$

En el índice final de confiabilidad, se dió más peso a la correlación, entre las observaciones y los resultados de los modelos de clima presente, porque valores cercanos a 1 ponen de manifiesto que los modelos están representando bien el ciclo estacional de las variables meteorológicas y, por lo tanto, simulando bien el clima. En segundo lugar, la dirección de la tendencia, ascendente o descendente, entre lo simulado y lo observado, porque en cambio climático, esta señal indica la razón o tasa de cambio de las variables meteorológicas con el tiempo. En tercer lugar, la diferencia del valor de tendencia, entre lo observado y lo simulado, porque entre más cercano a cero, esta diferencia, significa que los modelos están observando mejor el cambio del clima y en último lugar, la longitud de la serie de los datos de IDEAM, porque se lograron completar series de tiempo, estableciendo relaciones estadísticas entre lo modelado y lo observado; así:

$$I = \frac{4I_1 + I_2 + 3I_3 + 2I_4}{10} \quad (8)$$

Tabla 3. Índice de confiabilidad de los modelos

Índice de Confiabilidad	Clase
Menor al 60%	Nada confiable
Entre el 61 y 70%	Poco confiable
Entre el 71 y 85%	Confiable
Entre el 85 y 100%	Muy Confiable

Permitiendo evaluar la calidad de los modelos y ver las áreas donde los resultados finales de los mismos presentaron determinado grado de confianza para cada una de las variables meteorológicas analizadas.

## 5.5. ENSAMBLES

Los modelos climáticos son una representación imperfecta del sistema climático de la Tierra y los modeladores del clima emplean una técnica llamada ensamble para capturar rangos viables de posibles estados climáticos.

Una corrida de un modelo climático ensamblado consiste de dos o más corridas del mismo modelo, usando exactamente las mismas condiciones forzantes, donde la única diferencia son las condiciones iniciales; metodología que fue aplicada con el modelo PRECIS donde las condiciones iniciales cambiaron dependiendo del modelo global escogido. Cada simulación individual se conoce como un miembro del ensamble (Jones et al., 2004).

El promedio sobre los multi-miembros ensamblados da una medida de la respuesta promedio de los factores forzantes sobre el modelo (Jones et al., 2004). En los resultados de esta investigación se incluyeron los escenarios simulados por los modelos PRECIS, GSM-MRI, WRF; este último, en los departamentos de las regiones Andina y Pacífica y, el escenario de extrapolación de tendencias, para obtener la respuesta promedio de los factores forzantes en el clima del futuro.

## 5.6 INTERPOLACIONES

Con los resultados obtenidos de clima presente y los escenarios de cambio climático sobre las estaciones analizadas, se realizó una interpolación a nivel nacional para tener el panorama de Cambio Climático que le espera al país.

Es muy común que los modelos meteorológicos utilicen el método Cressman para interpolación espacial ya que este método analiza la densidad de estaciones, la distancia entre ellas y tiene en cuenta la resolución del terreno y de los campos de primera aproximación para la meteorología (Duhia, et al., 2004) además recomienda que radios de influencia en los métodos de interpolación tienen que ser comparables con las distancias en las estaciones. No obstante, las herramientas actuales de los sistemas de información geográfica no ofrecen este tipo de interpolación pero herramientas como las que ofrece el software SURFER permiten determinar el tipo de interpolación considerando lo siguiente (Surfer for Windows, 1994):

- Cuando hay menos de 10 datos se debe considerar métodos como Krigging y Funciones Radiales Básicas. Para definir la tendencia recomienda Regresión Polinomial.

- Cuando el tamaño de los datos son menores a 250 observaciones, Krigging con un variograma lineal o Funciones Radiales Básicas con funciones multicuadráticas producen buenas representaciones
- Con datos entre 250 y 1000 observaciones el método de Triangulación es rápido y da buena representación de los datos, Sin embargo, Krigging y las Funciones Radiales Básicas realizan el cálculo más lento pero mucho más fino.
- Para un conjunto de datos superior a 1000 observaciones, la Mínima Curvatura es un método rápido y produce una adecuada representación en los datos, Triangulación toma más tiempo pero mejora el resultado. No obstante, Krigging y la Función Radial Básica probablemente producen los mejores contornos, pero son demasiados lentos en el procesamiento de cómputo.

Si no se tiene la suficiente confianza en los datos, como puede ocurrir en este caso, se pueden usar Interpoladores exactos como:

- Inverso de la distancia cuando no se especifica un factor de suavizamiento
- Krigging sin especificar efectos
- Funciones Radiales Básicas
- El Método Sheppard cuando no se especifica un factor de suavizamiento
- Triangulación con Interpolación Lineal.

Otra ventaja que tiene los métodos de interpolación que ofrece SURFER, es que puede analizar el tipo de alcance dividiendo espacialmente los datos por cuadrantes y/o por octantes, de manera que es capaz, para cada uno de los cuadrantes u octantes, analizar la densidad espacial de los datos y realizar la estimación de los pesos de forma distinta; situación que es importante para la distribución final del campo de de cualquier variable meteorológica ya que sectores como los Llanos Orientales y la Amazonía presentan una densidad muy baja de estaciones comparadas con las ubicadas en el resto del país.

Una regla de alcance que permite dicho software es que, una vez seleccionado el tipo de alcance (simple, cuadrante u octante) elige el alcance de puntos a considerar cuando la interpolación se realiza. Considerando lo anterior, se utilizó como método de interpolación Krigging, sin especificar efectos, octante en el tipo de alcance y anisotropías circulares en las reglas de alcance para cada una de las variables meteorológicas a una resolución de 7kmX7km. Finalmente, los mapas resultantes son procesados en ArcView

## 5.7. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE LANG

Con el fin de consolidar los cambios de precipitación y temperatura del clima futuro en un valor; la clasificación climática de Lang (IDEAM, 2005), permitió especificar mediante el cociente entre la precipitación anual en mm y la temperatura media anual en grados Celsius, el cambio del clima para tres normales climatológicas (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) según la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación Climatológica de Lang

Factor de Lang P/T	Clase de clima
0 a 20.0	Desértico
20.1 a 40.0	Árido
40.1 a 60.0	Semiárido
60.1 a 100.0	Semihúmedo
100.1 a 160.0	Húmedo
Mayor que 160.1	Superhúmedo

## 5.8. CONFORT TÉRMICO

Para calcular el confort térmico, se utilizó la ecuación ajustada de Poder de Refrigeración de Leonardo Hill y Morikofer-Davos (IDEAM, 2005) el cual considera el parámetro de humedad junto con la variación de la temperatura con la altura y cataloga la sensación térmica en 7 clases de acuerdo con la Tabla 5.

Tabla 5. Índice de Confort Térmico

Índice de Confort	Sensación térmica
0 a 3	Muy caluroso
3.1 a 5	Caluroso
5.1 a 7	Cálido
7.1 a 11	Agradable
11.1 a 13	Algo frío
13.1 a 15	Frío
Mayor a 15	Muy frío

Las ecuaciones utilizadas para su cálculo fueron las siguientes:

$$IC = (36.5 - t)(0.05 + \frac{h}{250}) \text{ Para elevaciones inferiores a 1000 metros} \quad (9)$$

$$IC = (36.5 - t)(0.05 + \frac{h}{180}) \text{ Para elevaciones entre 1000 a 2000 metros} \quad (10)$$

$$IC = (36.5 - t)(0.05 + \frac{h}{160}) \text{ Para elevaciones superiores a 2000 metros} \quad (11)$$

Donde  $IC$  es el índice de confort,  $t$  la temperatura del aire en grados Celsius y  $h$  la humedad relativa en porcentaje (%).

## 6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Antes de entrar a la discusión de los resultados obtenidos con los modelos regionales, era necesario en parte responder la pregunta: ¿Qué tanto los modelos globales, en su baja resolución, representan en algún grado las condiciones meteorológicas de Colombia? Parte del interrogante lo han resuelto Acevedo (2009) y Pabón (2010).

Acevedo (2009), reconoce que los modelos globales simulan bien las características de circulación atmosférica general; pero que, a escala regional los modelos mostraron desviaciones medias por zona que varían enormemente de una región a otra y de un modelo a otro, y las desviaciones de los valores medios por zona de la temperatura estacional a nivel continental son normalmente de  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ , y las desviaciones de las precipitaciones varían entre -40% y +80%. Para el caso de la precipitación, Acevedo (2009) evaluó cuatro modelos de circulación global: CCSM3 (Estados Unidos), ECHAM5 (Alemania), MIROC 3.2 HIRIES (Japón) y HadGEM1 (Reino Unido) para el periodo 1981-2000 y midió su desempeño comparando las series de precipitación mensual observadas y simuladas usando dos medidas para cuantificar la bondad de los modelos: el coeficiente de correlación (asociación lineal) y la información mutua (asociación no lineal); sus resultados indicaron que los modelos de circulación general que mejor inicializaron la climatología de Colombia fueron CCSM3 y ECHAM5. Acevedo (2009) mencionó, a escala regional, que todos los modelos mostraron un mejor comportamiento en la región Caribe y en el Norte de la región Andina tanto para la información mutua como para el coeficiente de correlación. En el sur de la región Andina, por el contrario, las correlaciones encontradas por los cuatro modelos fueron en su mayoría negativas y la información mutua muy débil.

Similarmente, Pabón (2010) determinó los coeficientes de correlación para la precipitación, entre las observaciones y 6 modelos de circulación general, obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Coeficiente de correlación entre la precipitación simulada (1961-1990) y la representada por el NCEP/NCAR Reanalysis para la América Tropical (Pabón, 2010)

MODELO	MESES												PROMEDIO
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
CSIRO	0.884	0.900	0.915	0.924	0.912	0.892	0.883	0.887	0.891	0.905	0.886	0.871	0.896
ECHAM4	0.881	0.874	0.872	0.841	0.831	0.850	0.820	0.799	0.826	0.878	0.869	0.871	0.851
Hadley	0.969	0.889	0.881	0.828	0.801	0.821	0.840	0.861	0.894	0.838	0.830	0.842	0.858
CCCma	0.822	0.802	0.795	0.811	0.813	0.800	0.805	0.804	0.825	0.821	0.824	0.815	0.811
CCSR	0.792	0.799	0.774	0.781	0.782	0.792	0.822	0.836	0.832	0.849	0.829	0.807	0.808
NCAR	0.632	0.571	0.539	0.590	0.613	0.641	0.663	0.682	0.704	0.702	0.743	0.763	0.654

CSIRO	Commonwealth Scientific and Ind. Research Org (Australia)
ECHAM4	European Centre Hamburg Model (Alemania)
Hadley	Hadley Centre (Reino Unido)
CCCma	Canadian Climate Centre
CCSR	Center for Climate research Studies (Japón)
NCAR	National Center for Atmospheric Research (USA)

Responder la pregunta anterior para la precipitación, fue muy importante porque da relevancia a los resultados que en alta resolución se presentan en este trabajo en el sentido que se usaron los modelos globales del Centro Hadley y del Centro Europeo (ECHAM4), como condiciones iniciales para la generación de escenarios de cambio climático regionales, los cuales presentaron una correlación superior a 0.8 para resolver el campo espacial de la precipitación para la América Tropical.

Como parte de la validación de los modelos, en esta investigación también se muestra que ellos simularon bien las características de circulación general atmosférica y en especial la migración estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) a lo largo del año; la cual ejerce un papel determinante en el comportamiento de la precipitación en el ámbito nacional y regional.



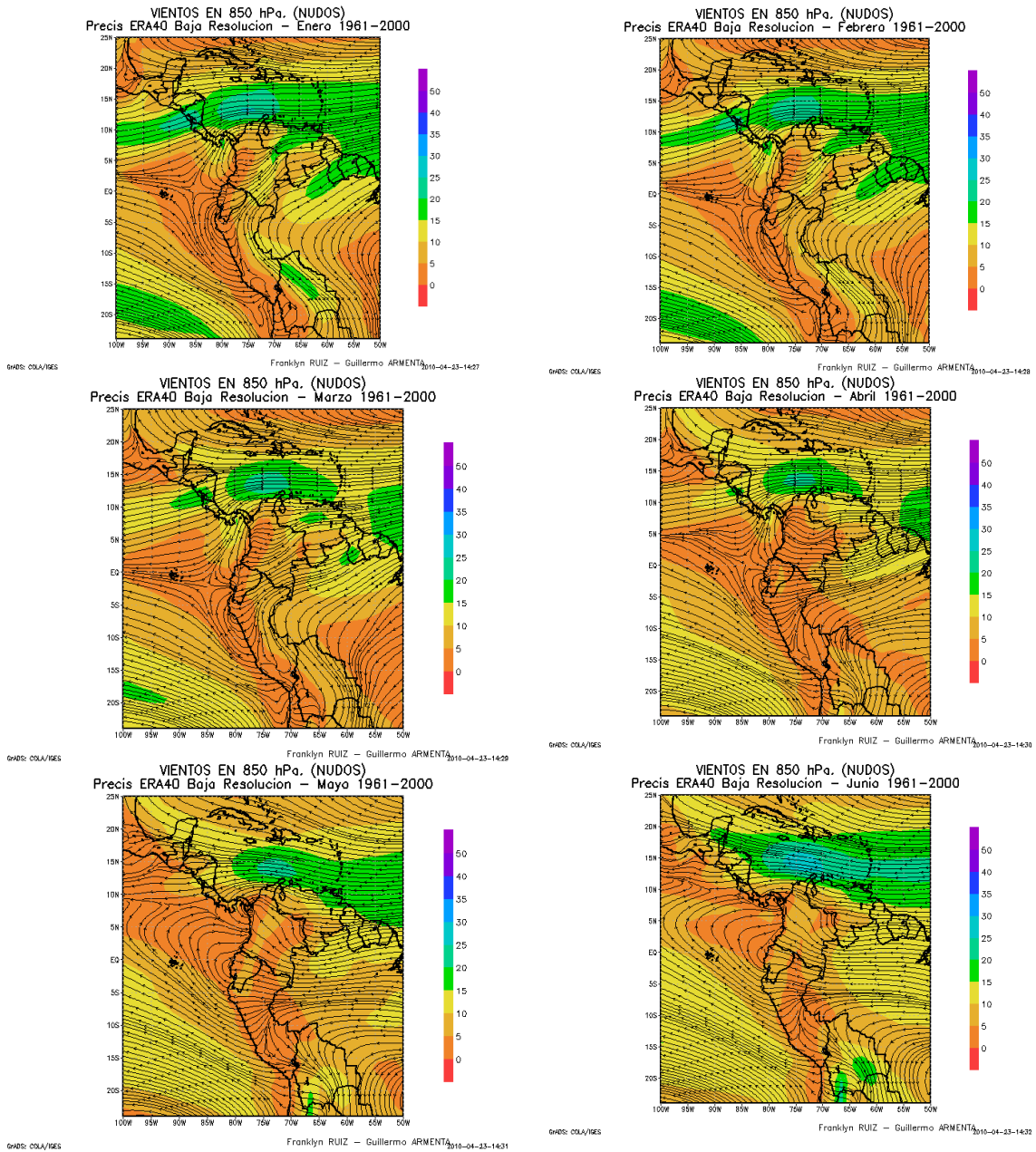


Figura 12. Campo promedio de dirección y velocidad del viento en 850 milibares entre enero y junio simulado con el reanálisis ERA40

En particular, el modelo ERA40 representó el movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical latitudinalmente como lo describe León et al. (2000) en donde el segmento del Océano Pacífico Oriental alcanza su posición extrema meridional en los 2 grados de latitud norte entre enero y febrero; en diciembre, la ZCIT, tiene una ubicación algo más al norte. Para el período marzo-mayo, este sector de la ZCIT, se mueve hacia el norte y su posición, cerca de la costa pacífica colombiana esta entre 2 y 7 grados de latitud norte; mientras que entre Junio y Agosto, la ZCIT, se localiza entre 8 y 10 grados de latitud norte. En el ciclo septiembre-noviembre, el segmento del Pacífico de la ZCIT, comienza su desplazamiento hacia el sur y se registran posiciones desde 11 grados a 7 grados de latitud norte. En las Figs. 12 y 13 también se aprecia que la ZCIT es el

resultado de la convergencia de los vientos Alisios del noreste y sureste cerca del Ecuador (León et al., 2000).

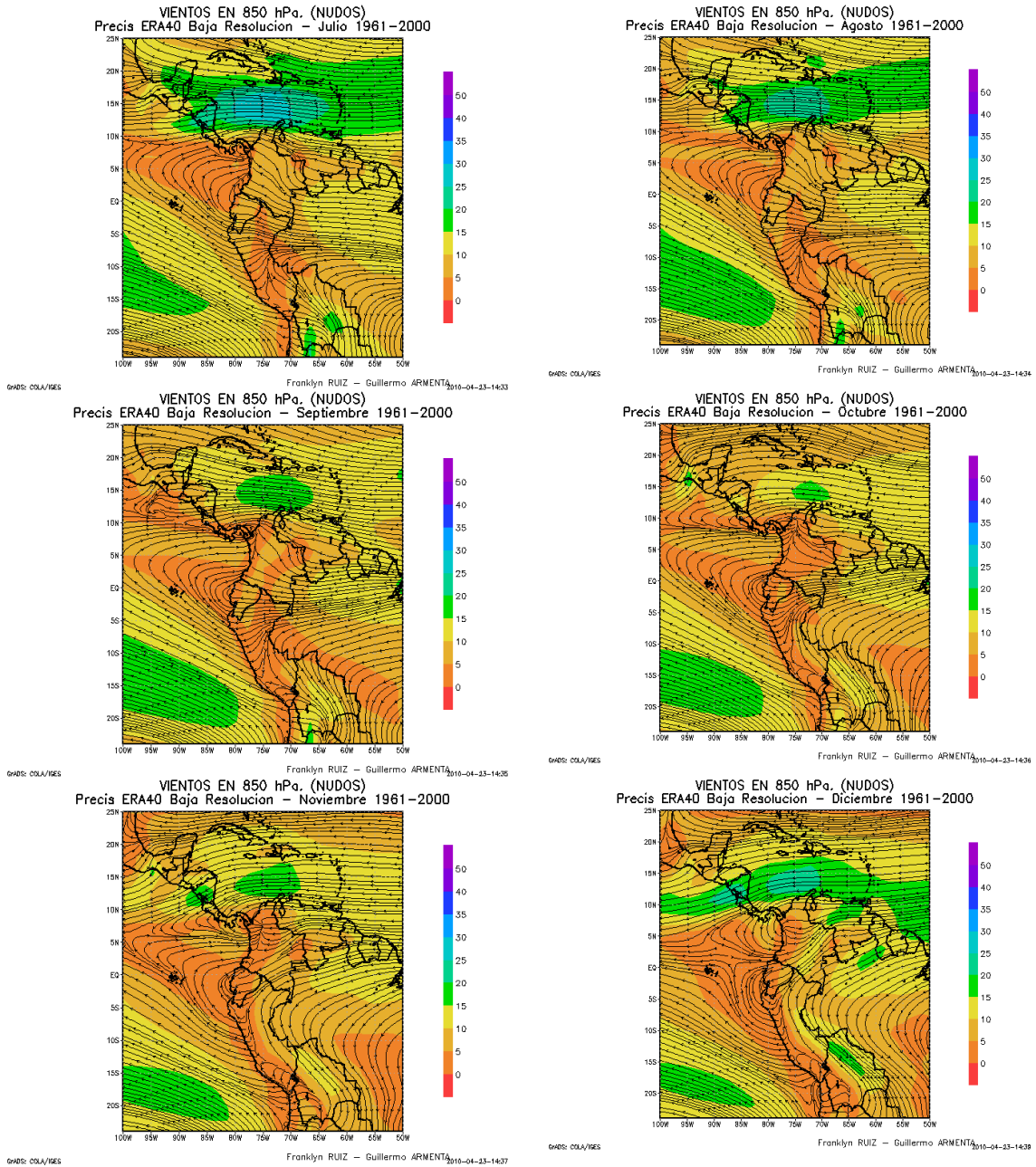


Figura 13. Campo promedio de dirección y velocidad del viento en 850 milibares entre julio y diciembre simulado con el reanálisis ERA40

## 6.1. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Una vez los modelos fueron ajustados por fase (sincronización con el ciclo estacional) y amplitud (corrección por sobre o subestimación sumando o restando el Error Cuadrático Medio dependiendo del caso) se calculó el coeficiente de correlación para el ciclo anual entre los modelos ERA40 y GSM-MRI para clima presente, es decir, para 1971-2000 en el primer caso y 1979-1998 para el modelo de alta resolución japonés.

En general, los modelos representaron bien en un alto porcentaje los ciclos estacionales de las variables meteorológicas sobre las estaciones ubicadas a lo largo y ancho del territorio nacional.

En particular, la temperatura simulada por el modelo de alta resolución del Japón presentó las mejores correlaciones, lo que se traduce en mejores simulaciones de clima presente para esta variable meteorológica; no obstante, el modelo ERA40 no presentó buenas relaciones entre lo observado y simulado para Amazonas, Atlántico y Sucre especialmente.

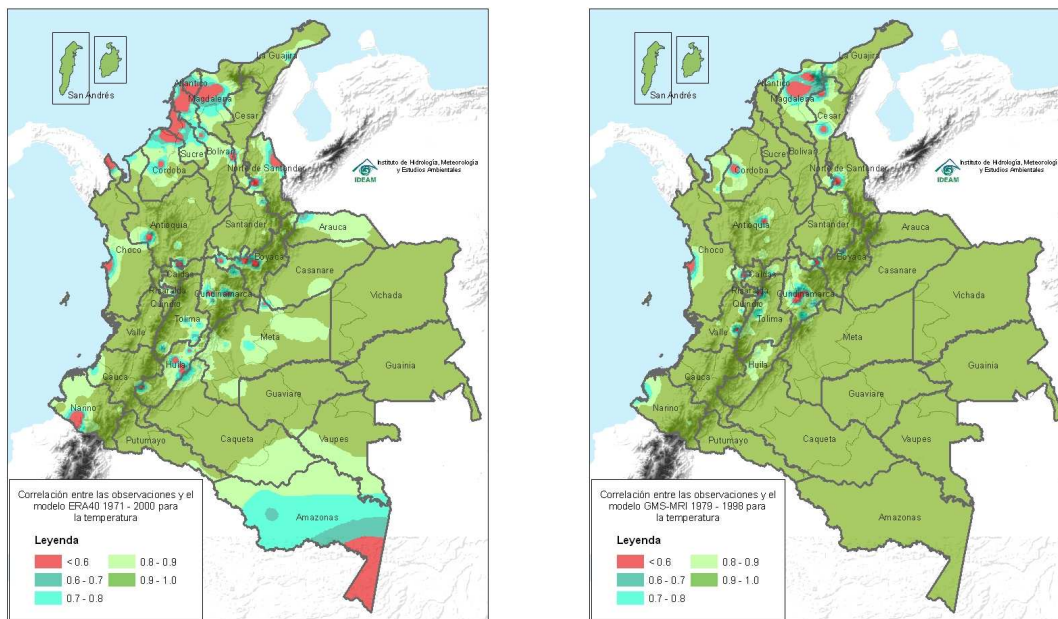


Figura 14. Correlación del ciclo anual entre los modelos y las observaciones para temperatura.

Por otro lado, la precipitación presentó buenos ajustes en zonas llanas de Colombia excepto sobre Putumayo y Amazonas desde el punto de vista del modelo ERA40 y en Quindío desde el punto de vista del modelo GSM-MRI; sin embargo, es claro que a los modelos ERA40 y GSM-MRI les faltó habilidad para generar el correcto ciclo anual de la lluvia en varios puntos de la zona Andina.

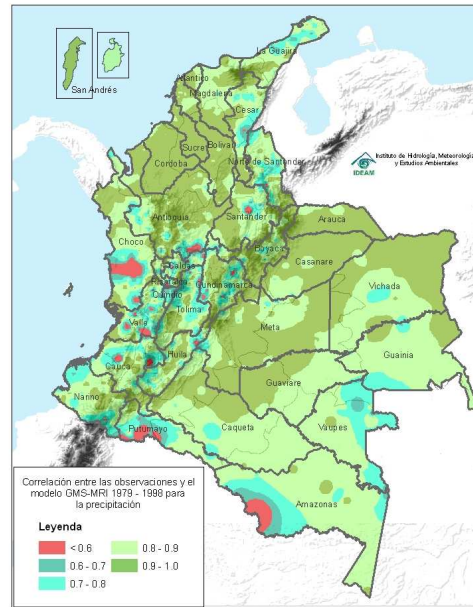
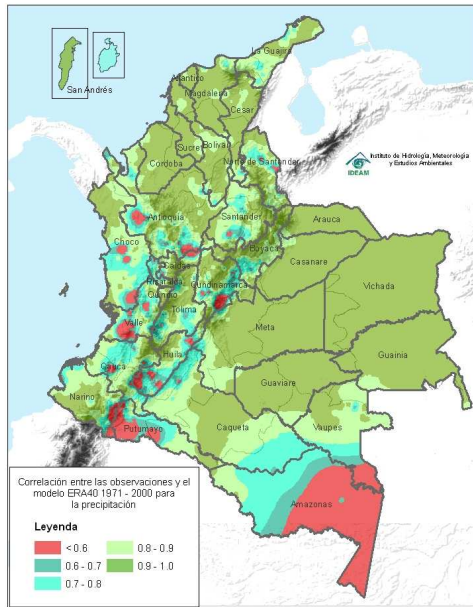


Figura 15. Correlación del ciclo anual entre los modelos y las observaciones para precipitación.

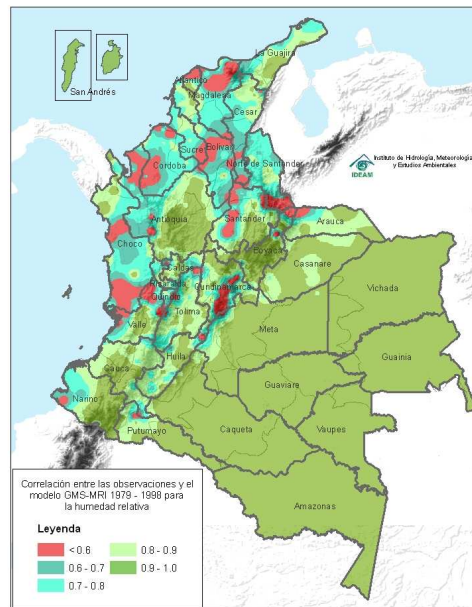
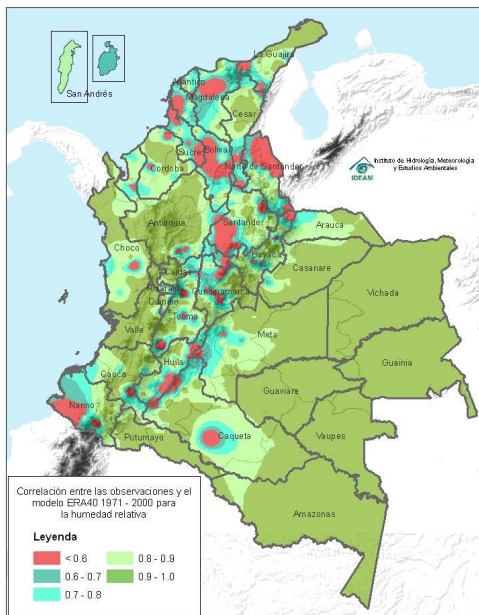


Figura 16. Correlación del ciclo anual entre los modelos y las observaciones para humedad relativa.

La humedad relativa en principio no presentó obstáculos en la simulación de clima presente por los modelos en la Orinoquia y Amazonía, pero increíblemente aunque los valores simulados son representativos para las regiones Andina, Caribe y Pacífica; no fueron capaces de representar bien el ciclo estacional a lo largo del año en varios puntos de las zonas mencionadas; en especial sobre

Bogotá, Bolívar, Sucre y Nariño visto con el modelo ERA40 y Bogotá, Magdalena, Córdoba, Sucre y Nariño visto con el modelo GSM-MRI de alta resolución del Japón.

Tabla 7. Correlaciones anuales entre los modelos y las observaciones para precipitación, temperatura y humedad relativa.

DEPARTAMENTO	PRECIPITACION		TEMPERATURA		HUMEDAD RELATIVA	
	ERA40	GSM-MRI	ERA40	GSM-MRI	ERA40	GSM-MRI
Amazonas	0.55	0.81	0.55	1.00	0.97	0.99
Antioquia	0.86	0.90	0.95	0.94	0.91	0.86
Arauca	0.96	0.92	0.79	1.00	0.89	0.82
Atlántico	0.94	0.92	0.56	0.89	0.79	0.71
Bogotá	0.79	0.79	0.78	0.78	0.55	0.22
Bolívar	0.92	0.92	0.79	0.97	0.58	0.75
Boyacá	0.89	0.91	0.86	0.94	0.83	0.92
Caldas	0.82	0.80	0.93	0.89	0.91	0.81
Caquetá	0.87	0.90	1.00	1.00	0.92	0.98
Casanare	0.96	0.90	0.95	1.00	0.92	0.92
Cauca	0.83	0.82	0.94	0.98	0.84	0.86
Cesar	0.91	0.85	0.93	0.90	0.77	0.71
Chocó	0.84	0.79	0.85	0.92	0.87	0.77
Córdoba	0.95	0.95	0.76	0.91	0.86	0.65
Cundinamarca	0.84	0.85	0.86	0.80	0.81	0.84
Guainía	0.97	0.92	0.97	1.00	1.00	1.00
Guaviare	0.95	0.88	0.99	1.00	0.95	1.00
Huila	0.77	0.85	0.86	0.92	0.73	0.86
La Guajira	0.87	0.85	0.95	0.97	0.83	0.85
Magdalena	0.93	0.91	0.87	0.76	0.73	0.60
Meta	0.97	0.93	0.91	1.00	0.89	0.97
Nariño	0.82	0.87	0.89	0.94	0.60	0.70
Norte de Santander	0.83	0.83	0.85	0.93	0.74	0.90
Putumayo	0.40	0.80	0.97	1.00	0.93	0.84
Quindío	0.91	0.66	0.99	0.94	0.98	0.80
Risaralda	0.81	0.75	0.79	0.89	0.82	0.83
San Andrés	0.99	0.77	0.99	1.00	0.95	0.85
Santander	0.86	0.86	0.96	0.96	0.70	0.76
Sucre	0.94	0.95	0.65	0.95	0.59	0.67
Tolima	0.86	0.80	0.92	0.96	0.78	0.81
Valle	0.76	0.76	0.98	0.95	0.96	0.71
Vaupés	0.89	0.78	0.97	1.00	0.99	1.00
Vichada	0.96	0.92	0.98	1.00	1.00	1.00

Correlaciones negativas hacia -1 indicaron que el modelo simuló de manera opuesta el ciclo estacional con respecto a lo real dado por las observaciones como se aprecia en la Fig. 17.

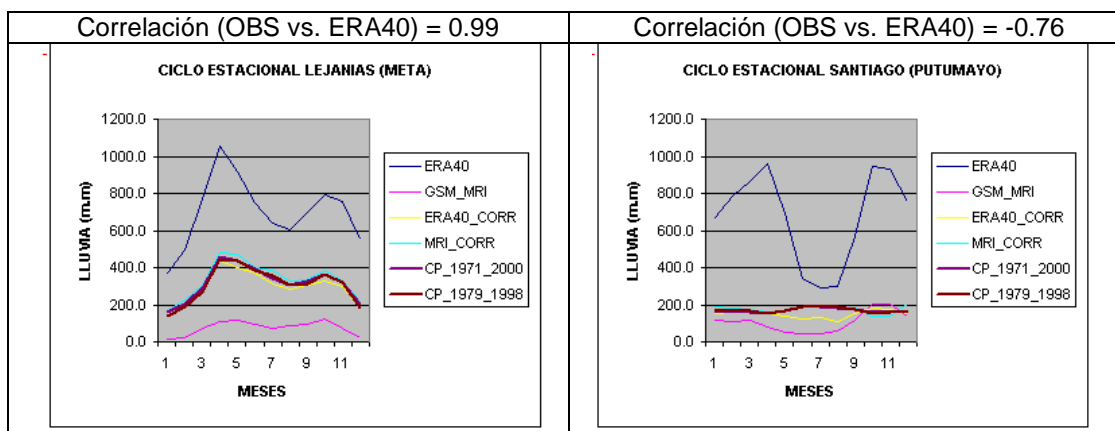


Figura 17. Correlaciones positivas del ciclo anual representa buenas simulaciones del modelo con respecto a las observaciones. Correlaciones negativas indican que el modelo simuló el ciclo anual de forma contraria. Esto último en ocasiones ocurre porque el punto de grilla más cercano del modelo con respecto a la estación cayó dentro de otro régimen estacional que esta localizado a menos de 14 kilómetros de distancia. En estos ejemplos también es claro ver como el modelo ERA40 sobreestima la cantidad de lluvia mientras que GSM-MRI la subestimó. (ERA40 y GSM-MRI indican los resultados netos dados por los modelos, ERA40\_CORR y MRI\_CORR indican el resultado de la corrección de los modelos, CP 1971\_2000 y CP 1979\_1998 indican los climas de referencia que necesitaron ser obtenidos con las observaciones de IDEAM)

## 6.2. EVIDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA TEMPERATURA, LLUVIA Y HUMEDAD EN EL PERÍODO DE REFERENCIA 1971-2000

El análisis comparativo de la evidencia de cambio climático entre las observaciones y los resultados de los modelos regionales, también sirvió para verificar habilidades de PRECIS y GSM-MRI en la representación de la evolución temporal de los patrones meteorológicos locales. La tendencia lineal de aumento o disminución de la temperatura, lluvia y humedad relativa en la normal climatológica 1971-2000, se realizó entre las observaciones de IDEAM y el modelo ERA40; mientras que el período de referencia 1979-1998, fue usado entre las observaciones de IDEAM y el modelo global de alta resolución de Japón.

### 6.2.1. TENDENCIAS EN TEMPERATURA

Consistente con los resultados de Benavides & León (2005), se apreció en los análisis de tendencia lineal para temperatura del aire que, la temperatura media del aire está aumentando a una tasa de cambio promedio para el país de 0.13°C/década de acuerdo con las observaciones, el modelo ERA40 calculó un valor similar de 0.12°C/década; mientras que el modelo MRI obtuvo un resultado de 0.32°C/década para la serie 1978-1998. Esto en parte demuestra que los resultados finales son sensibles al periodo de referencia que se tome.

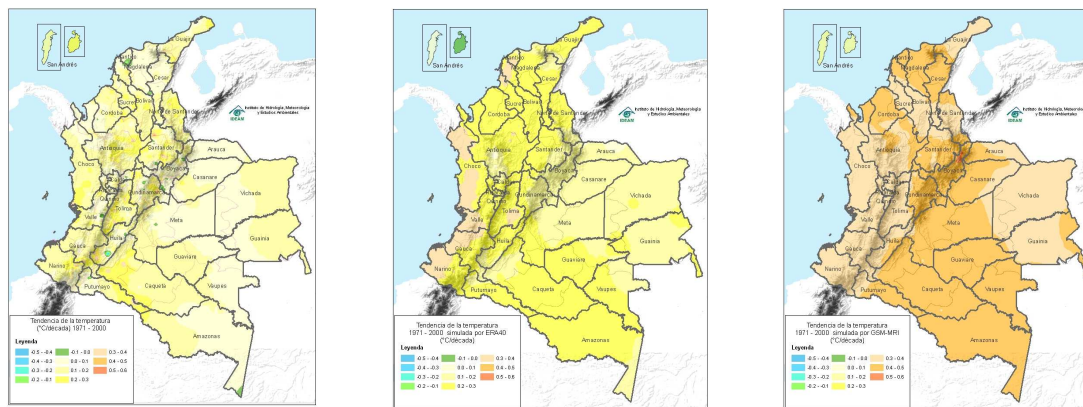


Figura 18. Tendencia de la temperatura del aire para 1971-2000 calculada con las observaciones y los datos de los modelos ERA40 y GSM-MRI

En el caso de la temperatura máxima media para el territorio nacional, se observó una tasa de cambio de 0.11°C/década; mientras que el modelo ERA 40 calculó 0.16°C/década. Para la temperatura media mínima tanto las observaciones como el modelo ERA40 presentaron una tasa promedio de aumento para el país de 0.10°C/década. Extrañamente, el modelo japonés no mostró mayores cambios para estos valores extremos.

### 6.2.2. TENDENCIAS EN PRECIPITACIÓN

En particular los modelos ERA40 y GSM-MRI mostraron habilidades en este sentido ubicando aumentos de precipitación en algunos sectores de las regiones Caribe, y Andina; particularmente hacia Antioquia, Valle y Eje Cafetero, mientras que reducciones hacia Boyacá, Cundinamarca, Tolima y el Huila. El modelo GSM-MRI también consideró aumentos de lluvia en una amplia porción de la Amazonía como lo hicieron las observaciones.

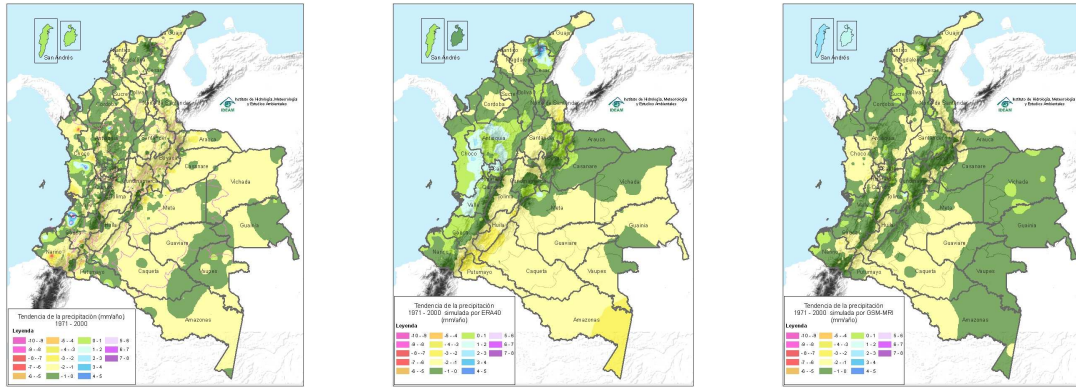


Figura 19. Tendencia de la precipitación para 1971-2000 calculada con las observaciones y los datos de los modelos ERA40 y GSM-MRI

### 6.2.3. TENDENCIAS EN HUMEDAD RELATIVA

En el caso de la humedad relativa, las observaciones realizadas por el IDEAM mostraron en promedio para Colombia, una tasa de cambio de  $\pm 0.1\%/año$  ( $\pm 1\%/década$ ); en cambio los modelos ERA40 y GSM-MRI no presentaron cambios representativos al menos en la primera décima de humedad relativa ( $\pm 0.0 \%/año$ )

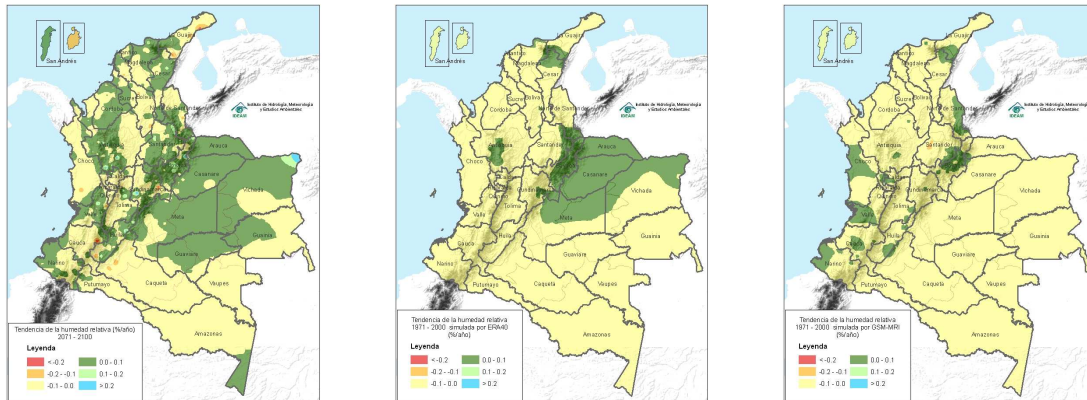


Figura 20. Tendencia de la humedad relativa para 1971-2000 calculada con las observaciones y los datos de los modelos ERA40 y GSM-MRI

Tabla 8. Tendencias de precipitación, temperatura y humedad relativa organizadas de menor a mayor para clima presente 1971-2000 con los registros de las observaciones de IDEAM

DEPARTAMENTO	PRECIPITACION mm/década	DEPARTAMENTO	TEMPERATURA °C/década	DEPARTAMENTO	HUMEDAD %/década
Putumayo	-6.14	Atlantico	0.00	Vaupes	-0.93
Atlantico	-5.88	Amazonas	0.04	Caqueta	-0.76
Arauca	-3.86	Arauca	0.05	Risaralda	-0.32
Guaviare	-3.85	Boyaca	0.06	La Guajira	-0.31
Boyaca	-3.60	Vaupes	0.07	Choco	-0.30
Nariño	-3.11	Magdalena	0.07	Bolivar	-0.27
Cundinamarca	-3.00	Quindio	0.08	Tolima	-0.26
Norte de Santander	-2.48	Meta	0.08	Cauca	-0.21
Meta	-2.31	Risaralda	0.08	Quindio	-0.19
Bolivar	-2.15	Cesar	0.10	Putumayo	-0.14
Huila	-2.11	Caldas	0.10	Caldas	-0.14
Risaralda	-2.06	Huila	0.11	Nariño	-0.08
Casanare	-2.01	Casanare	0.11	Norte de Santander	-0.06
Caqueta	-1.86	Putumayo	0.11	Guainia	-0.06
La Guajira	-1.78	Guaviare	0.11	Bogota	-0.03
Tolima	-1.69	Guainia	0.12	Casanare	0.01
Sucre	-1.64	Vichada	0.12	San Andres	0.04
Santander	-1.38	Bogota	0.13	Cundinamarca	0.06
Magdalena	-1.35	Valle	0.13	Sucre	0.07
Amazonas	-1.17	Nariño	0.13	Antioquia	0.11
Vichada	-0.97	Cundinamarca	0.13	Meta	0.12
Cordoba	-0.34	Cordoba	0.14	Atlantico	0.12
Bogota	-0.23	Sucre	0.14	Amazonas	0.12
Valle	-0.12	Antioquia	0.14	Valle	0.15
Quindio	0.58	La Guajira	0.14	Guaviare	0.20
San Andres	0.67	Bolivar	0.14	Magdalena	0.24
Cesar	1.47	Choco	0.14	Cordoba	0.24
Cauca	1.64	Santander	0.16	Cesar	0.24
Vaupes	1.64	Norte de Santander	0.16	Huila	0.32
Guainia	2.14	Cauca	0.17	Santander	0.34
Antioquia	2.31	San Andres	0.18	Boyaca	0.44
Choco	3.34	Tolima	0.18	Arauca	0.46
Caldas	3.88	Caqueta	0.23	Vichada	0.56

Tabla 9. Tendencias de la temperatura máxima media y de la temperatura mínima media organizadas de menor a mayor para clima presente 1971-2000 con los registros de las observaciones de IDEAM

DEPARTAMENTO	Temperatura Máxima °C/decada	DEPARTAMENTO	Temperatura Mínima °C/decada
Arauca	-0.02	Vichada	-0.17
Quindio	0.01	Magdalena	-0.04
Risaralda	0.04	Boyaca	0.04
Antioquia	0.05	La Guajira	0.05
Meta	0.06	Santander	0.05
Caldas	0.07	Tolima	0.05
Vaupes	0.07	Meta	0.06
Bolivar	0.08	Vaupes	0.06
Magdalena	0.08	Huila	0.07
Boyaca	0.09	Cesar	0.08
Cauca	0.09	Choco	0.08
Putumayo	0.09	Amazonas	0.09
Sucre	0.09	Caqueta	0.09
Amazonas	0.10	Norte de Santander	0.09
Atlantico	0.10	Quindio	0.09
Choco	0.10	Atlantico	0.10
Caqueta	0.11	Guainia	0.10
Cundinamarca	0.11	Antioquia	0.11
Huila	0.11	Caldas	0.11
La Guajira	0.11	Casanare	0.11
Cesar	0.12	Cordoba	0.12
Cordoba	0.12	Putumayo	0.12
Valle	0.12	Cundinamarca	0.13
Casanare	0.13	Guaviare	0.13
Nariño	0.14	Valle	0.13
Tolima	0.15	Nariño	0.14
Norte de Santander	0.16	Sucre	0.14
Guainia	0.17	Risaralda	0.16
Bogota	0.19	Cauca	0.18
San Andres	0.19	Bogota	0.19
Santander	0.19	Bolivar	0.20
Guaviare	0.22	Arauca	0.24
Vichada	0.25	San Andres	0.39



### 6.3. INDICE DE CONFIANZA

La aplicación del índice de confianza permitió determinar las zonas donde los resultados de los modelos pueden ser utilizados con determinados niveles de confianza dependiendo de la evaluación obtenida en clima presente, entre lo simulado y lo observado frente a cuatro índices como son: el coeficiente de correlación lineal entre las observaciones y los resultados de los modelos, la longitud de la información utilizada, la dirección y el valor de tendencia lineal que registraron las observaciones en comparación con lo que simularon los modelos, tal como se explicó en la sección 5.4.

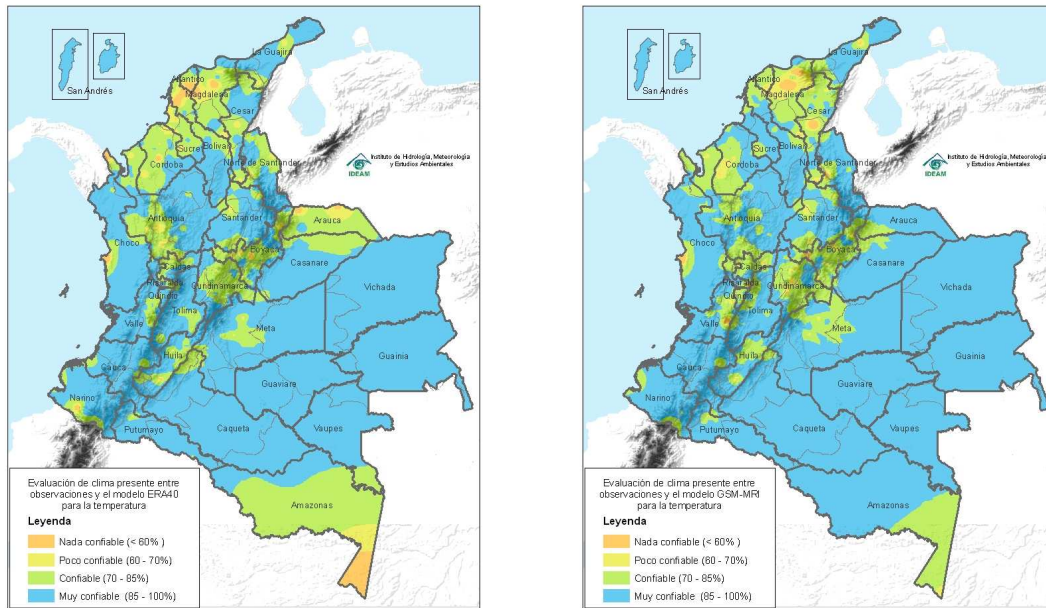


Figura 21. Índice de Confianza de los resultados de los escenarios para temperatura

Posiblemente como se esperaba, la temperatura del aire es la variable meteorológica que mejor simuló los modelos; mientras que, la humedad relativa fue la que menos lo hizo a pesar de que los valores calculados por ellos, para esta variable meteorológica, en promedio, son representativos de cada estación. Por tal razón, los cambios que simuló los modelos para clima futuro son más confiables en temperatura y menos en humedad relativa tal como lo presentan las figuras 21, 22 y 23 para temperatura, precipitación y humedad relativa respectivamente.

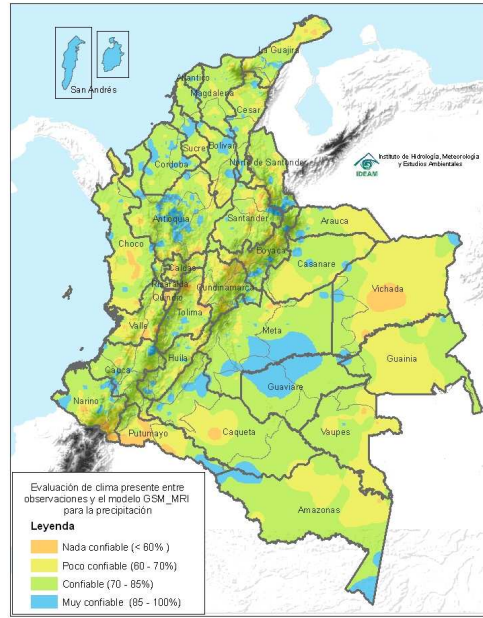
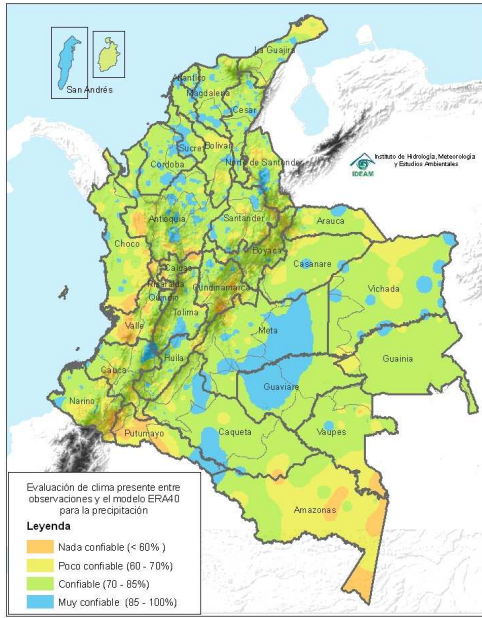


Figura 22. Índice de Confianza de los resultados de los escenarios para precipitación

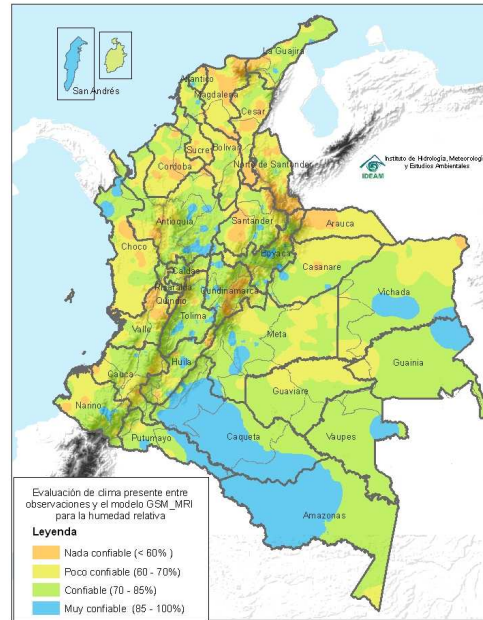
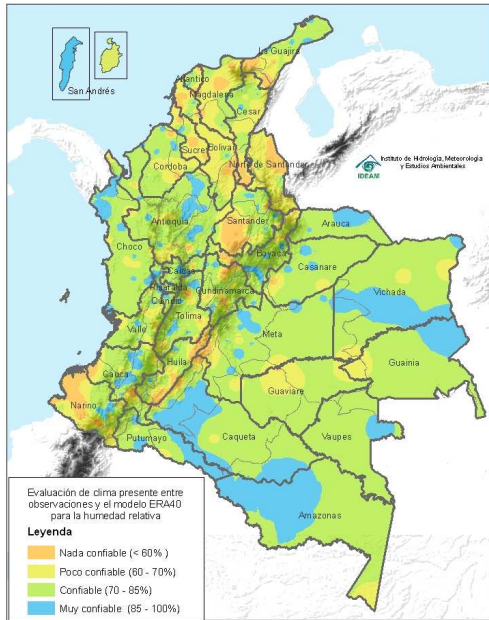


Figura 23. Índice de Confianza de los resultados de los escenarios para humedad relativa

## 6.4. ESCENARIOS DE EXTRAPOLACIÓN DE TENDENCIAS

Con base en la serie de datos obtenida para las estaciones analizadas de precipitación, temperatura y humedad relativa, se obtuvieron las tendencias lineales para el período de referencia 1971-2000 y se extrapolaron sus resultados a lo largo del siglo XXI. Sin embargo, esta metodología tiene la limitante en el sentido de que, el resultado extrapolado, no corresponde a una simulación dinámica no lineal de la atmósfera, pero que sus valores de clima presente reflejan evidencia de cambio climático, del cual, se pueden hacer cálculos para obtener los valores que alcanzarían las variables climatológicas en el clima futuro, si la tendencia se mantiene. Esta señal es importante especialmente para el futuro cercano.

### 6.4.1. EXTRAPOLACION DE TENDENCIAS PARA TEMPERATURA

Con los valores de tendencias obtenidos para la serie 1971-2000, los datos de temperatura media del aire se extrapolaron linealmente para los períodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100; con el fin de obtener una idea de la diferencia de temperatura a lo largo del siglo XXI con respecto al período de referencia 1971-2000, si y solo si, estas tendencias se mantuvieran.

Bajo el escenario de extrapolación de tendencias, el panorama general muestra que la temperatura del aire no superaría el grado de aumento en gran parte del territorio nacional para 2011-2040, excepto en algunos puntos locales de departamentos localizados a lo largo de la región Andina. Para el período 2041-2070, se definen bien las áreas donde la temperatura presentaría aumentos entre 0 y 1°C y entre 1 y 2°C. Mientras que, para el período 2071-2100, la temperatura podría aumentar entre 3 y 4°C en algunos puntos locales de Santander, Tolima, Huila y Cundinamarca a pesar de que la extrapolación de tendencias marca aumentos generalizados entre 2 y 3°C en gran parte del territorio nacional.

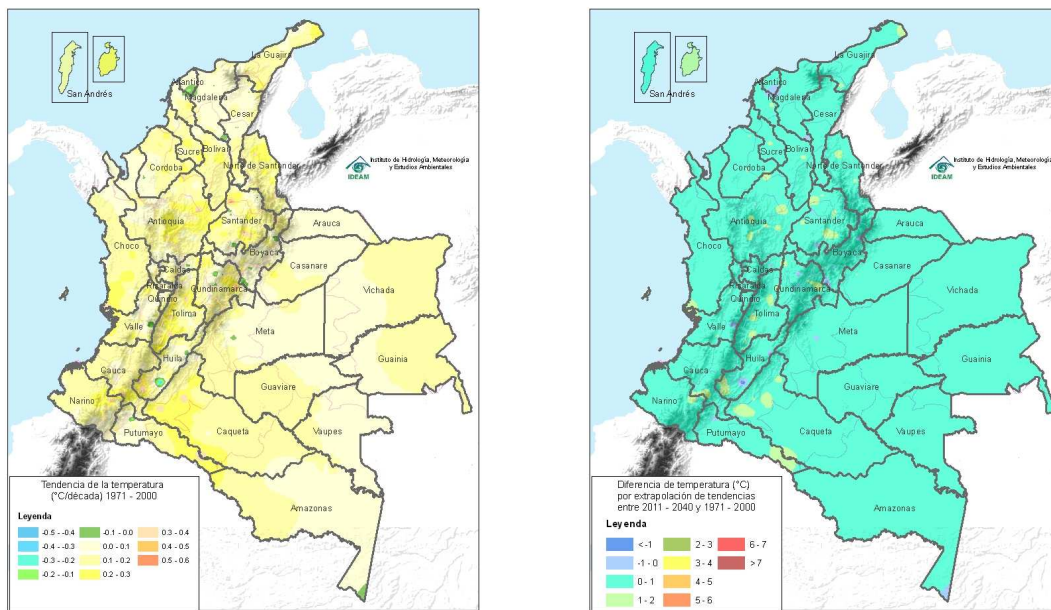


Figura 24. Tendencia (1971-2000) y escenario de extrapolación de tendencias (2011-2040) para temperatura media

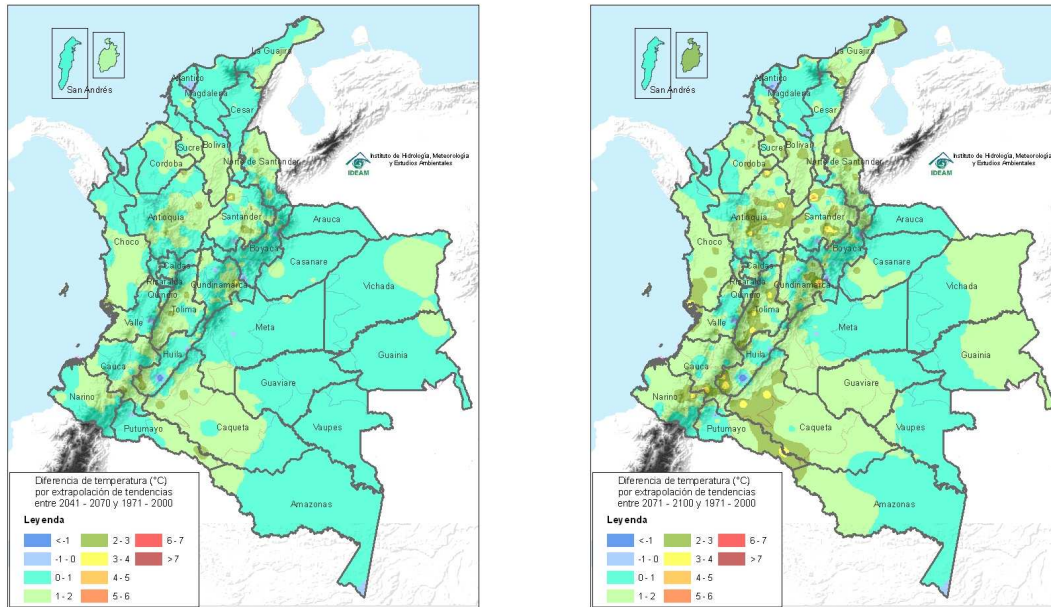


Figura 25. Escenario de extrapolación de tendencias para (2041-2070) y (2071-2100) para la temperatura media

Tabla 10. Aumento o disminución de temperatura media para el siglo XXI respecto al periodo de referencia 1971-2000 por extrapolación de tendencias

DEPARTAMENTO	Diferencia de la temperatura en °C (2011-2040)- (1971-2000)	Diferencia de la temperatura en °C (2041-2070)- (1971-2000)	Diferencia de la temperatura en °C (2071-2100)- (1971-2000)
Amazonas	0.2	0.3	0.4
Antioquia	0.6	1.0	1.4
Arauca	0.2	0.3	0.5
Atlántico	0.0	0.0	0.0
Bogotá	0.5	0.9	1.2
Bolívar	0.6	1.0	1.4
Boyacá	0.2	0.4	0.6
Caldas	0.4	0.7	1.0
Caquetá	0.9	1.6	2.3
Casanare	0.4	0.8	1.1
Cauca	0.7	1.2	1.7
Cesar	0.4	0.7	1.0
Chocó	0.6	1.0	1.4
Córdoba	0.5	1.0	1.4
Cundinamarca	0.5	0.9	1.3
Guainía	0.5	0.9	1.2
Guaviare	0.5	0.8	1.1
Huila	0.4	0.7	1.1
La Guajira	0.6	1.0	1.4
Magdalena	0.3	0.5	0.7
Meta	0.3	0.6	0.8
Nariño	0.5	0.9	1.3
Norte de Santander	0.7	1.1	1.6
Putumayo	0.4	0.8	1.1
Quindío	0.3	0.5	0.8
Risaralda	0.3	0.6	0.8
San Andrés	0.7	1.2	1.8
Santander	0.6	1.1	1.6
Sucre	0.5	1.0	1.4
Tolima	0.7	1.3	1.8
Valle	0.5	0.9	1.2
Vaupés	0.3	0.5	0.6
Vichada	0.5	0.9	1.2

De la misma forma se realizaron los escenarios de extrapolación de tendencias para la temperatura mínima y máxima con los resultados que se observan en las Figs. 26 y 27 y la Tabla 11.

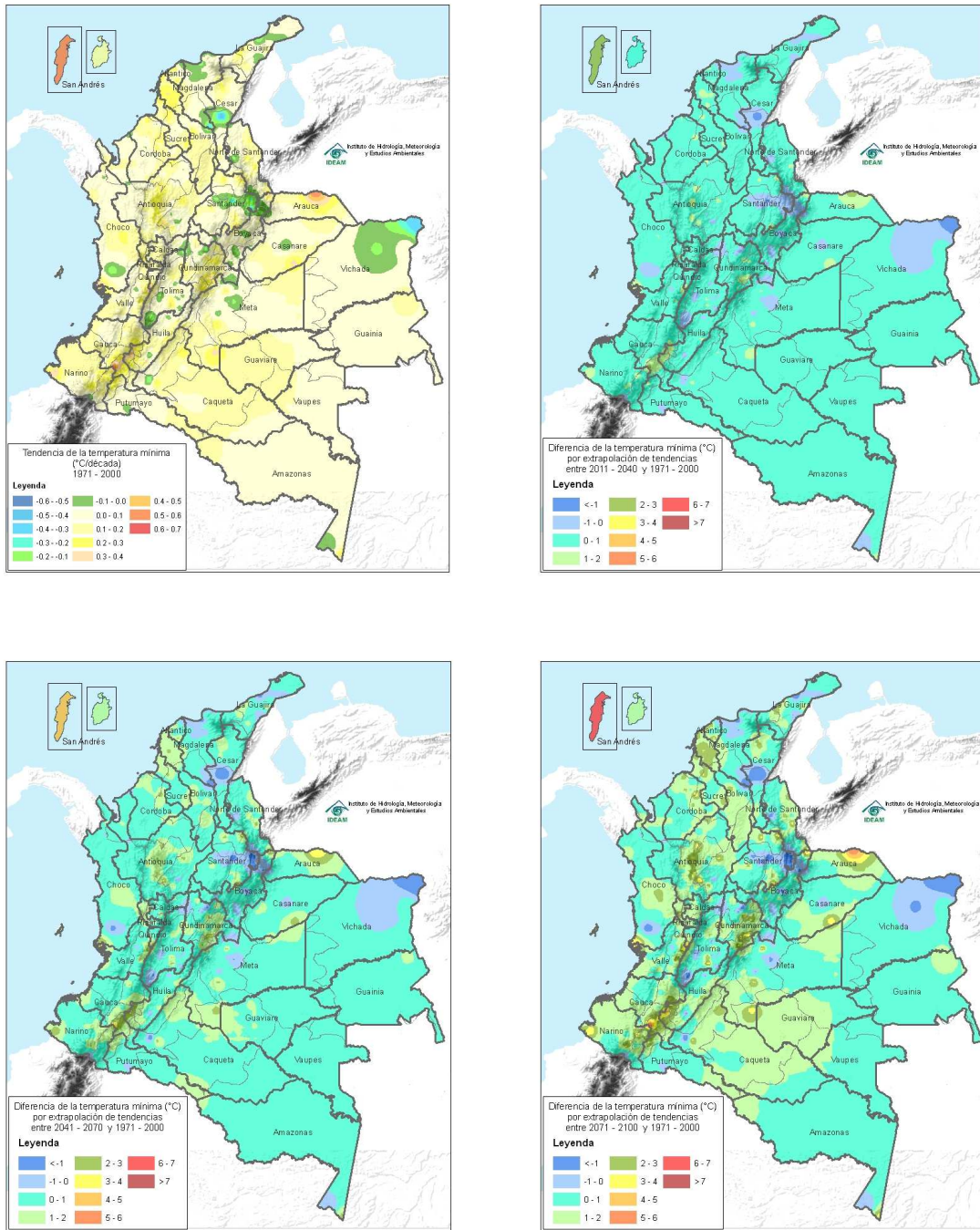


Figura 26. Tendencia (1971-2000) y escenario de extrapolación de tendencias (2011-2100) para temperatura mínima media

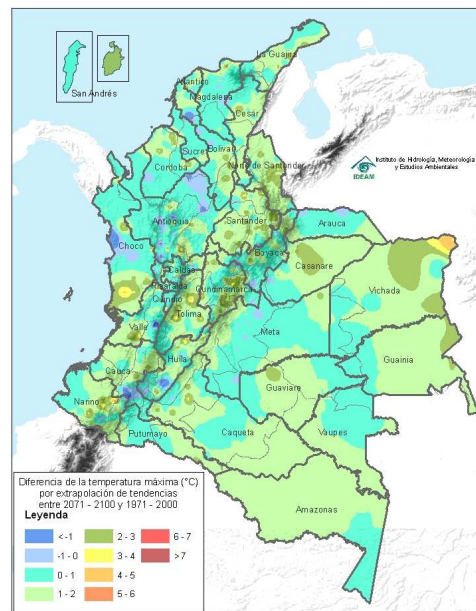
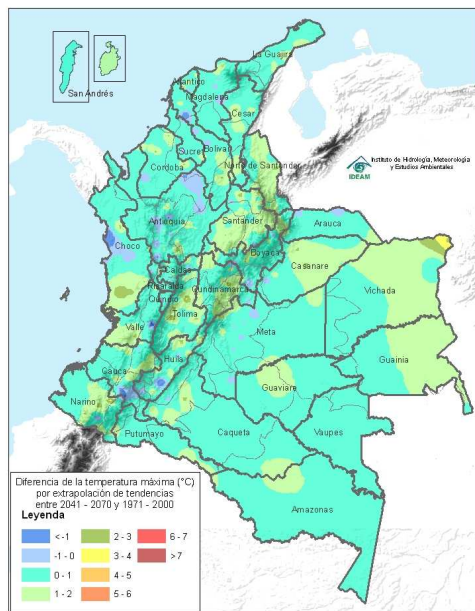
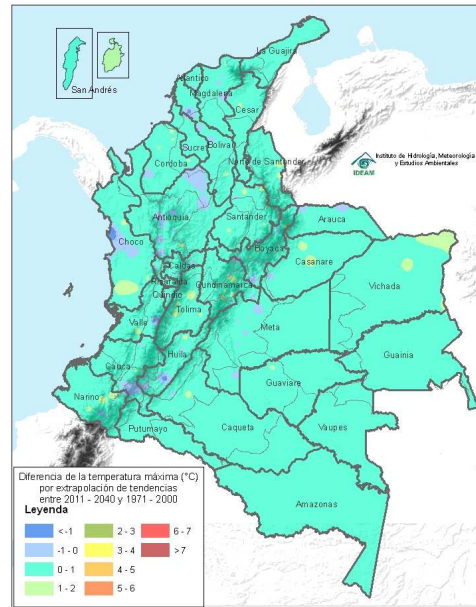
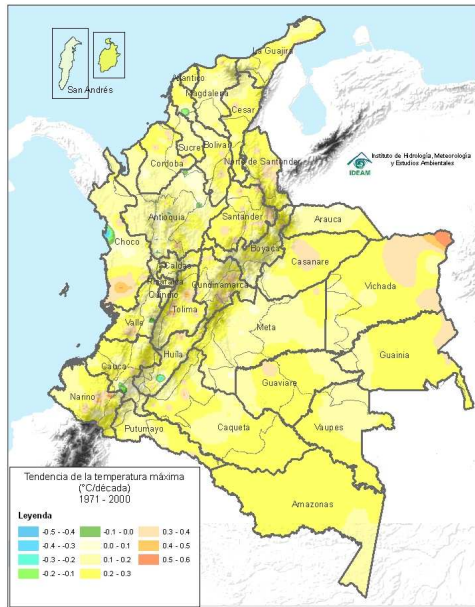


Figura 27. Tendencia (1971-2000) y escenario de extrapolación de tendencias (2011-2100) para temperatura máxima media

Tabla 11. Aumento y/o disminución de temperatura máxima media y de la temperatura mínima media para el siglo XXI respecto al período de referencia 1971-2000 por extrapolación de tendencias

Departamento	DIFERENCIA DE LA TEMPERATURA MÍNIMA			DIFERENCIA DE LA TEMPERATURA MÁXIMA		
	(2011.2040) - (1971.2000)	(2041.2070) - (1971.2000)	(2071.2100) - (1971.2000)	(2011.2040) - (1971.2000)	(2041.2070) - (1971.2000)	(2071.2100) - (1971.2000)
Amazonas	0.4	0.6	0.9	0.4	0.7	0.9
Antioquia	0.4	0.8	1.1	0.2	0.4	0.5
Arauca	1.0	1.7	2.4	-0.1	-0.2	-0.2
Atlántico	0.4	0.7	1.0	0.4	0.7	1.0
Bogotá	0.8	1.3	1.9	0.8	1.4	1.9
Bolívar	0.8	1.4	2.0	0.3	0.6	0.8
Boyacá	0.2	0.3	0.4	0.4	0.6	0.9
Caldas	0.4	0.8	1.1	0.3	0.5	0.7
Caquetá	0.4	0.7	0.9	0.5	0.8	1.1
Casanare	0.4	0.8	1.1	0.5	0.9	1.3
Cauca	0.7	1.2	1.8	0.4	0.7	0.9
Cesar	0.3	0.5	0.8	0.5	0.8	1.2
Chocó	0.3	0.5	0.8	0.4	0.7	1.0
Córdoba	0.5	0.8	1.2	0.5	0.9	1.2
Cundinamarca	0.5	0.9	1.3	0.4	0.8	1.1
Guainía	0.4	0.7	1.0	0.7	1.2	1.6
Guaviare	0.5	0.9	1.2	0.9	1.5	2.2
Huila	0.3	0.5	0.7	0.4	0.7	1.1
La Guajira	0.2	0.4	0.5	0.4	0.8	1.1
Magdalena	-0.1	-0.3	-0.4	0.3	0.6	0.8
Meta	0.3	0.4	0.6	0.2	0.4	0.6
Nariño	0.6	1.0	1.4	0.5	1.0	1.3
Norte de Santander	0.4	0.7	0.9	0.6	1.1	1.6
Putumayo	0.5	0.8	1.2	0.3	0.6	0.9
Quindío	0.4	0.6	0.9	0.1	0.1	0.1
Risaralda	0.6	1.1	1.6	0.2	0.3	0.4
San Andrés	1.5	2.7	3.8	0.8	1.4	1.9
Santander	0.2	0.3	0.5	0.7	1.3	1.8
Sucre	0.6	1.0	1.4	0.3	0.6	0.9
Tolima	0.2	0.3	0.5	0.6	1.1	1.5
Valle	0.5	0.9	1.3	0.5	0.8	1.2
Vaupés	0.2	0.4	0.6	0.3	0.5	0.7
Vichada	-0.7	-1.2	-1.7	1.0	1.7	2.5

#### 6.4.2. EXTRAPOLACION DE TENDENCIAS PARA PRECIPITACIÓN

Con los valores de tendencias obtenidos para la serie 1971-2000, los datos de precipitación se extrapolaron linealmente para los períodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100; con el fin de obtener una idea del cambio de los volúmenes de precipitación a lo largo del siglo XXI con respecto a 1971-2000, si la tendencia se mantuviera.

En particular, a lo largo del siglo XXI, se observaría que los cambios anuales de lluvia se mantendrían entre un 80 y 100% para los lugares donde la precipitación tiende a reducirse con respecto al período de referencia 1971-2000 y dentro de un 100 y 120% para los lugares donde esta variable meteorológica tiende al aumento.

No obstante, las reducciones más significativas de precipitación, de acuerdo con el escenario de extrapolación de tendencias, se apreciarían en sectores del oeste de Arauca, norte de Vichada, sectores del sur de Tolima y oriente de Nariño, especialmente hacia finales del siglo XXI (2071-2100). El aumento más apreciable en las lluvias, se ubica en el piedemonte amazónico en límites entre los departamentos de Caquetá y Putumayo.

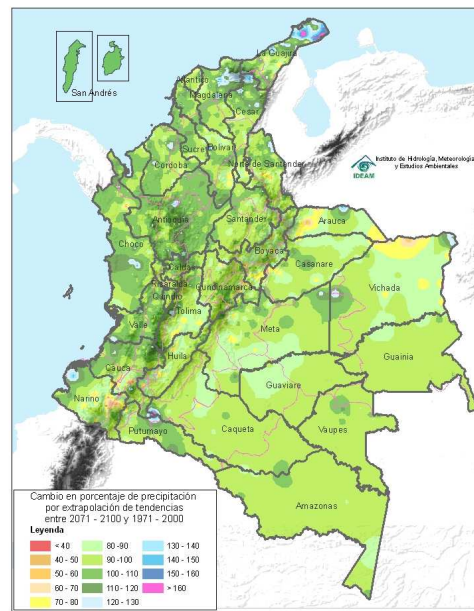
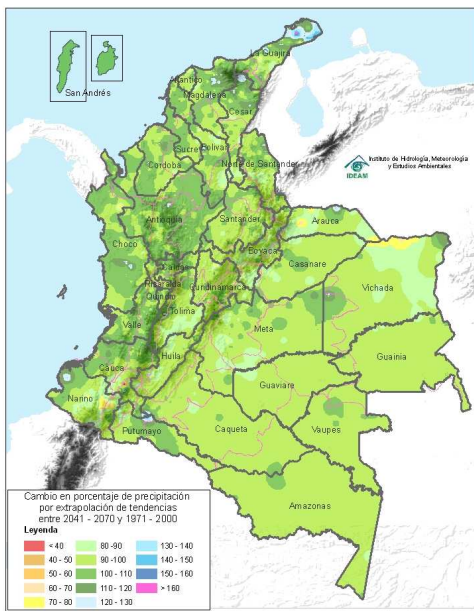
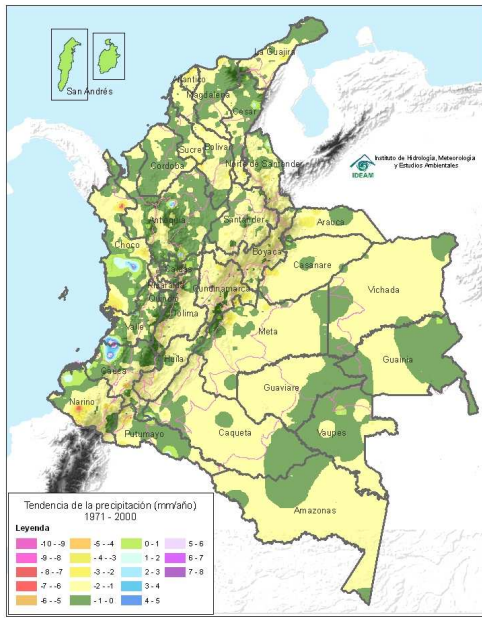


Figura 28. Tendencia (1971-2000) y escenario de extrapolación de tendencias (2011-2100) para la precipitación



Tabla 12. Cambio en % de la precipitación a lo largo del siglo XXI respecto al período de referencia 1971-2000 por extrapolación de tendencias

DEPARTAMENTO	Cambio en % de la precipitación (2011-2040)- (1971-2000)	Cambio en % de la precipitación (2041-2070)- (1971-2000)	Cambio en % de la precipitación (2071-2100)- (1971-2000)
Amazonas	98	97	96
Antioquia	102	104	106
Arauca	95	91	87
Atlántico	97	95	93
Bogotá	101	101	102
Bolívar	100	101	101
Boyacá	95	91	88
Caldas	101	102	103
Caquetá	97	95	93
Casanare	97	95	92
Cauca	100	100	100
Cesar	102	103	104
Chocó	101	102	103
Córdoba	100	100	100
Cundinamarca	98	96	95
Guainía	98	97	96
Guaviare	96	92	89
Huila	97	94	92
La Guajira	103	106	108
Magdalena	102	103	105
Meta	98	96	95
Nariño	95	91	87
Norte de Santander	98	97	95
Putumayo	95	92	88
Quindío	100	100	100
Risaralda	99	98	97
San Andrés	99	98	97
Santander	99	96	97
Sucre	101	101	102
Tolima	97	95	93
Valle	101	102	103
Vaupés	100	99	99
Vichada	97	95	93
Promedio	99	99	98
Mínimo	95	91	87
Máximo	103	106	108

#### 6.4.3. EXTRAPOLACION DE TENDENCIAS PARA HUMEDAD RELATIVA

Para el caso de la humedad relativa, los escenarios de extrapolación de tendencias para el siglo XXI, muestran que para el período 2011-2040, los cambios no serán mayores respecto al clima de referencia 1971-2000.

Pero para finales del siglo XXI, las disminuciones más notables en la humedad relativa, se presentarán en puntos locales de La Guajira, Bolívar, oeste de los departamentos de Tolima, Cundinamarca y Nariño, así como al oriente de Cauca. Para otros sectores del país donde se manifiesta dicha reducción de la humedad relativa respecto al período de referencia 1971-2000, los resultados pueden ser dudosos en el sentido de no se tuvo información suficiente para llegar a soluciones más confiables.

El aumento de humedad relativa más notorio a lo largo del siglo XXI, se presentaría al noreste de Vichada, visto a través de este tipo de análisis.

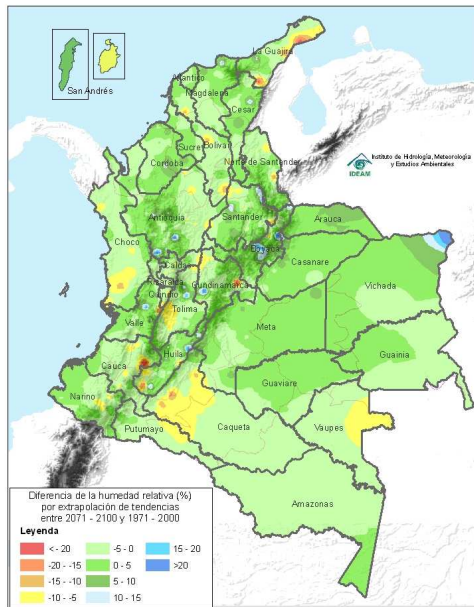
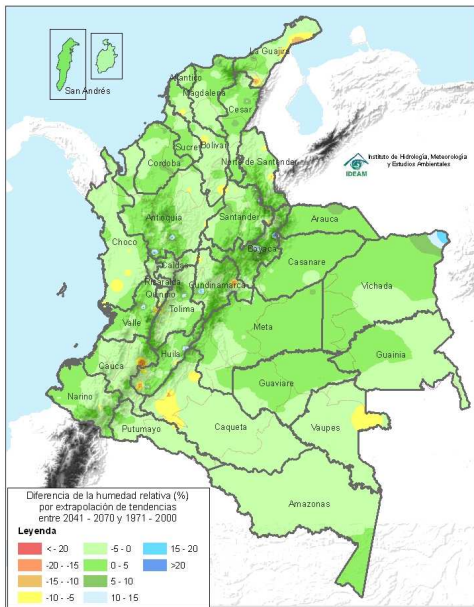
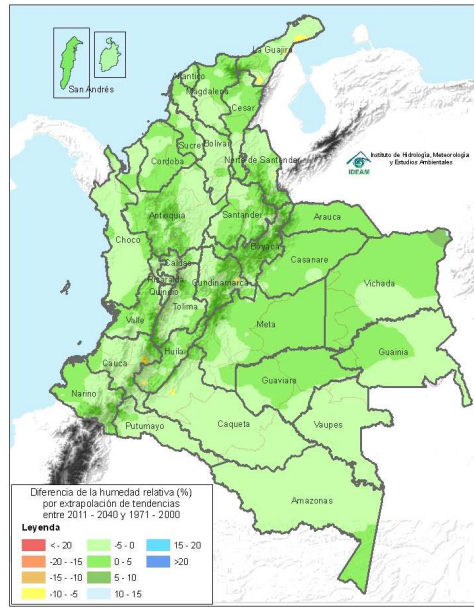
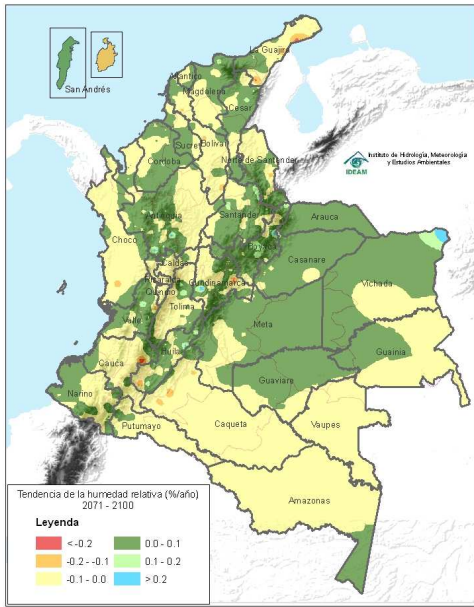


Figura 29. Tendencia (1971-2000) y escenario de extrapolación de tendencias (2011-2040) (2041-2070) y (2071-2100) para la humedad relativa

Tabla 13. Reducciones y/o aumentos en % de la humedad relativa a lo largo del siglo XXI respecto al período de referencia 1971-2000 por extrapolación de tendencias

DIFERENCIA DE HUMEDAD RELATIVA EN % CON RESPECTO A CLIMA PRESENTE 1971-2000 (POR EXTRAPOLACIÓN DE TENDENCIAS)			
Departamento	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Amazonas	0.5	0.8	1.2
Antioquia	0.4	0.8	1.1
Arauca	1.9	3.2	4.6
Atlántico	0.5	0.8	1.2
Bogotá	-0.1	-0.2	-0.3
Bolívar	-1.1	-1.9	-2.7
Boyacá	1.7	3.1	4.3
Caldas	-0.6	-1.0	-1.4
Caquetá	-3.0	-5.3	-7.5
Casanare	0.1	0.1	0.1
Cauca	-0.8	-1.4	-2.0
Cesar	1.0	1.7	2.4
Chocó	-1.2	-2.1	-3.0
Córdoba	1.0	1.7	2.4
Cundinamarca	0.2	0.4	0.6
Guainía	-0.2	-0.4	-0.6
Guaviare	0.8	1.4	2.0
Huila	1.3	2.2	3.1
La Guajira	-1.3	-2.2	-3.1
Magdalena	0.9	1.6	2.3
Meta	0.5	0.8	1.1
Norte de Santander	-0.3	-0.5	-0.8
Nariño	-0.3	-0.4	-0.6
Putumayo	-0.6	-1.0	-1.4
Quindío	-0.8	-1.3	-1.9
Risaralda	-1.3	-2.2	-3.1
San Andrés	0.1	0.2	0.3
Santander	1.3	2.4	3.3
Sucre	0.3	0.5	0.7
Tolima	-1.0	-1.8	-2.6
Valle	0.6	1.0	1.5
Vaupés	-3.7	-6.5	-9.2
Vichada	2.2	3.9	5.6

## 6.5. ESCENARIOS MULTIMODELO DE CAMBIO CLIMÁTICO (PRECIS Y GSM-MRI)

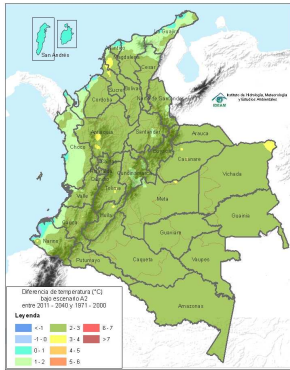
Con el fin de reducir incertidumbres del clima futuro 2011-2100 para la temperatura, la precipitación y la humedad relativa en Colombia, varios escenarios con diferentes modelos y condiciones iniciales fueron corridos (Ver Sección 5.2). En particular, para 2011-2070, se obtuvieron resultados para los escenarios de emisión A2 y B2 sin sulfatos junto con el escenario A1B con sulfatos, mientras que para 2071-2100 además de los mencionados se tienen resultados de los escenarios A2 y B2 con sulfatos.

El análisis para el caso de CCSM-WRF se considera por separado debido a que el método de la corrida no se realizó para series largas de tiempo sino para cada 10 años debido a su consumo de proceso y almacenamiento, pero sus resultados sirvieron para al menos tener un enfoque comparativo del cambio climático simulado con PRECIS y GSM-MRI.

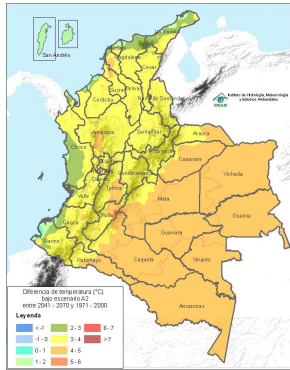
Como nota adicional, hay que tener en cuenta que, a pesar de que los resultados se dan a nivel de departamento, el lector debe completar la comprensión de los mismos con los mapas debido a la alta variabilidad espacial de las variables meteorológicas que se presenta en Colombia y, por supuesto, en cada departamento. De aquí en adelante, se referirá a clima futuro los períodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 y, clima presente, 1971-2000, a menos de que alguna explicación indique otra situación

**ENSAMBLE MULTI-EXPERIMENTO PARA TEMPERATURA MEDIA (2011-2100) vs. (1971-2000) BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO USANDO EL MODELO PRECIS**

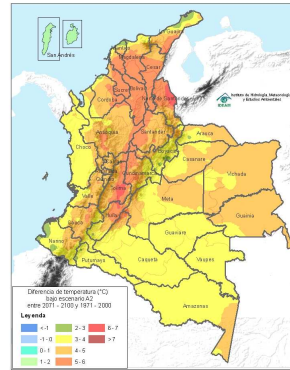
**A2 (2011-2040) vs. (1971-2000)**



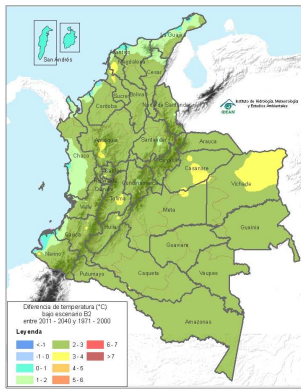
**A2 (2041-2070) vs. (1971-2000)**



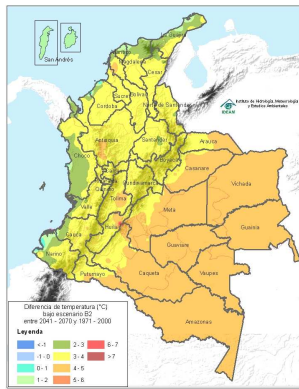
**A2 (2071-2100) vs. (1971-2000)**



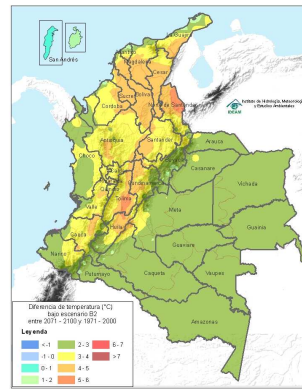
**B2 (2011-2040) vs. (1971-2000)**



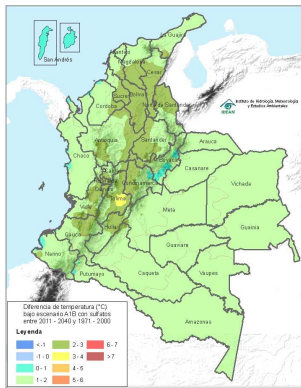
**B2 (2041-2070) vs. (1971-2000)**



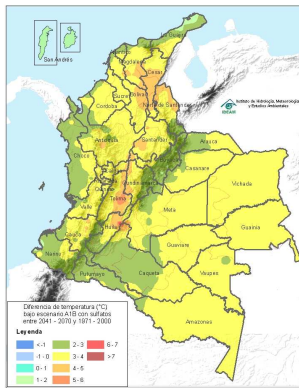
**B2 (2071-2100) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2011-2040) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2041-2070) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2071-2100) vs. (1971-2000)**

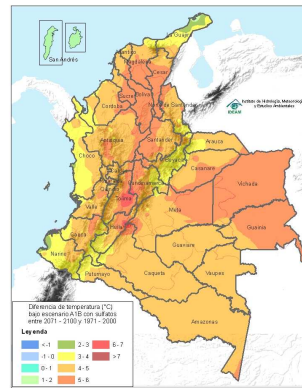
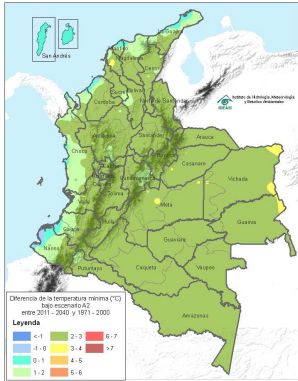


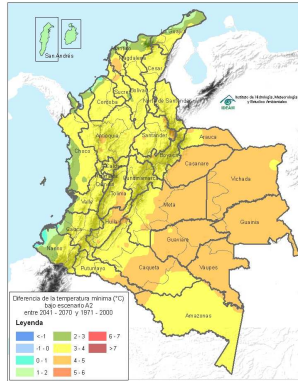
Figura 30. Diferencia de la temperatura media de clima futuro con respecto a clima presente bajo distintos escenarios de cambio climático para el siglo XXI (PRECIS) – (S) indica que el escenario tuvo en cuenta el efecto de los sulfatos en la atmósfera

**ENSAMBLE MULTI-EXPERIMENTO PARA TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA (2011-2100) vs. (1971-2000) BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO USANDO EL MODELO PRECIS**

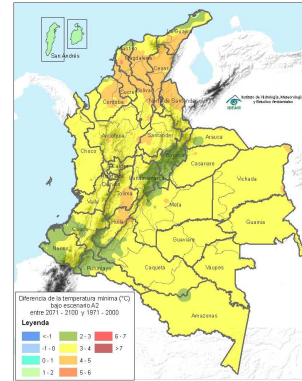
**A2 (2011-2040) vs. (1971-2000)**



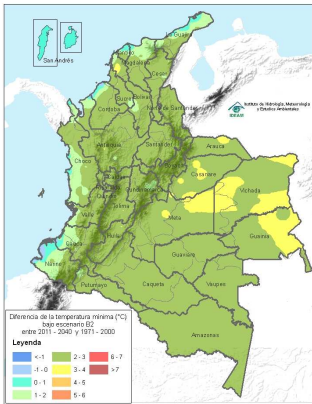
**A2 (2041-2070) vs. (1971-2000)**



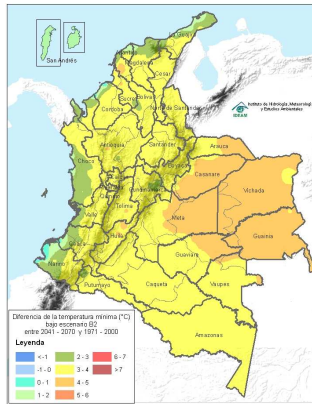
**A2 (2071-2100) vs. (1971-2000)**



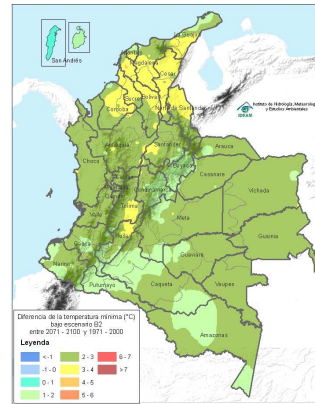
**B2 (2011-2040) vs. (1971-2000)**



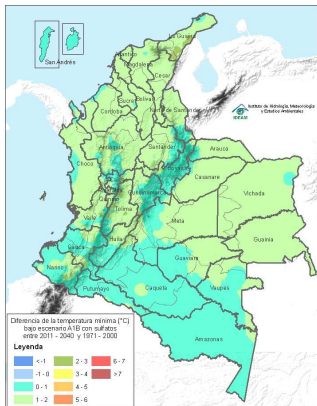
**B2 (2041-2070) vs. (1971-2000)**



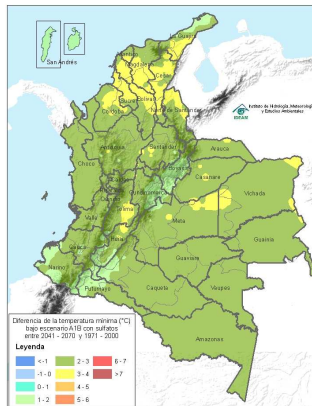
**B2 (2071-2100) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2011-2040) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2041-2070) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2071-2100) vs. (1971-2000)**

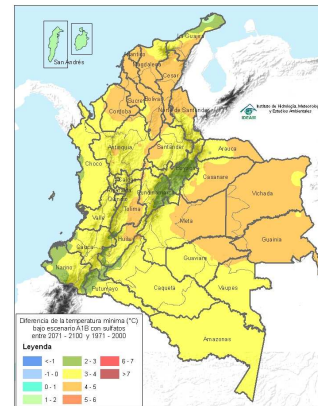
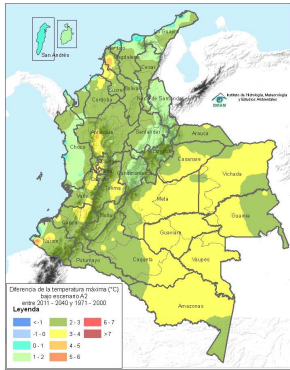


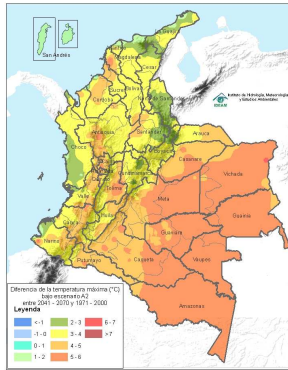
Figura 31. Diferencia de la temperatura mínima media de clima futuro con respecto a clima presente bajo distintos escenarios de cambio climático para el siglo XXI (PRECIS) – (S) indica que el escenario tuvo en cuenta el efecto de los sulfatos en la atmósfera

**ENSAMBLE MULTI-EXPERIMENTO PARA TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA (2011-2100) vs. (1971-2000) BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO USANDO EL MODELO PRECIS**

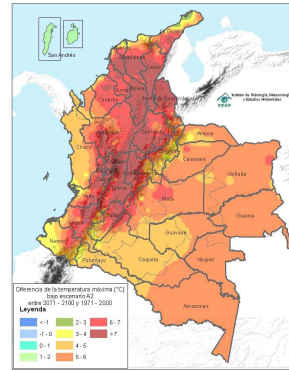
**A2 (2011-2040) vs. (1971-2000)**



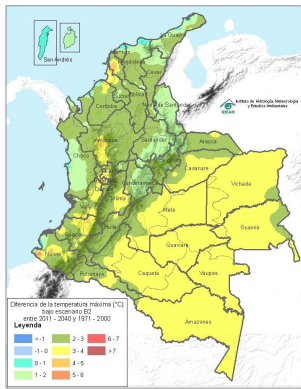
**A2 (2041-2070) vs. (1971-2000)**



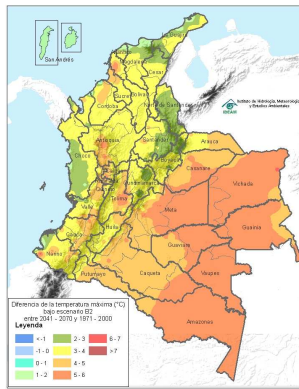
**A2 (2071-2100) vs. (1971-2000)**



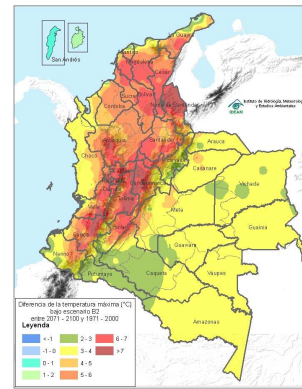
**B2 (2011-2040) vs. (1971-2000)**



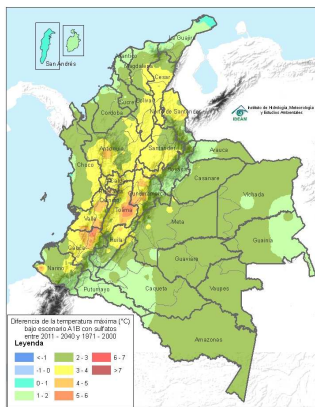
**B2 (2041-2070) vs. (1971-2000)**



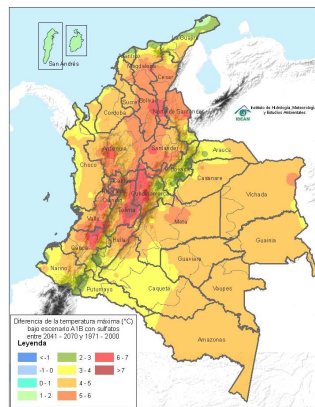
**B2 (2071-2100) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2011-2040) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2041-2070) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2071-2100) vs. (1971-2000)**

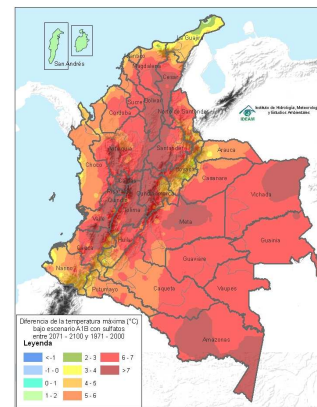


Figura 32. Diferencia de la temperatura máxima media de clima futuro con respecto a clima presente bajo distintos escenarios de cambio climático para el siglo XXI (PRECIS) – (S) indica que el escenario tuvo en cuenta el efecto de los sulfatos en la atmósfera

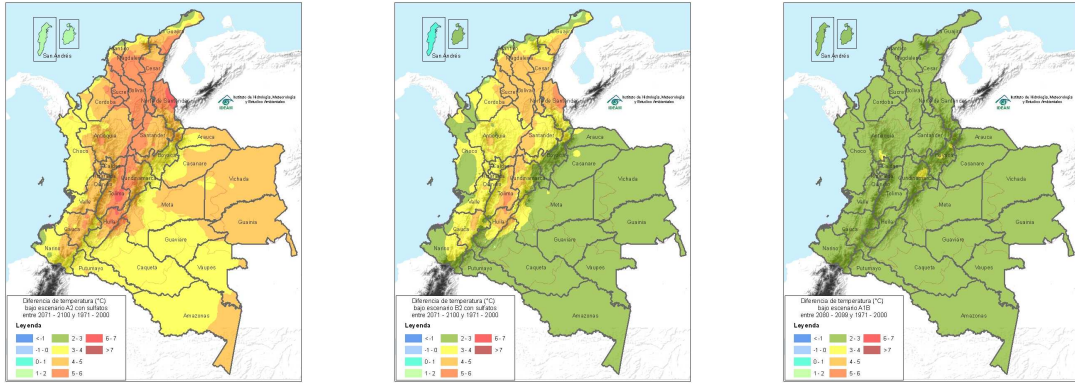


Figura 33. Ensamble multi-modelo sobre diferencia de temperatura bajo escenarios A2 con sulfatos (PRECIS), B2 con sulfatos (PRECIS) y A1B (GSM-MRI) para finales del siglo XXI

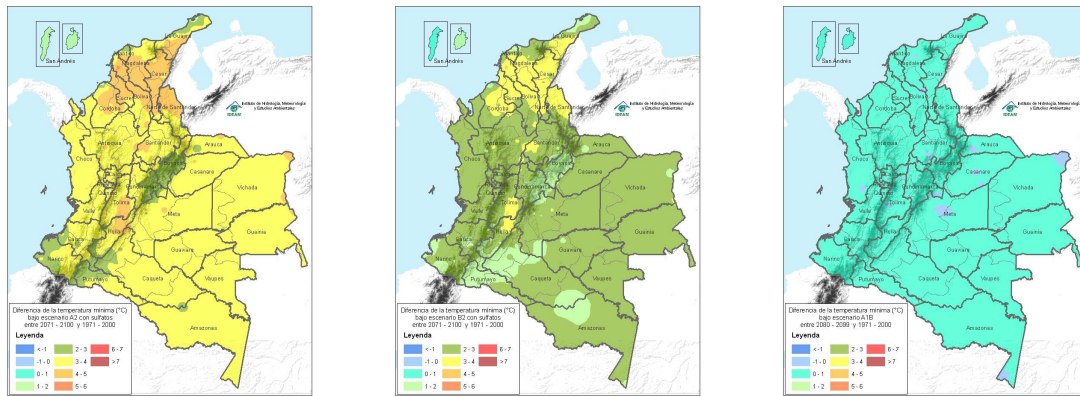


Figura 34. Ensamble multi-modelo sobre diferencia de temperatura mínima media bajo escenarios A2 con sulfatos (PRECIS), B2 con sulfatos (PRECIS) y A1B (GSM-MRI) para finales del siglo XXI

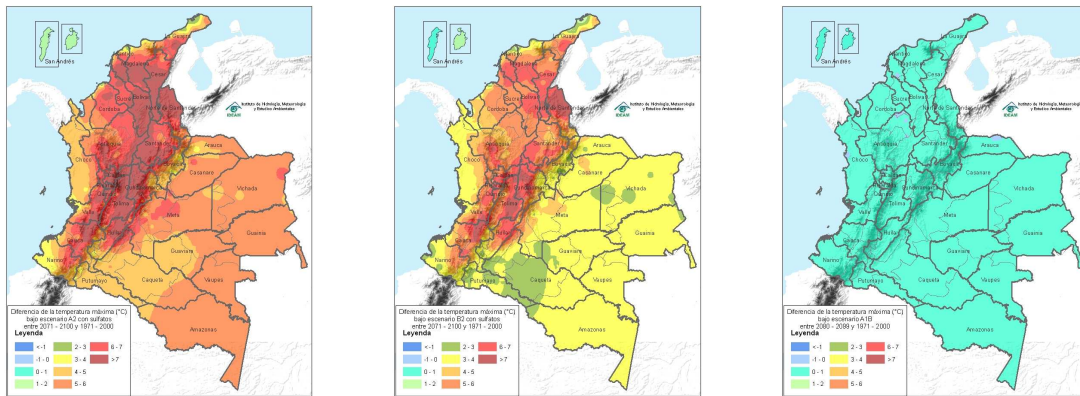
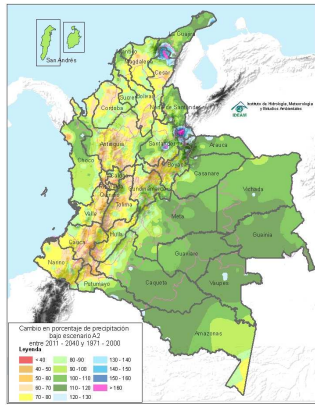


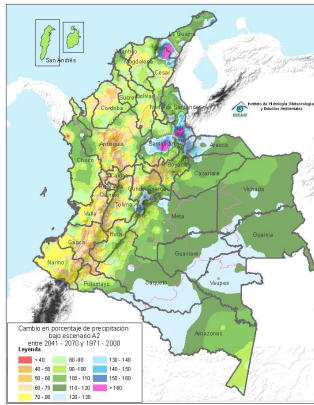
Figura 35. Ensamble multi-modelo sobre diferencia de temperatura máxima media bajo escenarios A2 con sulfatos (PRECIS), B2 con sulfatos (PRECIS) y A1B (GSM-MRI) para finales del siglo XXI

**ENSAMBLE MULTI-EXPERIMENTO DE PRECIPITACIÓN (2011-2100) vs. (1971-2000) BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO USANDO EL MODELO PRECIS**

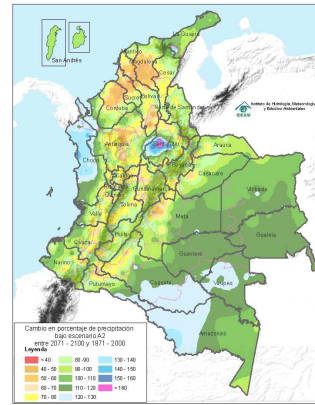
**A2 (2011-2040) vs. (1971-2000)**



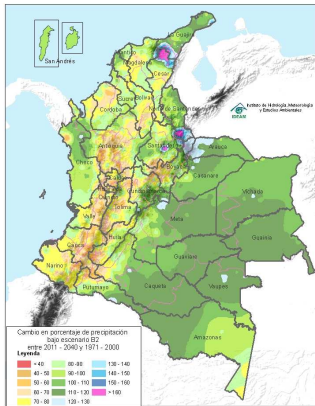
**A2 (2041-2070) vs. (1971-2000)**



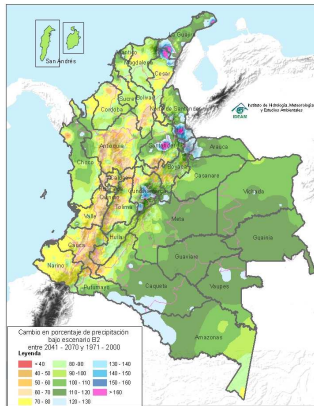
**A2 (2071-2100) vs. (1971-2000)**



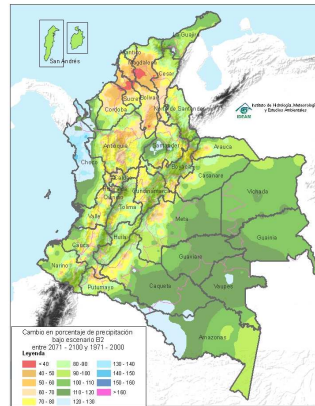
**B2 (2011-2040) vs. (1971-2000)**



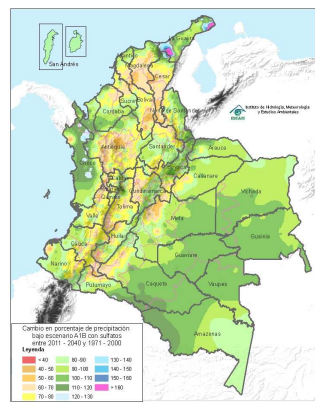
**B2 (2041-2070) vs. (1971-2000)**



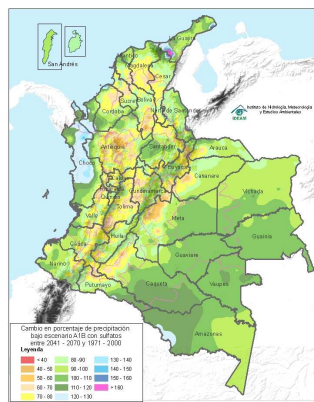
**B2 (2071-2100) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2011-2040) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2041-2070) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2071-2100) vs. (1971-2000)**

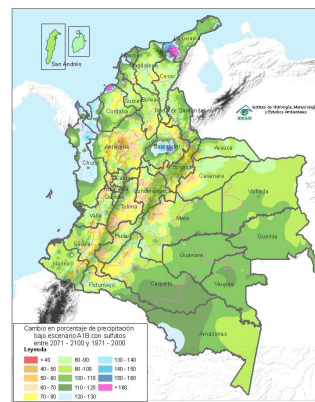


Figura 36. Cambio en % de la precipitación bajo distintos escenarios de cambio climático para el siglo XXI (PRECIS) – (S) indica que el escenario tuvo en cuenta el efecto de los sulfatos en la atmósfera



**ENSAMBLE MULTI-MODELO DE PRECIPITACIÓN PARA FINALES DE SIGLO XXI BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

**A2(S) (2011-2040) vs. (1971-2000)**

**B2(S) (2041-2070) vs. (1971-2000)**

**A1B (2071-2100) vs. (1971-2000)**

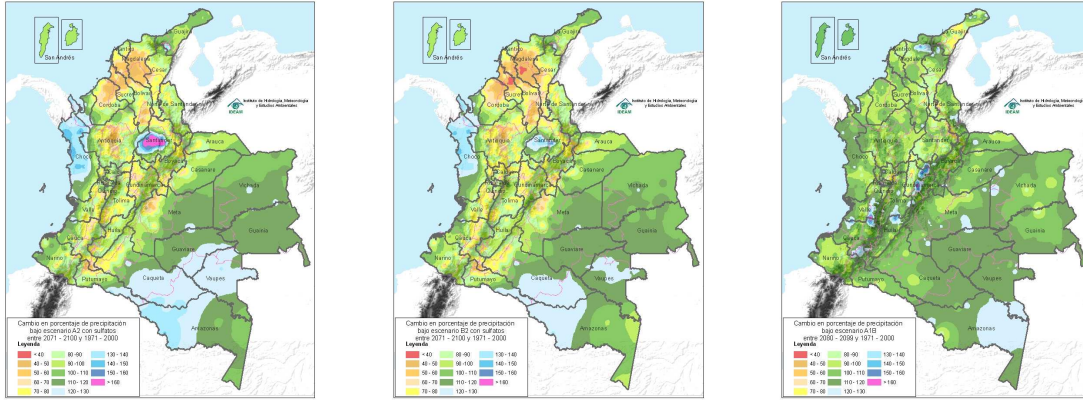


Figura 37. Ensamble multi-modelo sobre cambio en % de la precipitación bajo escenarios A2 con sulfatos (PRECIS), B2 con sulfatos (PRECIS) y A1B (GSM-MRI) para finales del siglo XXI

**ENSAMBLE MULTI-MODELO PARA HUMEDAD RELATIVA A FINALES DE SIGLO XXI BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

**A2(S) (2011-2040) vs. (1971-2000)**

**B2(S) (2041-2070) vs. (1971-2000)**

**A1B (2071-2100) vs. (1971-2000)**

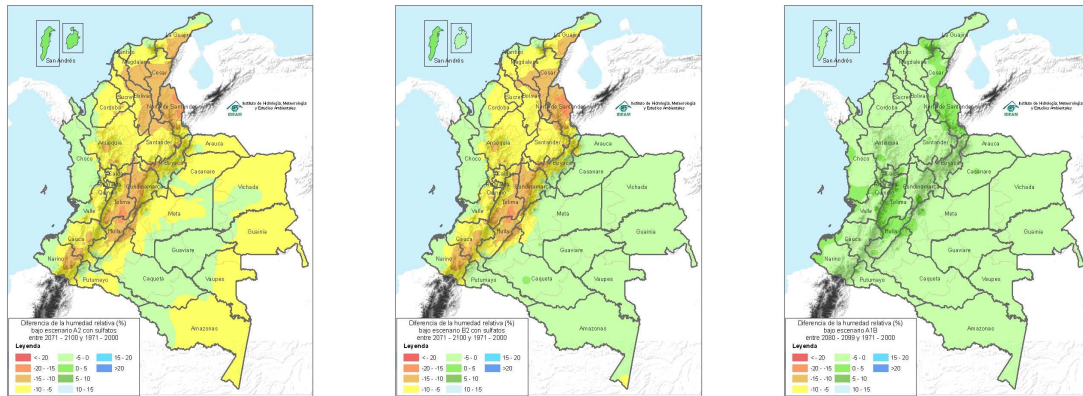
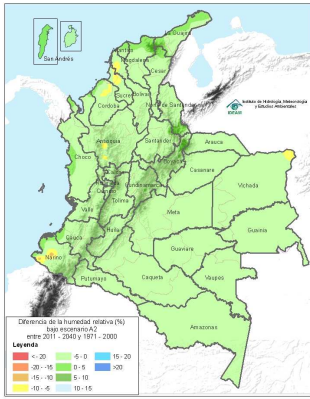


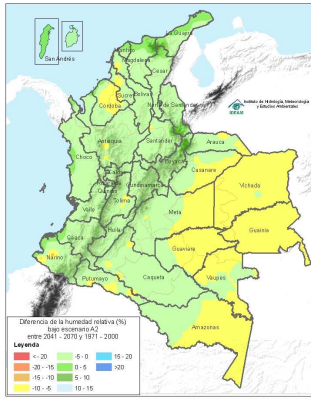
Figura 38. Ensamble multi-modelo sobre diferencia en % de la humedad relativa bajo escenarios A2 con sulfatos (PRECIS), B2 con sulfatos (PRECIS) y A1B (GSM-MRI) para finales del siglo XXI

**ENSAMBLE MULTI-EXPERIMENTO PARA HUMEDAD RELATIVA (2011-2100) vs. (1971-2000) BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO USANDO EL MODELO PRECIS**

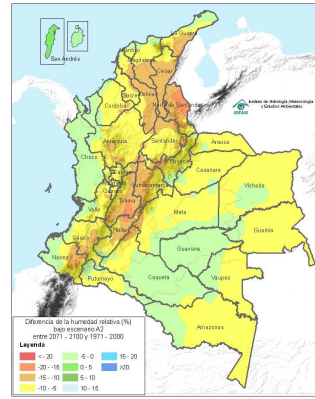
**A2 (2011-2040) vs. (1971-2000)**



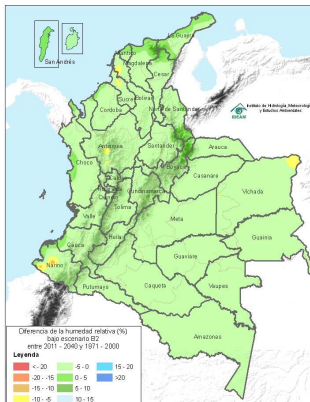
**A2 (2041-2070) vs. (1971-2000)**



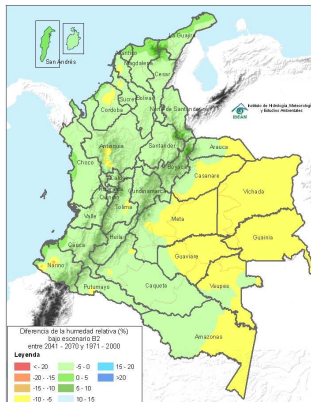
**A2 (2071-2100) vs. (1971-2000)**



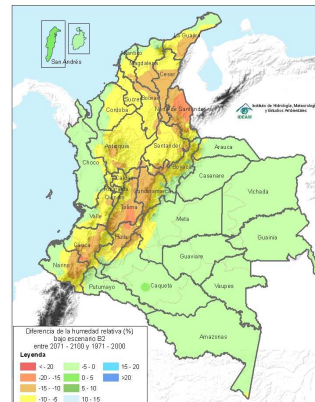
**B2 (2011-2040) vs. (1971-2000)**



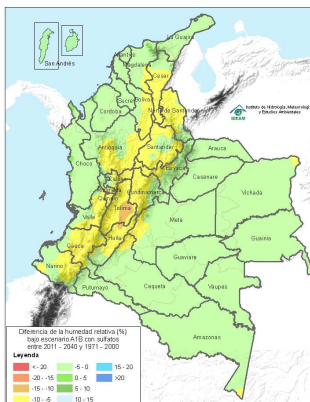
**B2 (2041-2070) vs. (1971-2000)**



**B2 (2071-2100) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2011-2040) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2041-2070) vs. (1971-2000)**



**A1B(S) (2071-2100) vs. (1971-2000)**

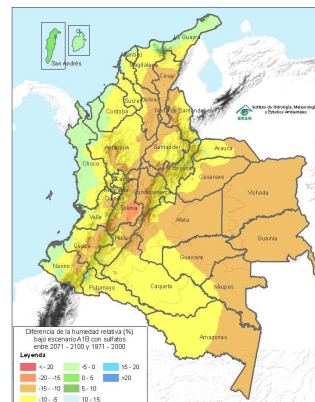
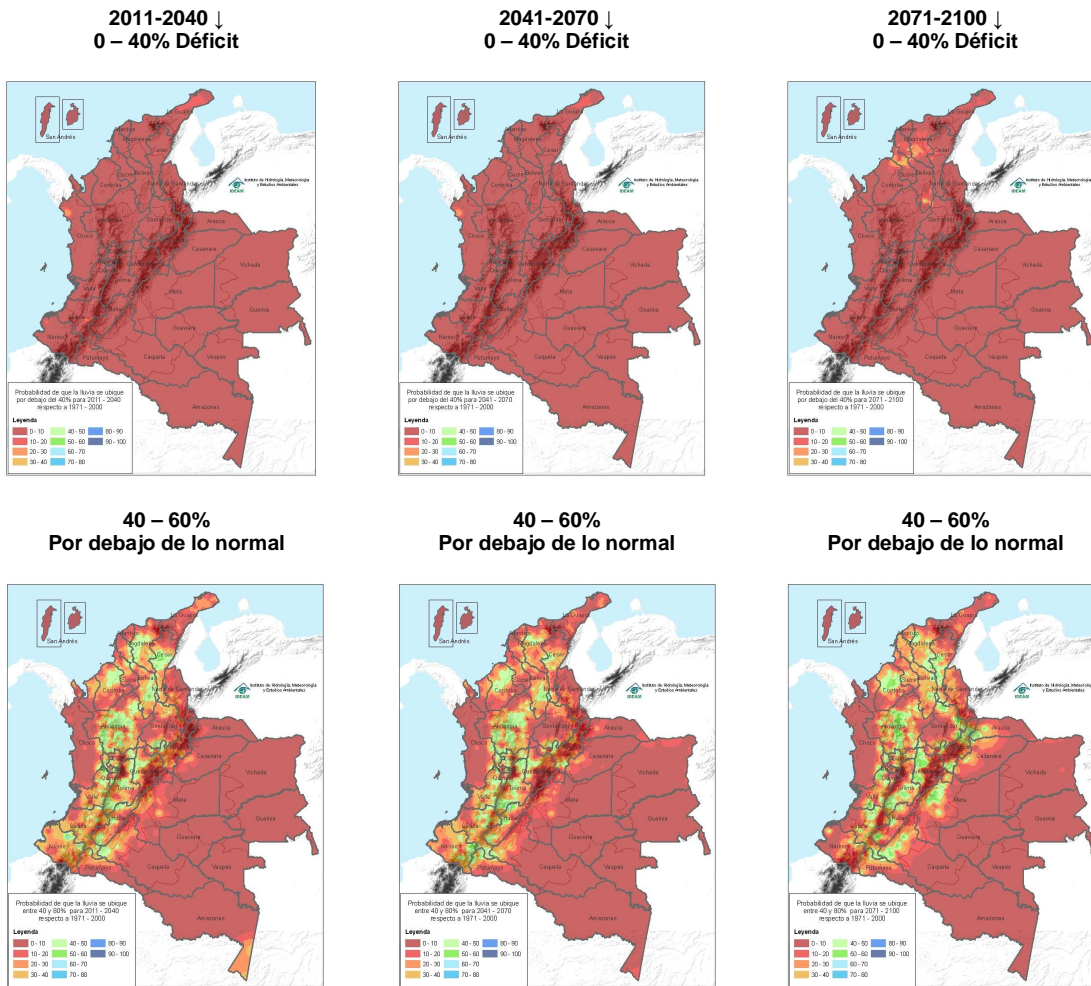


Figura 39. Diferencia en % de la humedad relativa entre clima futuro y a clima presente bajo distintos escenarios de cambio climático para el siglo XXI (PRECIS) – (S) indica que el escenario tuvo en cuenta el efecto de los sulfatos en la atmósfera

Aunque en términos de clima, el promedio da un buena idea; los sectores socioeconómicos necesitan reducir mejor la incertidumbre y de acuerdo con cada una de sus actividades construyen tablas de frecuencia entre los rangos que mejor se ajusten a sus necesidades con el fin de encasillar mejor los valores en que se va a manifestar el cambio climático en sus distintas actividades, dependiendo de sus propósitos y del grado de relación clima-sistema impactado existente. En la Fig. 40, se da un ejemplo de ello en términos de detectar la probabilidad (en %) que la lluvia se ubique en determinados rangos (en %); situación similar se presenta en la Fig. 41 para el caso de la temperatura media.

**PROBABILIDAD (%) DE QUE LA LLUVIA PRESENTE DEFICIT, EXCESO O NORMALIDAD (%)**



Continúa en la siguiente página →

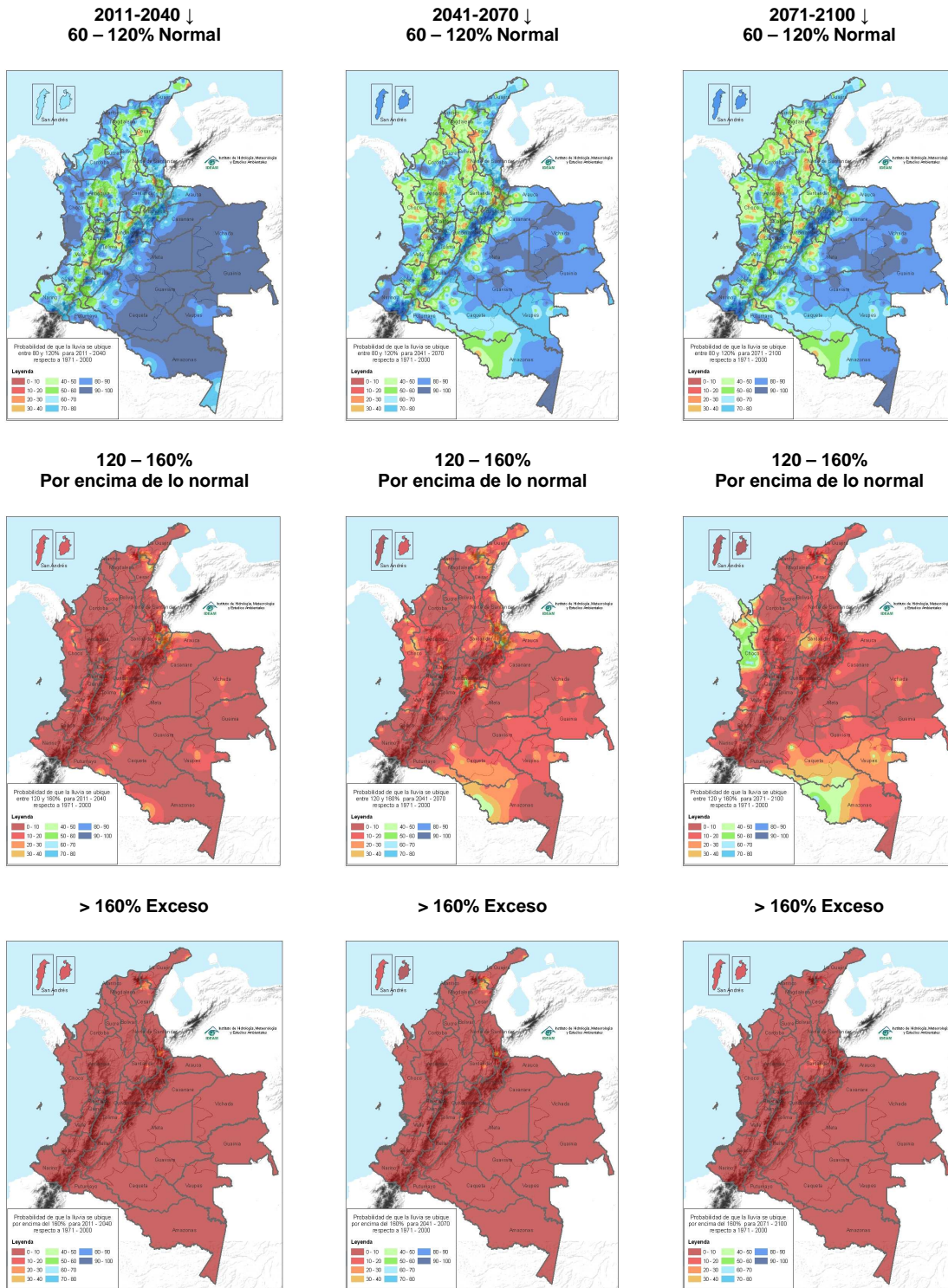
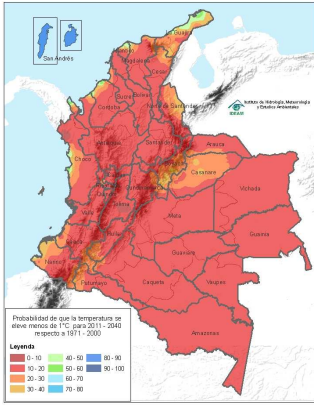


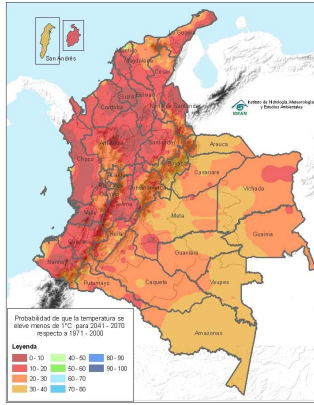
Figura 40. Tabla de frecuencias para evaluar el comportamiento de lluvia más probable; analizado de los resultados de distintos escenarios de cambio climático. El ejemplo indica que para 2011-2100 los déficits (lluvia entre el 0 y 40%) y excesos (lluvias mayores a 160%) no son muy probables (0-10% - color rojo oscuro). Precipitaciones normales (entre un 80 y 120%) dominaran gran parte de los Llanos Orientales para 2011-2100 (90-100% - color azul oscuro)

**PROBABILIDAD (%) DE QUE LA TEMPERATURA AUMENTE ENTRE CIERTOS VALORES EN °C**

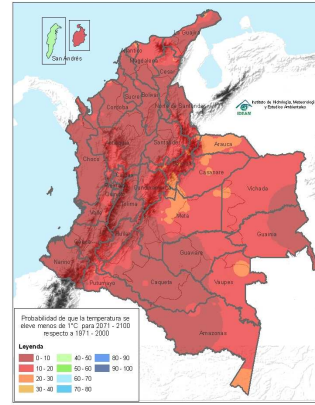
**2011-2040 ↓  
< 1°C**



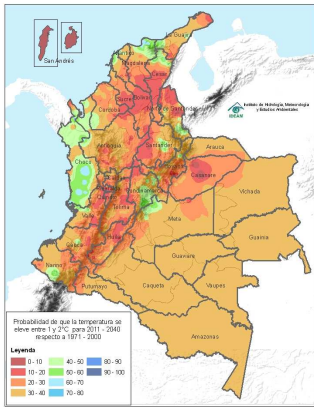
**2041-2070 ↓  
< 1°C**



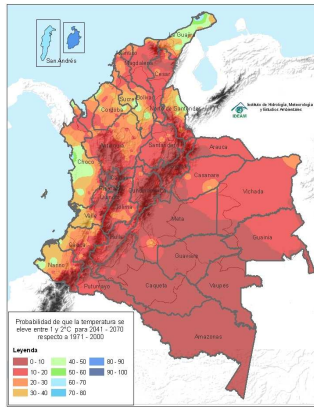
**2071-2100 ↓  
< 1°C**



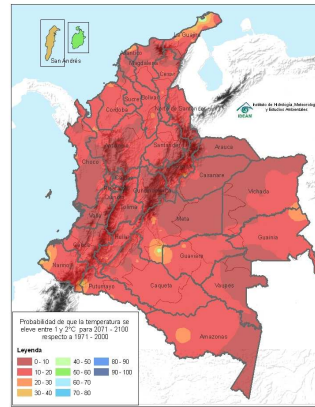
**1 y 2°C**



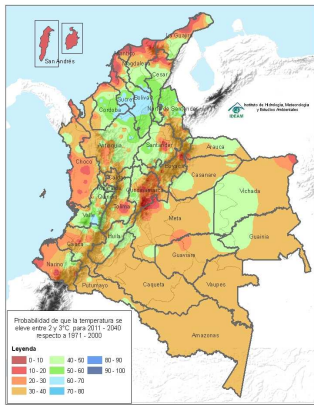
**1 y 2°C**



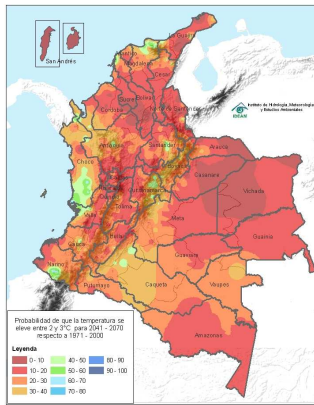
**1 y 2°C**



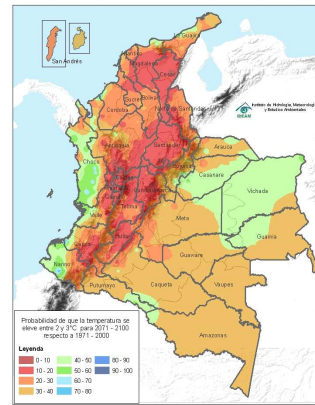
**2 y 3°C**



**2 y 3°C**



**2 y 3°C**



Continúa en la siguiente página →

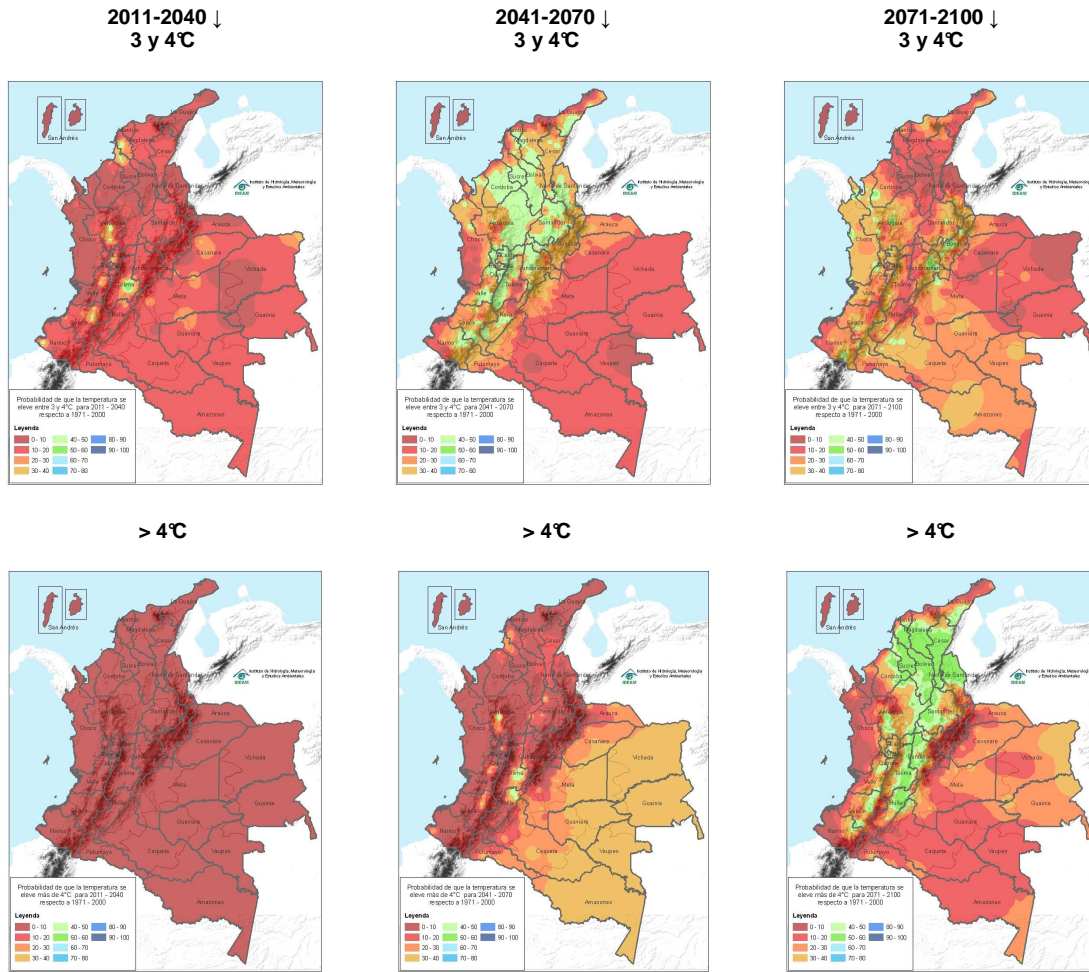


Figura 41. Tabla de frecuencias para evaluar la diferencia de temperatura media más probable entre clima presente y clima futuro; analizado de los resultados de distintos escenarios de cambio climático.

## 6.6. RESULTADOS EN ALTA RESOLUCIÓN USADO CCSM-WRF (4kmX4km)

Recordando que con el modelo CCSM-WRF para el escenario A2 (4kmX4km) la metodología fue diferente en el sentido de que para hacer las diferencias con clima presente, fue necesario tomar un año base de referencia, el cual tenía que estar dentro de los valores climatológicos normales en gran parte de Colombia; 1990 fue dicho año base y, con respecto a este año se hicieron las diferencias; ésto se realizó debido a que el modelo consume tanto procesamiento como almacenamiento de datos iniciales como de salida.

Los siguientes resultados fueron obtenidos utilizando datos de entrada del modelo CAM (Community Atmospheric Model) en baja resolución, el cual tiene un tamaño de grilla de 2.5X2.5<sup>9</sup>. El downscaling dinámico a 4kmX4km, se realizó con el modelo WRF; el cual se ejecutó con la técnica de anidamiento primero obteniendo procesos meteorológicos a 48kmX48km, luego a

<sup>9</sup> 1° ≈ 111 kilómetros en la franja intertropical

12kmX12km para finalmente obtener resultados en alta resolución sobre la zona que presenta la topografía más compleja sobre el territorio nacional, la Región Andina.

### 6.6.1. PRECIPITACIÓN

En este caso particular, el modelo CCSM-WRF no simuló bien el patrón de lluvias y a pesar que rescata ciertas señales donde se presenta la mayor y menor precipitación, sus valores están subestimados con respecto a los valores típicos del clima de referencia 1971-1990.

No obstante, una evaluación de sus resultados, para clima futuro, muestra que el aumento o disminución de lluvias a largo de los años analizados, para el siglo XXI frente al año de referencia 1990, mantienen casi el mismo patrón con el tiempo, es decir, los aumentos de lluvia los mantiene siempre en los mismos lugares, situación similar pasa con las reducciones de precipitación excepto hacia el año 2040 cuando la simulación presenta las reducciones más significativas en grandes porciones de la Región Andina.

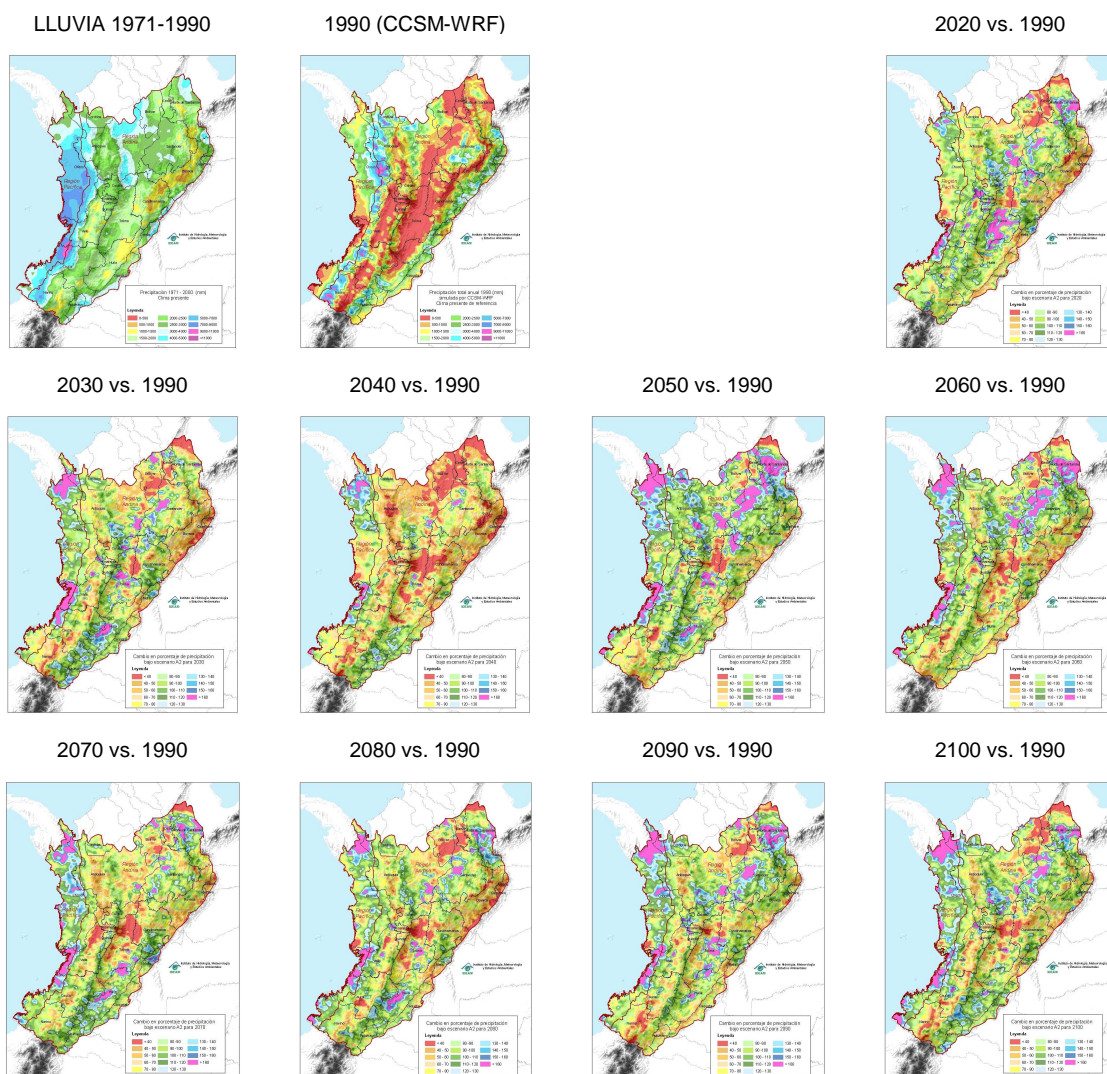


Figura 42. Clima presente 1971-2000, simulación de la precipitación para el año 1990 y cambios de precipitación a lo largo del siglo XXI bajo escenario A2

## 6.6.2. TEMPERATURA

Para la temperatura, el modelo CCSM-WRF simuló un gradiente con la altura más fuerte del que se presenta en la climatología de referencia 1971-2000, es decir, que en los topos los valores medios de esta variable meteorológica son menores que en la realidad, mientras que, a nivel del mar los valores de la temperatura media son mayores con respecto a las observaciones.

En cuanto a las diferencias de la temperatura media a lo largo del siglo XXI respecto al año 1990, el modelo muestra aumentos de temperatura cercanos a 1°C hacia el 2030, entre 1 y 2°C hacia el 2050, entre 2 y 3°C hacia el 2090 y entre 3 y 4°C e n el 2100, excepto en la ladera oriental de la misma cordillera donde el modelo calculó aumentos entre 5 y 6°C.

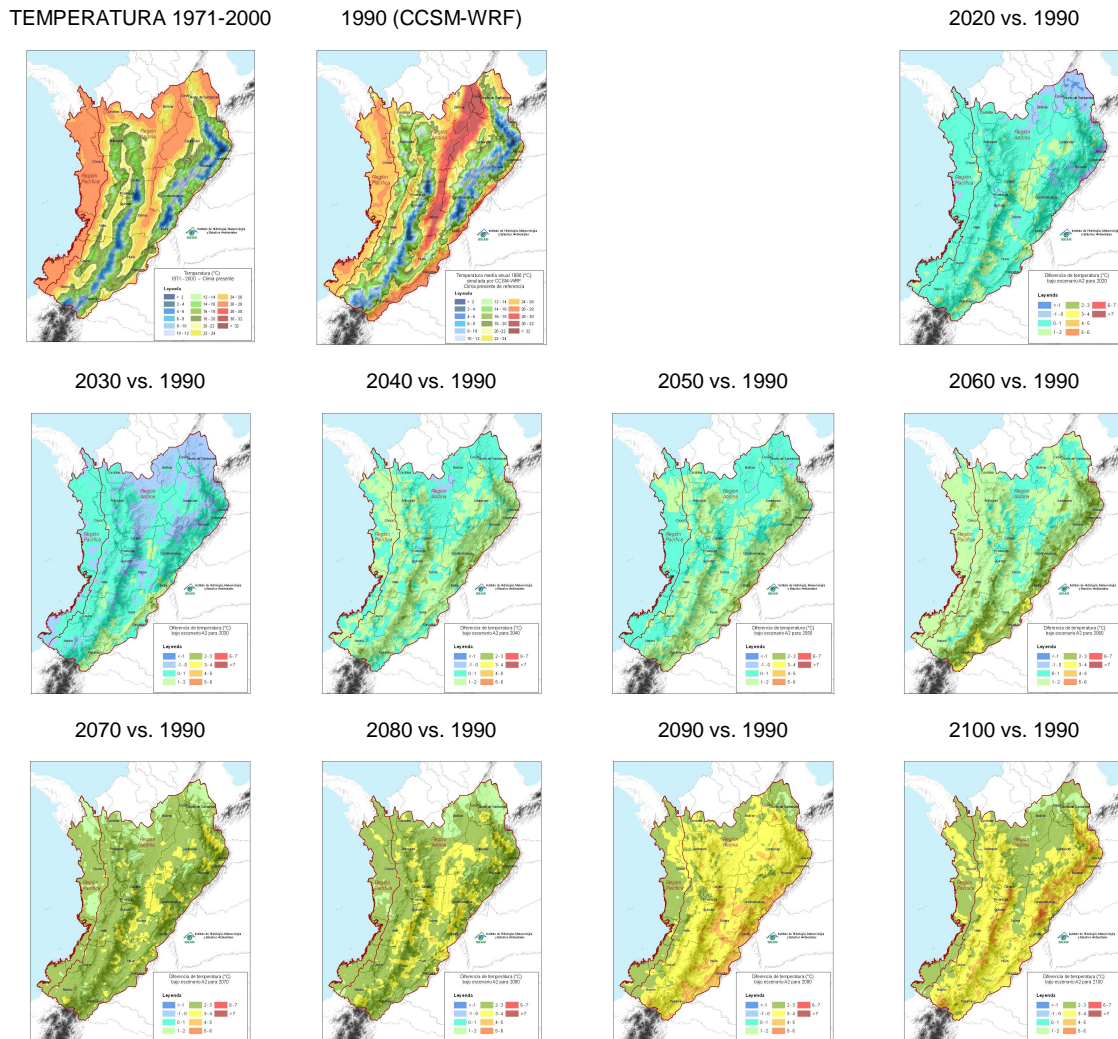


Figura 43. Clima presente 1971-2000, simulación de la temperatura media para el año 1990 y diferencias de temperatura a lo largo del siglo XXI bajo escenario A2



## 6.7. ENSAMBLE MULTIMODELO (RESPUESTA PROMEDIO DEL CLIMA)

De acuerdo con la sección 4.1, todos los escenarios deberían ser considerados plausibles pero no existen los medios de saber sus probabilidades relativas; no obstante, para tener una idea del cambio climático, se determinaron tres normales climatológicas (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) teniendo en cuenta que, el promedio sobre los multi-miembros ensamblados da una medida de la respuesta promedio de los factores forzantes sobre el clima modelado (Jones et al., 2004). Para este objetivo, se usaron los resultados arrojados por el modelos PRECIS; sin embargo, para el último período se incluyó dentro del promedio, el resultado del escenario A1B sin sulfatos simulado por el modelo global de alta resolución japonés para la serie de tiempo 2080-2099 basado en el hecho de que, con corridas de 20-30 años, los modelos pueden capturar el 75% de la varianza de la señal producida por las observaciones (Huntingford et al., 2004). Asimismo, los resultados de los escenarios de extrapolación de tendencias fueron incorporados para estos cálculos finales.

### 6.7.1. ENSAMBLE MULTIMODELO PARA LA TEMPERATURA DEL AIRE

Los promedios arrojados por el ensamble multimodelo para temperatura del aire muestran que la señal de cambio climático es mayor hacia finales de siglo XXI (2071-2100); los aumentos más significativos de la temperatura media se observan en gran parte de la región Caribe y Andina con valores que oscilan entre 3 y 4°C, e incluso valores superiores en zonas del Tolima y Norte de Santander; influenciado por la manifestación de que los días, según los modelos, serán más cálidos, ya que la temperatura media máxima en gran parte de las regiones mencionadas aumentaría sus valores entre 4 y 5°C para finales del siglo XXI con respecto a la normal climatológica 1971-2000.

Tabla 14. Diferencias de temperaturas entre clima futuro (2011-2100) y clima presente (1971-2000) por departamentos resultado del ensamble multi-modelo. Prevalece el aumento de la temperatura para el siglo XXI

DEPARTAMENTO	DIFERENCIA DE TEMPERATURA °C (CLIMA FUTURO - CLIMA PRESENTE 1971-2000)								
	TEMP. MINIMA MEDIA			TEMP. MEDIA			TEMP. MAXIMA MEDIA		
	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Amazonas	1.0	1.8	1.7	1.5	2.5	2.8	1.6	2.8	3.2
Antioquia	1.1	1.8	2.0	1.5	2.4	3.2	1.5	2.3	3.5
Arauca	1.3	2.1	2.1	1.3	2.2	2.6	1.1	1.8	2.2
Atlántico	1.0	1.7	2.2	1.1	2.0	3.0	1.1	2.0	3.2
Bogotá	1.0	1.7	1.7	1.3	2.2	3.2	1.2	2.2	3.9
Bolívar	1.2	2.0	2.5	1.5	2.4	3.4	1.5	2.3	3.7
Boyacá	1.0	1.7	1.5	1.3	2.1	2.7	1.1	1.8	2.9
Caldas	1.0	1.6	1.7	1.5	2.4	3.2	1.7	2.6	4.0
Caquetá	1.0	1.7	1.6	1.5	2.5	2.8	1.5	2.5	2.5
Casanare	1.3	2.1	2.1	1.5	2.5	2.8	1.6	2.7	3.1
Cauca	1.0	1.7	1.8	1.5	2.4	3.2	1.8	2.6	3.9
Cesar	1.1	1.9	2.3	1.4	2.3	3.5	1.4	2.3	4.0
Chocó	0.9	1.6	1.9	1.2	2.1	2.8	1.2	2.0	2.8
Córdoba	1.1	1.9	2.3	1.4	2.4	3.2	1.4	2.3	3.5
Cundinamarca	1.0	1.7	1.7	1.4	2.3	3.2	1.3	2.2	3.9
Guainía	1.4	2.2	2.2	1.6	2.6	3.0	1.4	2.6	2.9
Guaviare	1.2	2.0	1.9	1.6	2.6	2.9	1.8	2.8	2.9
Huila	1.1	1.9	2.0	1.6	2.6	3.5	1.6	2.5	3.8
La Guajira	0.9	1.5	2.0	1.2	2.0	2.9	1.1	1.8	2.9
Magdalena	0.8	1.4	1.9	1.2	2.0	3.0	1.0	1.7	3.0
Meta	1.1	1.8	1.8	1.4	2.4	2.7	1.5	2.5	2.9
Nariño	0.9	1.6	1.8	1.3	2.2	2.8	1.5	2.2	2.9
Norte de Santander	1.1	1.9	2.2	1.4	2.3	3.6	1.2	2.1	4.3
Putumayo	1.0	1.7	1.6	1.4	2.3	2.6	1.3	2.3	2.4
Quindío	1.1	1.8	1.9	1.6	2.4	3.3	1.8	2.6	4.2
Risaralda	1.1	1.8	1.9	1.6	2.5	3.3	1.9	2.7	4.2
San Andrés	0.7	1.3	1.2	0.8	1.3	1.4	0.7	1.2	1.1
Santander	1.1	1.8	1.9	1.5	2.4	3.4	1.4	2.3	3.9
Sucre	1.3	2.1	2.5	1.6	2.6	3.6	1.4	2.3	3.8
Tolima	1.1	1.9	2.1	1.7	2.8	3.8	1.9	3.0	4.6
Valle	1.1	1.7	1.9	1.6	2.4	3.2	1.9	2.7	4.0
Vaupés	1.1	1.9	1.8	1.5	2.4	2.8	1.6	2.7	3.0
Vichada	1.2	1.9	1.8	1.6	2.7	2.9	1.6	2.9	3.0
PROMEDIO	1.1	1.8	1.9	1.4	2.4	3.2	1.5	2.3	3.6

En términos de territorio nacional, la Tabla 14 indica que, en promedio, la temperatura media aumentaría 1.4°C para 2011-2040, 2.4°C para 2041-2070 y 3.2°C para el período 2071-2100.

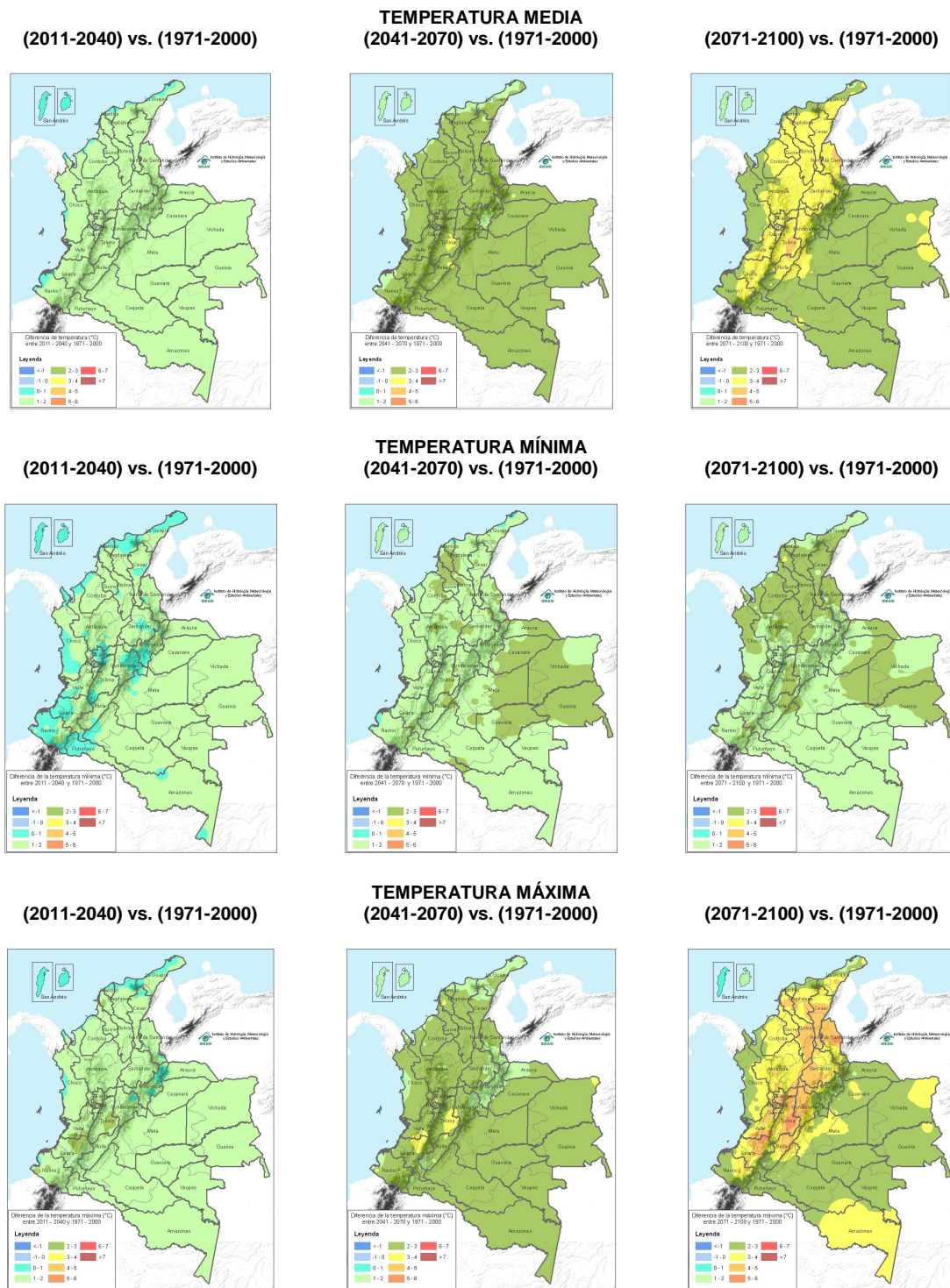


Figura 44. Ensamble multi-modelo correspondiente a las diferencias de temperatura (media, mínima y máxima) entre clima futuro y clima presente: La señal más fuerte de cambio climático se presenta a finales de siglo XXI (2071-2100) especialmente en las regiones Caribe y Andina.

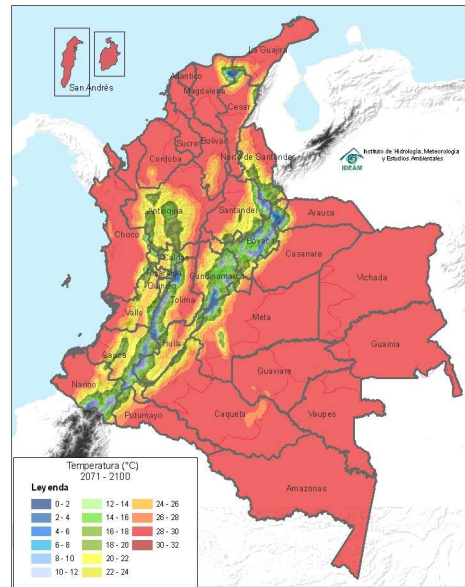
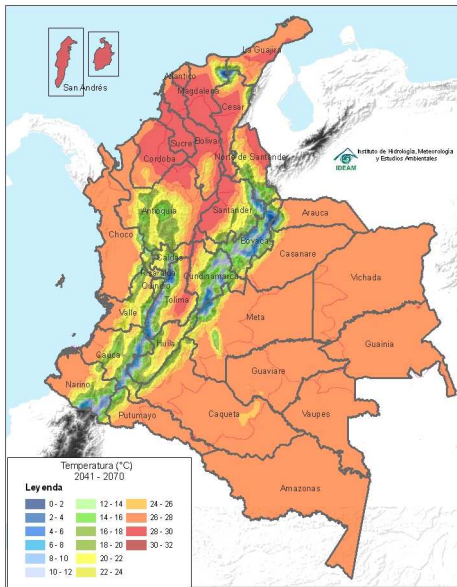
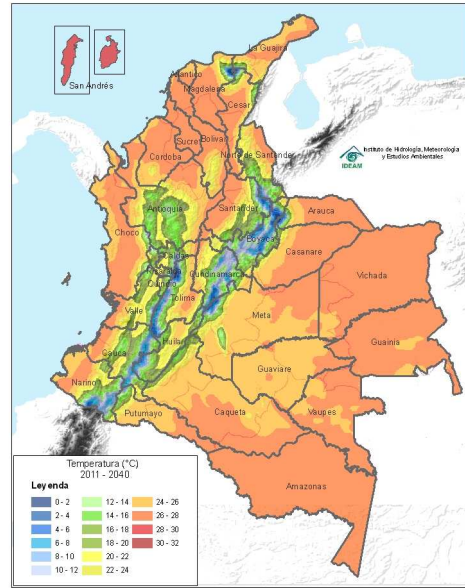
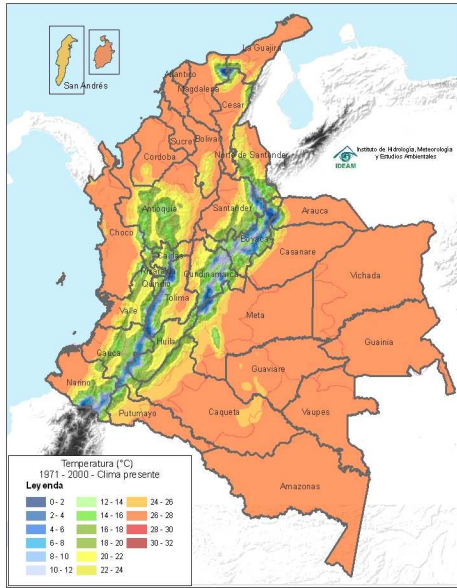


Figura 45. Comparación del campo de temperatura media entre clima presente y clima futuro con base en los resultados del ensamble.

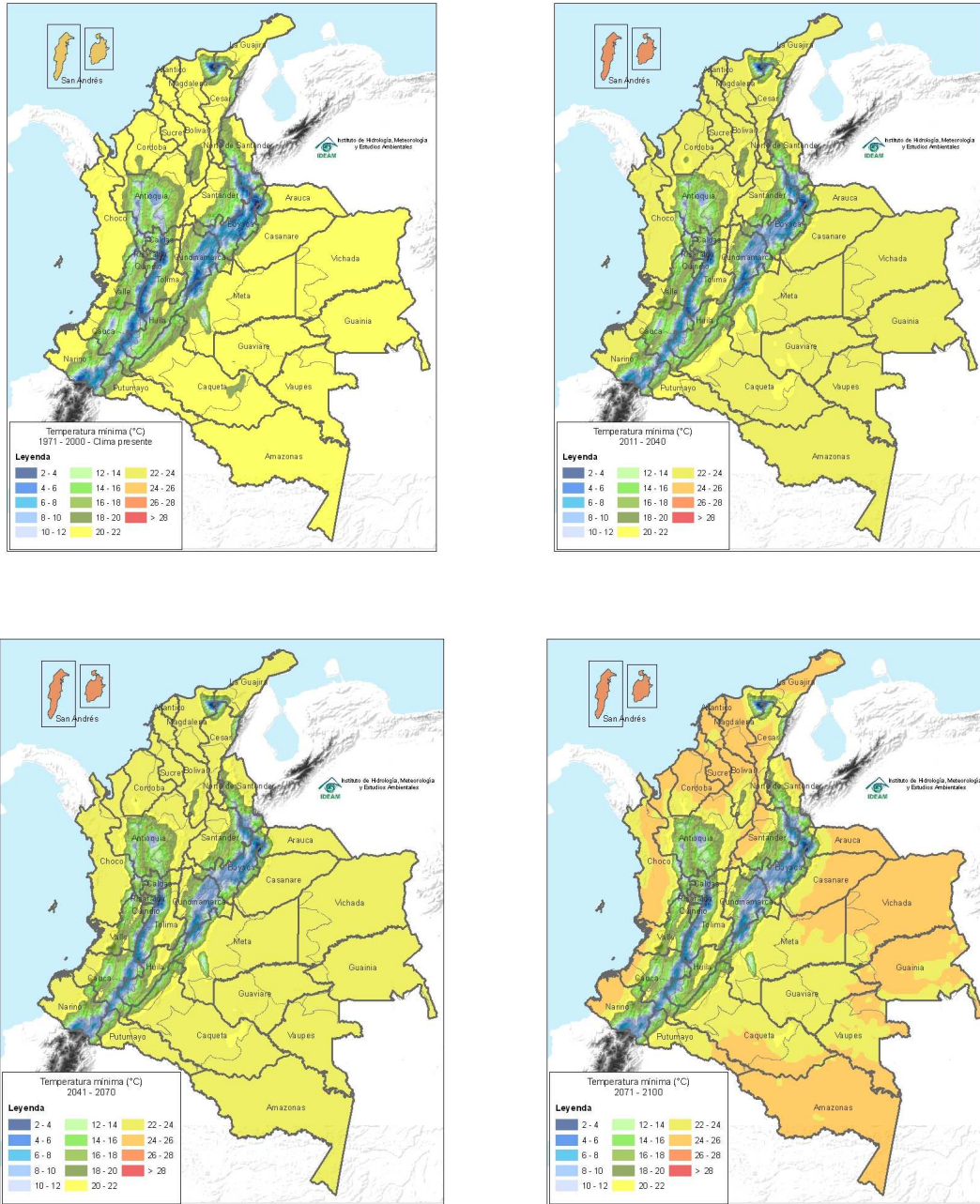


Figura 46. Comparación del campo de temperatura mínima media entre clima presente y clima futuro con base en los resultados del ensamble.

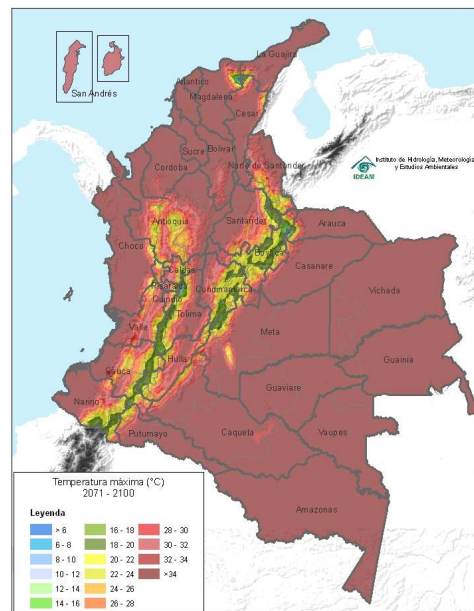
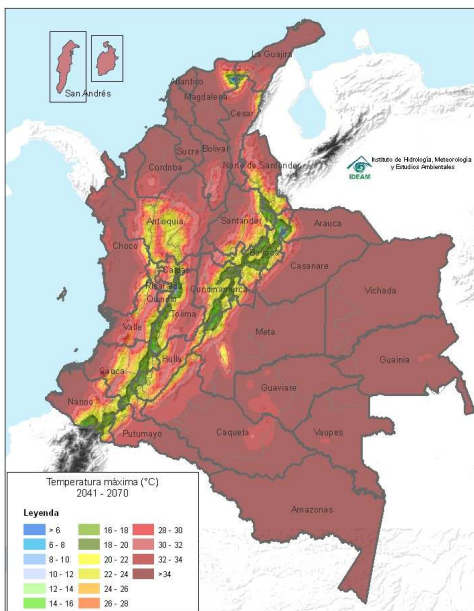
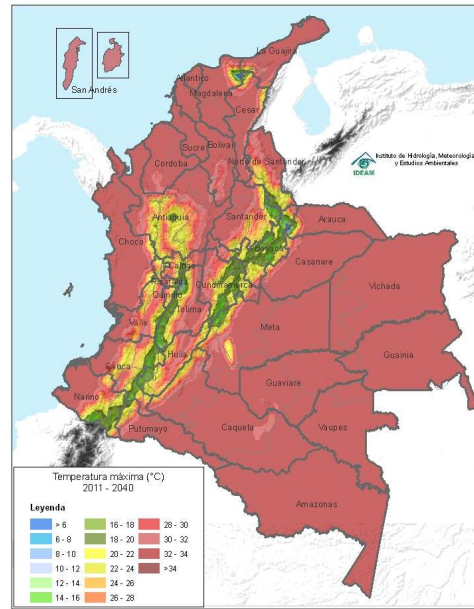
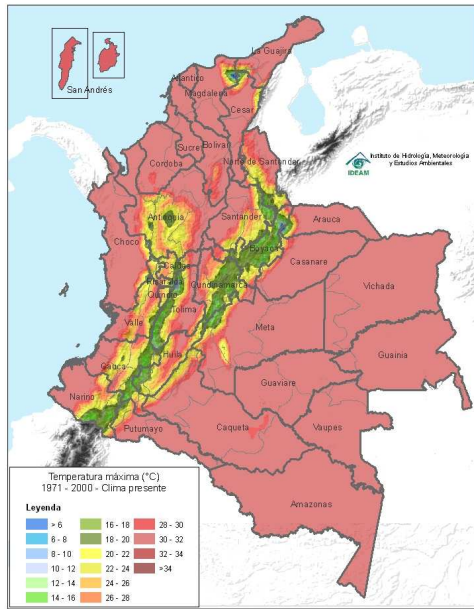


Figura 47. Comparación del campo de temperatura máxima media entre clima presente y clima futuro con base en los resultados del ensamble.

## 6.7.2. ENSAMBLE MULTIMODELO PARA LA PRECIPITACIÓN

Una vez generado el promedio del ensamble multimodelo realizado para la precipitación con base en los escenarios obtenidos en alta resolución con el modelo PRECIS, los datos del modelo GSM-MRI y el escenario de extrapolación de tendencias, en general mostraron que los valores en grandes porciones de Colombia se ubicarían entre sus valores normales (100%) y reducciones del 15%, o sea que ante cambio climático continuaría lloviendo el 85% de la precipitación anual evaluada para clima presente 1971-2000. No obstante, el resultado analizado solo desde el punto de vista, del escenario más pesimista, considerado en esta investigación, calculó reducciones que, en promedio, pueden alcanzar valores de 36%; o sea llovería el 64% de la precipitación evaluada para clima presente 1971-2000 tal como lo indica la Tabla 15.

Tabla 15. Reducciones y/o aumentos de lluvia en % entre clima futuro (2011-2070) y clima presente (1971-2000). Resultados del escenario "pesimista" A2 (0.0 % indica que no hay cambios)

CAMBIOS DE LA LLUVIA EN % CON RESPECTO A CLIMA PRESENTE 1971-2000 (PROMEDIO ESCENARIOS)				
DEPARTAMENTO	2011-2040	2041-2071	2071-2100	PROMEDIO SIGLO XXI
Amazonas	0.0	2.6	7.7	3.5
Antioquia	-10.2	-7.9	-6.7	-8.2
Arauca	3.1	3.7	-4.3	0.8
Atlántico	-6.5	-6.5	-12.9	-8.6
Bogotá	0.1	10.2	2.6	4.3
Bolívar	-8.9	-6.5	-15.2	-10.2
Boyacá	-8.6	-7.7	-7.8	-8.0
Caldas	-11.8	-9.9	-7.7	-9.8
Caquetá	-7.8	-7.9	-10.1	-8.6
Casanare	0.5	0.9	-1.6	-0.1
Cauca	-14.2	-12.7	-7.7	-11.5
Cesar	-1.8	2.9	-4.3	-1.1
Chocó	-0.5	3.1	13.1	5.2
Córdoba	-10.0	-8.9	-13.4	-10.8
Cundinamarca	-7.1	-2.6	-4.5	-4.7
Guainía	2.7	3.9	4.4	3.7
Guaviare	1.1	1.9	4.5	2.5
Huila	-14.7	-13.0	-10.5	-12.7
La Guajira	3.8	2.8	-3.2	1.1
Magdalena	-7.9	-4.2	-9.8	-7.3
Meta	-1.6	-1.1	-7.7	-3.5
Nariño	-14.0	-13.9	-8.6	-12.2
Norte de Santander	1.1	3.7	-5.5	-0.2
Putumayo	-12.2	-13.6	-12.1	-12.6
Quindío	-11.2	-4.6	-7.0	-7.6
Risaralda	-13.3	-10.7	-5.9	-10.0
San Andrés	-0.9	4.6	3.8	2.5
Santander	-3.8	3.6	-2.5	-0.9
Sucre	-5.8	-3.5	-15.0	-8.1
Tolima	-12.9	-12.3	-9.0	-11.4
Valle	-10.8	-8.0	-4.3	-7.7
Vaupés	6.9	9.2	12.3	9.5
Vichada	1.3	2.3	3.4	2.3
<b>PROMEDIO</b>	<b>-5.3</b>	<b>-3.0</b>	<b>-4.4</b>	<b>-4.3</b>
<b>MAXIMO</b>	<b>6.9</b>	<b>10.2</b>	<b>13.1</b>	<b>9.5</b>
<b>MINIMO</b>	<b>-14.7</b>	<b>-13.9</b>	<b>-15.2</b>	<b>-12.7</b>

CAMBIOS DE LA LLUVIA EN % CON RESPECTO A CLIMA PRESENTE 1971-2000 BAJO ESCENARIO A2				
DEPARTAMENTO	2011-2040	2041-2071	2071-2100	2071-2100 (SULFATOS)
Amazonas	4.3	11.4	15.3	19.7
Antioquia	-24.9	-24.3	-18.9	-15.9
Arauca	7.2	17.9	-11.8	-7.8
Atlántico	-8.9	-12.1	-22.3	-21.4
Bogotá	-11.6	16.1	-3.4	-6.8
Bolívar	-16.6	-13.2	-34.0	-33.2
Boyacá	-20.9	-16.7	-15.3	-17.7
Caldas	-31.5	-30.2	-21.9	-12.6
Caquetá	-8.7	-4.6	-15.7	-13.0
Casanare	4.0	9.5	-9.1	-5.4
Cauca	-34.6	-33.0	-20.4	-20.3
Cesar	-7.0	2.8	-16.8	-16.5
Chocó	-7.7	-4.1	20.7	24.6
Córdoba	-25.8	-27.7	-35.5	-32.8
Cundinamarca	-19.2	-9.1	-15.0	-15.6
Guainía	7.9	13.3	7.8	10.5
Guaviare	8.1	16.1	11.1	14.5
Huila	-24.5	-16.0	-12.8	-14.7
La Guajira	9.7	18.2	1.8	1.7
Magdalena	-16.6	-12.6	-24.6	-25.5
Meta	2.4	10.6	-16.0	-13.7
Nariño	-28.0	-29.1	-13.3	-12.0
Norte de Santander	8.4	20.9	-9.6	-9.8
Putumayo	-19.8	-17.7	-13.0	-15.4
Quindío	-25.7	-13.0	-13.3	-9.2
Risaralda	-29.8	-26.3	-17.2	-6.3
San Andrés	-6.7	-7.0	-10.1	-10.7
Santander	-5.7	19.2	-5.5	3.5
Sucre	-11.9	-9.0	-36.3	-36.0
Tolima	-25.3	-19.8	-16.0	-15.4
Valle	-28.9	-29.1	-18.7	-15.8
Vaupés	16.6	23.1	20.2	23.2
Vichada	5.7	11.6	6.5	9.6
<b>PROMEDIO</b>	<b>-11.1</b>	<b>-5.0</b>	<b>-11.0</b>	<b>-9.0</b>
<b>MAXIMO</b>	<b>16.6</b>	<b>23.1</b>	<b>20.7</b>	<b>24.6</b>
<b>MINIMO</b>	<b>-34.6</b>	<b>-33.0</b>	<b>-36.3</b>	<b>-36.0</b>

Los lugares que en promedio, para el siglo XXI, presentarían las mayores reducciones de precipitación estarían ubicados en los departamentos de Huila, Putumayo, Nariño, Cauca, Tolima, Córdoba, Bolívar y Risaralda donde las lluvias se reducirían cerca al 15% con respecto a la climatología 1971-2000; mientras que, aumentos de la precipitación cercanos al 10% se ubicarían en amplias porciones de Chocó. Pero visto desde el punto de vista de los escenarios más pesimistas analizados, las reducciones más significativas de lluvia a lo largo del siglo XXI se presentarían en Córdoba, Cauca, Bolívar, Caldas, Sucre, Valle, Antioquia, Nariño y Risaralda, donde llovería entre el 70 y 80% de las precipitaciones registradas durante el período 1971-2000 (o sea, reducciones entre el 20 y 30%).

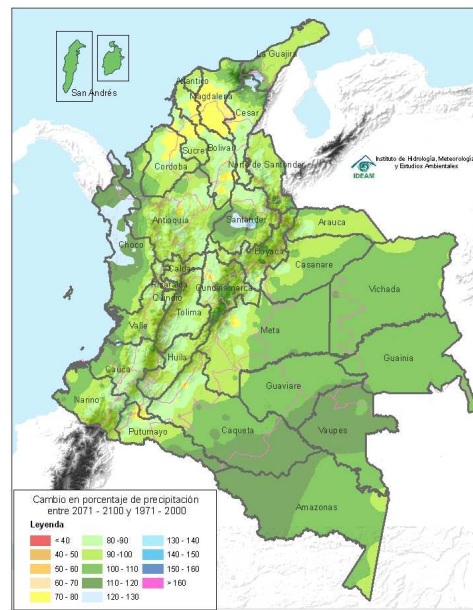
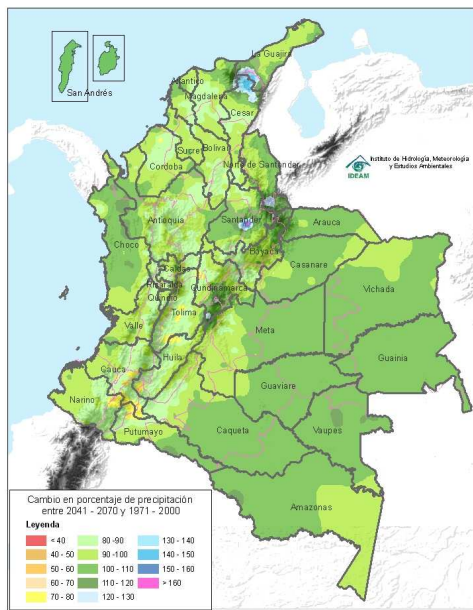
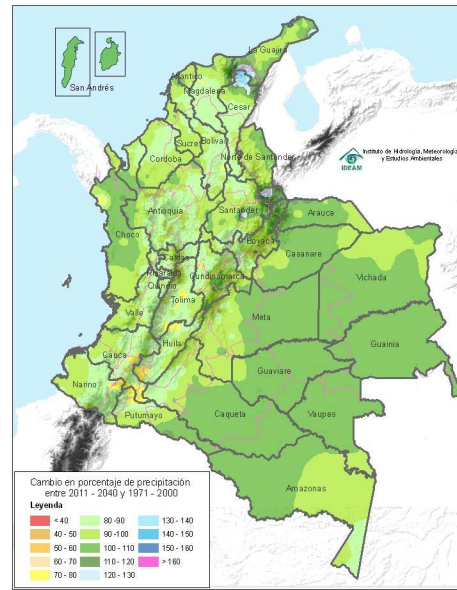
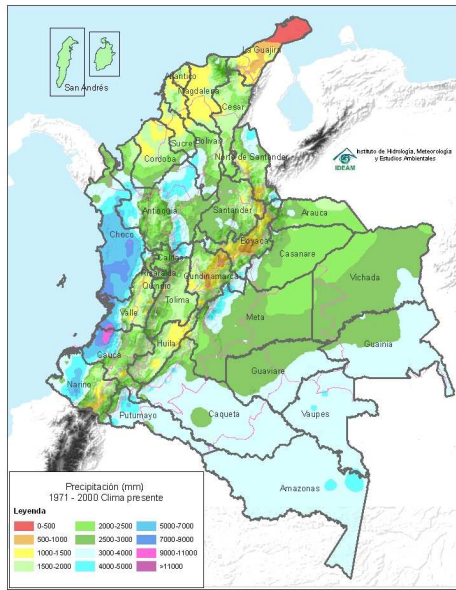


Figura 48. Ensamble multi-modelo correspondiente al cambio de porcentaje en la precipitación entre clima futuro y clima presente: La señal más fuerte de cambio climático se presenta a finales de siglo XXI (2071-2100), especialmente en sectores de la Región Caribe.

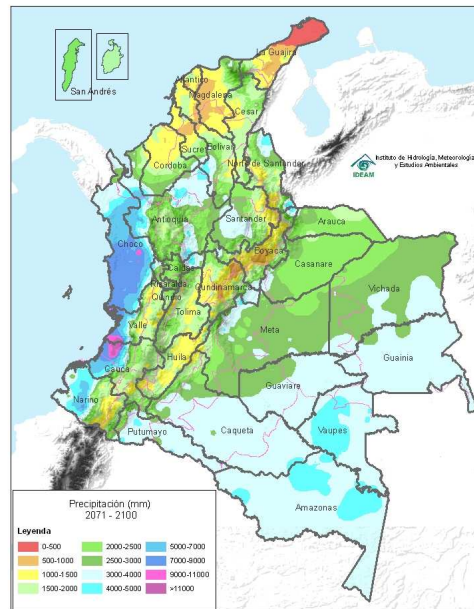
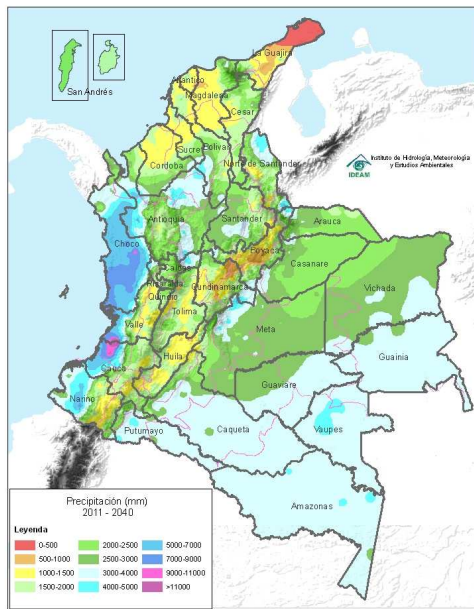
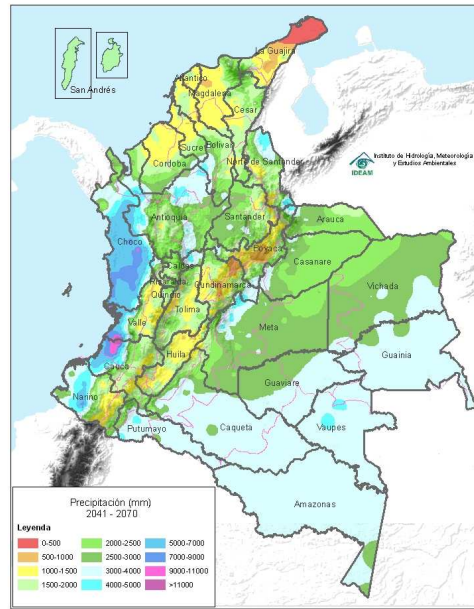
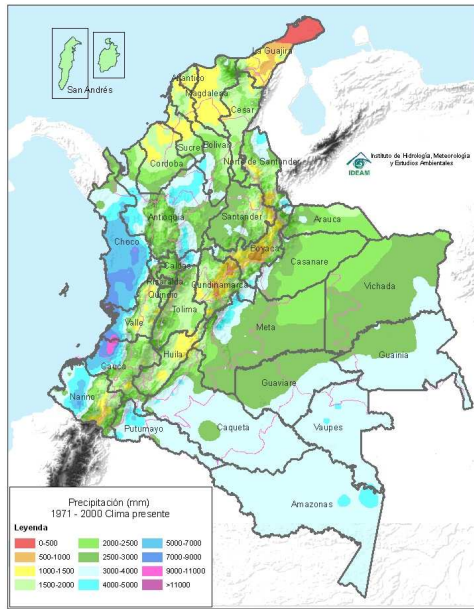


Figura 49. Comparación de la precipitación entre clima presente y clima futuro con base en los resultados del ensamble.



### 6.7.3. ENSAMBLE MULTIMODELO PARA LA HUMEDAD RELATIVA

Similar a lo que ocurrió con la temperatura, los promedios arrojados por el ensamble multimodelo para la humedad relativa muestran que la señal de cambio climático es mayor hacia finales de siglo XXI (2071-2100).

Tabla 16. Reducciones y/o aumentos de humedad relativa entre clima futuro (2011-2070) y clima presente (1971-2000)

DIFERENCIA DE HUMEDAD RELATIVA EN % CON RESPECTO A CLIMA PRESENTE 1971-2000					HUMEDAD RELATIVA EN % PARA CLIMA PRESENTE 1971-2000 Y FUTURO 2011-2100				
DEPARTAMENTO	2011-2040	2041-2070	2071-2100	PROMEDIO SIGLO XXI	DEPARTAMENTO	1971-2000	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Amazonas	-2.1	-3.6	-4.2	-3.3	Amazonas	86.9	84.8	83.3	82.7
Antioquia	-1.7	-2.2	-4.3	-2.7	Antioquia	81.9	80.2	79.7	77.6
Arauca	-0.6	-1.2	-1.9	-1.2	Arauca	80.9	80.3	79.7	79.0
Atlántico	-0.8	-1.4	-3.7	-2.0	Atlántico	79.9	79.1	78.5	76.2
Bogotá	-1.1	-1.6	-5.1	-2.6	Bogotá	81.6	80.6	80.0	76.5
Bolívar	-1.8	-2.8	-5.3	-3.3	Bolívar	80.9	79.1	78.2	75.7
Boyacá	-0.8	-1.0	-4.0	-1.9	Boyacá	79.9	79.1	78.9	75.9
Caldas	-2.1	-2.6	-4.5	-3.1	Caldas	81.3	79.3	78.7	76.9
Caquetá	-2.1	-3.7	-4.0	-3.3	Caquetá	84.6	82.5	80.9	80.6
Casanare	-1.7	-2.8	-2.8	-2.4	Casanare	78.7	77.0	75.8	75.9
Cauca	-2.3	-3.0	-6.0	-3.8	Cauca	82.1	79.7	79.0	76.1
Cesar	-1.4	-2.2	-6.0	-3.2	Cesar	75.5	74.1	73.2	69.5
Chocó	-0.7	-1.4	-2.2	-1.4	Chocó	87.8	87.1	86.5	85.6
Córdoba	-1.5	-2.2	-3.4	-2.4	Córdoba	82.5	81.1	80.4	79.1
Cundinamarca	-1.7	-2.4	-5.9	-3.3	Cundinamarca	80.7	79.0	78.4	74.9
Guainía	-1.7	-3.4	-3.8	-3.0	Guainía	83.4	81.7	80.0	79.7
Guaviare	-2.3	-3.5	-3.1	-3.0	Guaviare	85.7	83.4	82.2	82.6
Huila	-2.2	-2.9	-6.4	-3.8	Huila	76.5	74.3	73.6	70.1
La Guajira	-0.8	-1.5	-4.9	-2.4	La Guajira	72.2	71.4	70.7	67.3
Magdalena	-0.5	-1.0	-4.0	-1.8	Magdalena	81.1	80.7	80.1	77.1
Meta	-1.7	-2.7	-3.1	-2.5	Meta	81.7	80.0	79.0	78.6
N. de Santander	-1.5	-2.3	-7.4	-3.7	N. de Santander	81.8	80.3	79.6	74.5
Nariño	-2.2	-2.7	-5.2	-3.4	Nariño	83.8	81.6	81.1	78.6
Putumayo	-1.5	-2.5	-2.9	-2.3	Putumayo	86.1	84.6	83.6	83.2
Quindío	-2.6	-3.4	-6.0	-4.0	Quindío	79.1	76.5	75.8	73.2
Risaralda	-2.7	-3.3	-5.0	-3.7	Risaralda	82.0	79.4	78.7	77.1
San Andrés	0.1	0.6	1.1	0.6	San Andrés	80.4	80.5	81.1	81.5
Santander	-1.4	-2.0	-5.2	-2.9	Santander	81.1	79.7	79.1	75.9
Sucre	-2.3	-3.1	-5.5	-3.7	Sucre	82.2	79.9	79.1	76.7
Tolima	-3.3	-4.6	-8.1	-5.4	Tolima	78.0	74.7	73.4	69.9
Valle	-2.1	-2.4	-4.1	-2.9	Valle	79.4	77.3	76.9	75.3
Vaupés	-2.1	-3.9	-4.6	-3.6	Vaupés	80.2	78.0	76.2	75.5
Vichada	-1.9	-3.2	-2.9	-2.6	Vichada	79.9	78.0	76.7	77.0
PROMEDIO	-1.8	-2.5	-5.0	-3.1	PROMEDIO	80.7	78.9	78.2	75.7

Las disminuciones más significativas de esta variable meteorológica, de acuerdo con los escenarios, se obtuvieron en Tolima, Quindío y el Huila a lo largo del siglo XXI; no obstante, la pérdida de humedad más significativa, se calculó para el período 2071-2100 en especial para sectores de los departamentos de Tolima, Norte de Santander, Huila, Quindío, Cauca, Cesar, Cundinamarca, Sucre, Bolívar, Santander, Nariño, La Guajira y Risaralda.

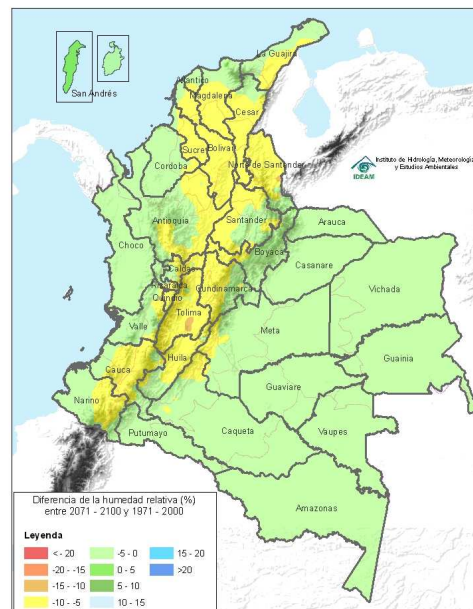
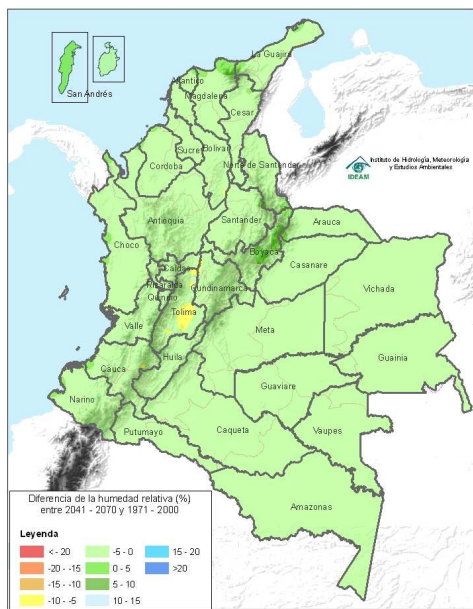
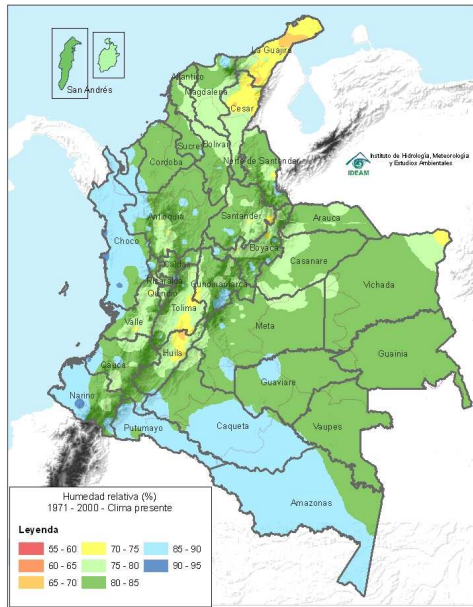


Figura 50. Ensamble multi-modelo correspondiente a la diferencia de porcentaje en la humedad relativa entre clima futuro y clima presente: La señal más fuerte de cambio climático se presentaría a finales de siglo XXI (2071-2100), especialmente en sectores de las regiones Caribe y Andina.

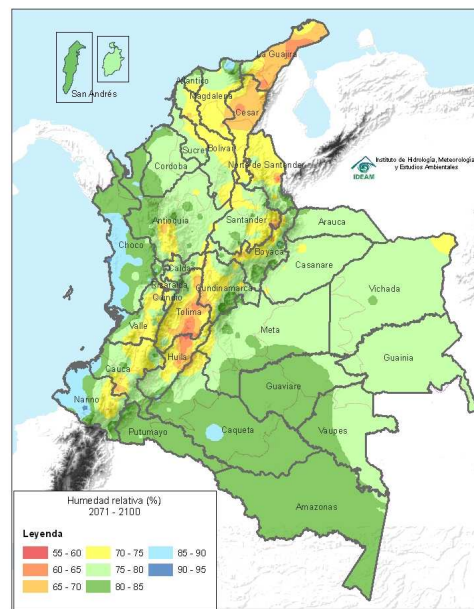
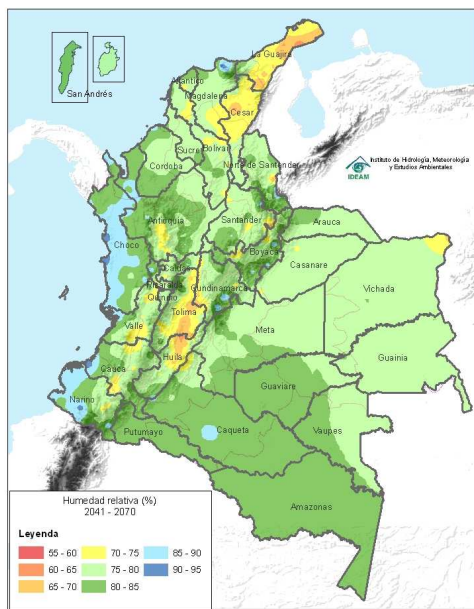
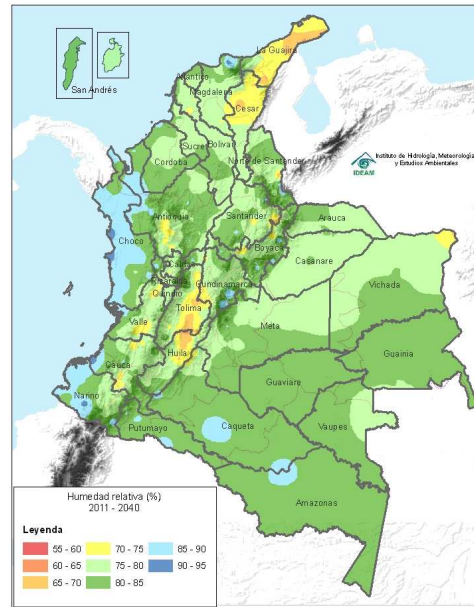
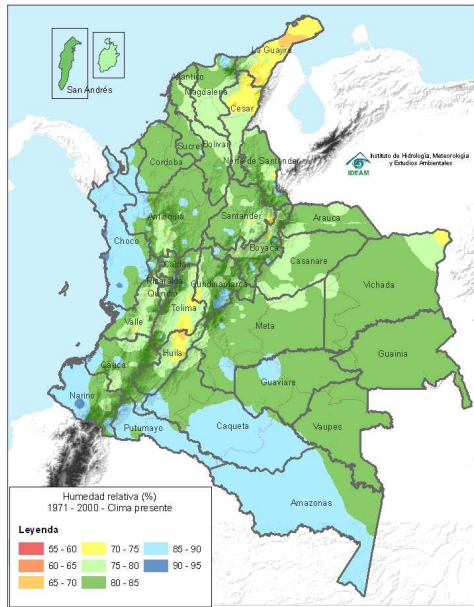


Figura 51. Comparación de la humedad relativa entre clima presente y clima futuro con base en los resultados del ensamble.

## 6.8. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE LANG

Una vez obtenidos los resultados promedios de temperatura y totales anuales promedios para las tres medias climatológicas de clima futuro (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) sobre el territorio colombiano se determinó la clasificación climatológica de Lang.

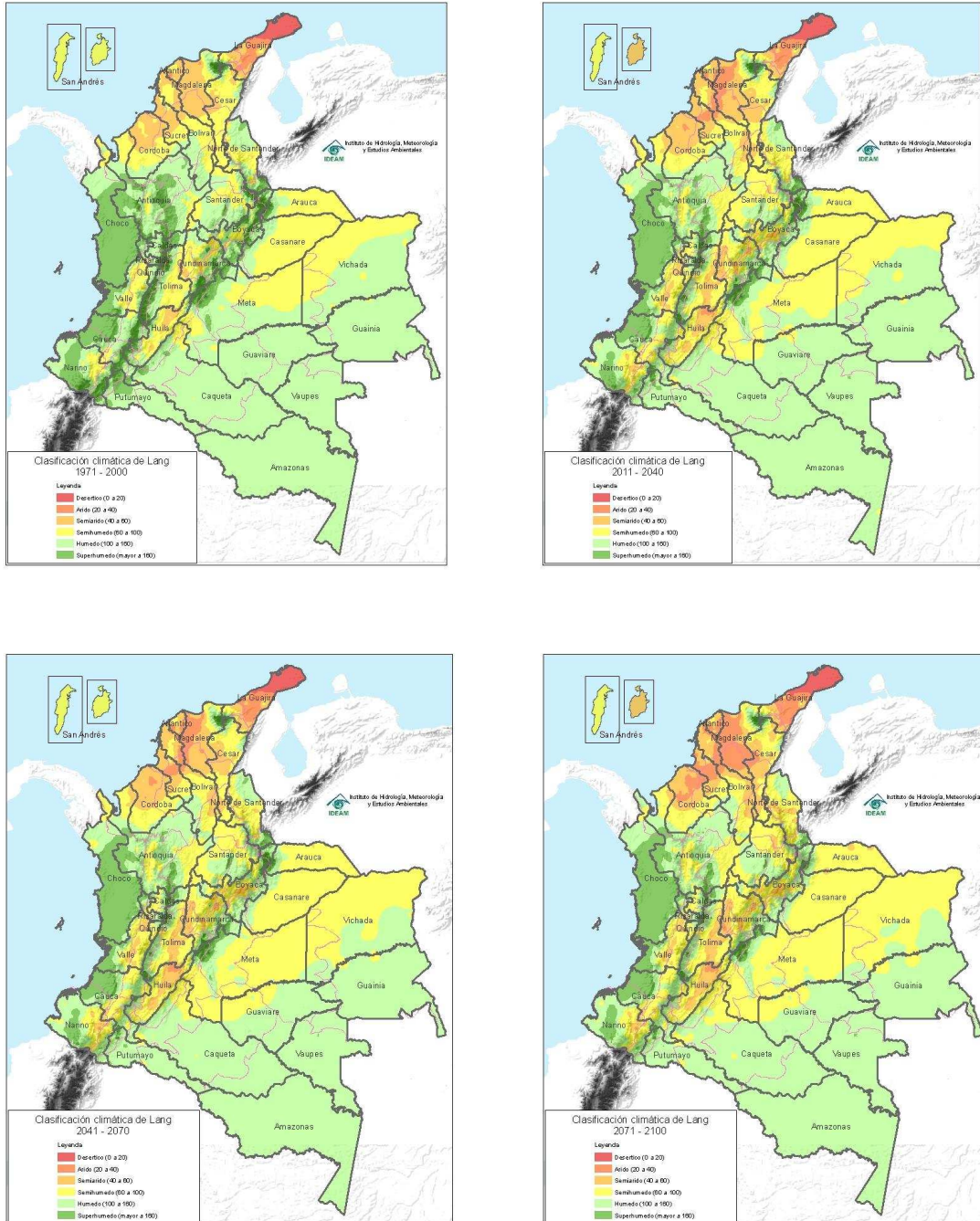


Figura 52. Comparación de la clasificación climática de Lang entre clima presente y clima futuro.

El resultado de aplicar esta metodología mostró que, no se presentan mayores cambios en la Península de la Guajira y la Región Pacífica donde las características desérticas, en el primer caso, y superhúmedas en el segundo, se mantienen. De la misma forma en la Amazonía continuaría dominando climas húmedos mientras que en los Llanos Orientales persistirán climas semihúmedos excepto en su parte sur donde paulatinamente existe un cambio de semihúmedo a húmedo. El cambio más fuerte se presentaría en la Región Caribe (excepto en la Península) donde el clima cambiaría de semihúmedo (actual) a semiárido y luego a árido para finales de siglo XXI. En la región Andina, los cambios más notables se apreciarían en sectores de Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Huila y Oriente de Valle donde habría un cambio de clima semihúmedo a clima semiárido.

## **6.9. MEDICIÓN DEL CONFORT TÉRMICO**

Con los resultados obtenidos de temperatura y humedad relativa promedio para las tres medias climatológicas de clima futuro (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) sobre el territorio colombiano, se calculó el índice de confort térmico, y la característica más visible ante cambio climático, es la alteración de sensación térmica que se percibiría de caluroso a muy caluroso en gran parte de de las regiones Caribe, Orinoquía, Amazonía así como a lo largo del valle del Magdalena en la Región Andina, especialmente desde el período, 2041-2070. En las zonas de alta montaña de las cordillera Oriental y Central, existiría un cambio paulatino de muy frío a frío, y a algo frío. No predominan climas clasificados como agradables a la población.

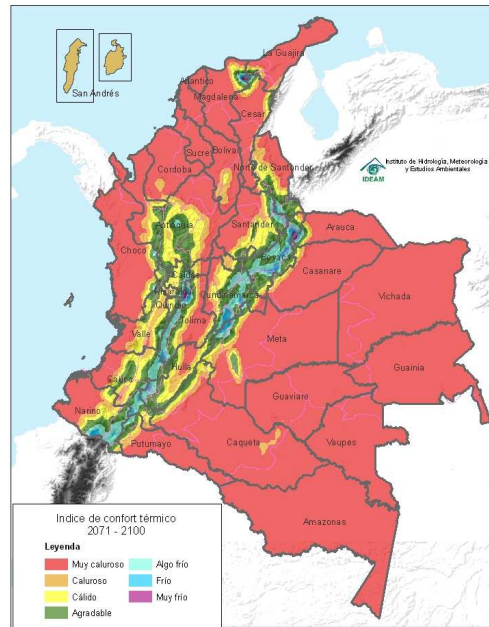
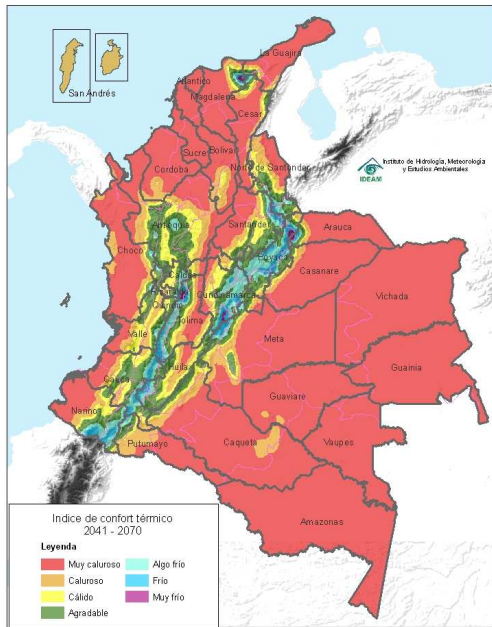
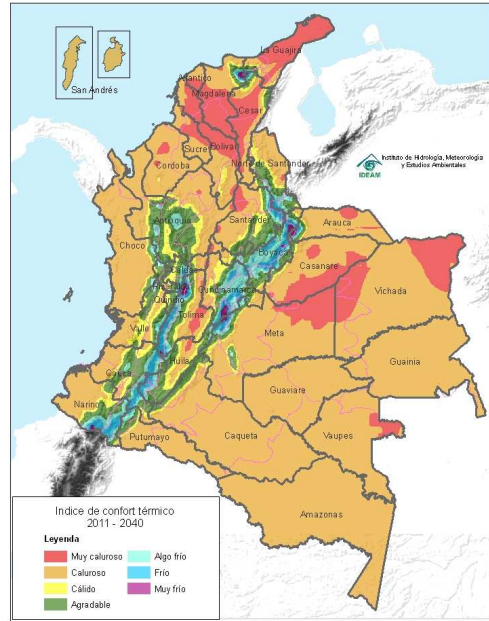
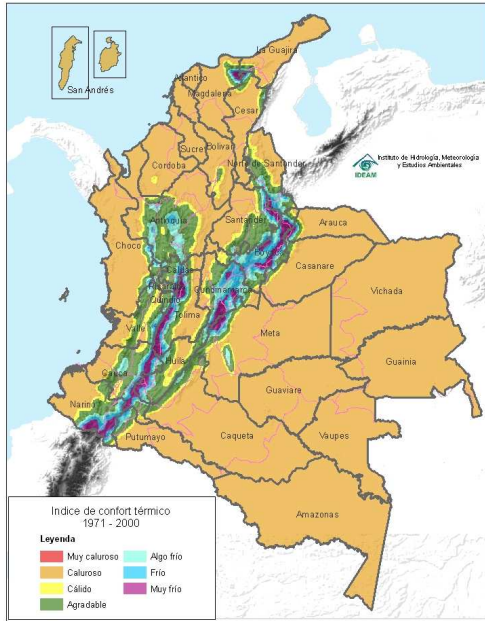


Figura 53. Comparación de la sensación térmica entre clima presente y clima futuro.

## 6.10. COMPARACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN CON OTROS RESULTADOS

Con el proyecto INAP, Pabón (2005) logró los primeros resultados en alta resolución de temperatura y lluvia realizada con el modelo PRECIS para Colombia. También con los resultados de este trabajo se obtuvo un resultado adicional para los mismos escenarios, A2 y B2 del periodo 2071-2100, como se muestra en la Fig. 54. Para generar la comparación, los resultados de esta investigación se colocaron en la misma escala que propuso Pabón (2005).

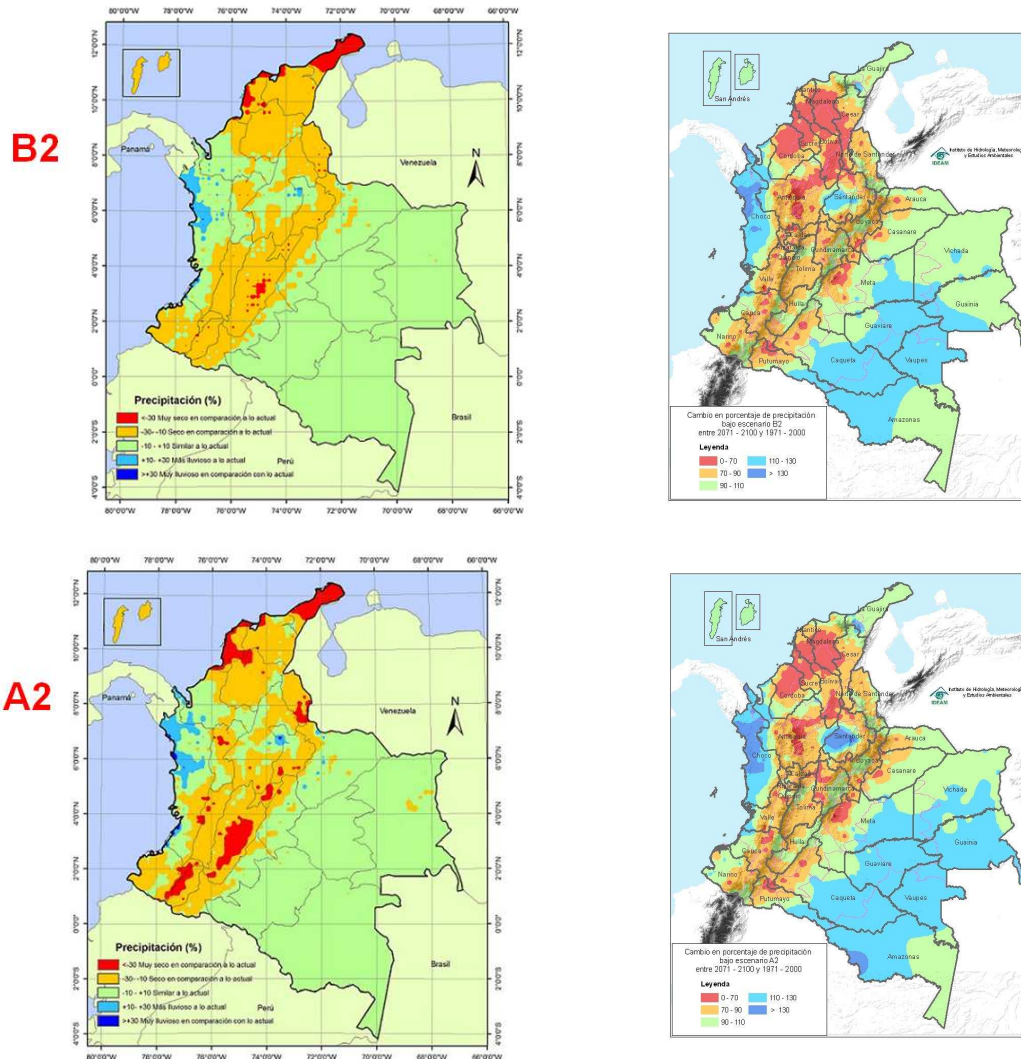


Figura 54. Comparación entre los resultados generados por Pabón (2005) al lado izquierdo y los generados en esta investigación para lluvia al lado derecho. Escenarios A2 y B2 (2071-2100).

En particular para la precipitación, se observó que ambos resultados mantienen la misma señal de cambio climático para finales del siglo XXI excepto en el Archipiélago de San Andrés y Providencia.

No obstante, los resultados actuales acentúan la reducción de las lluvias en la Región Caribe y aumentos de la misma en la región Pacífica y porciones de la Amazonía. Lo normal de la Guajira es que sea seco desde cualquier punto de vista.

Algunas diferencias notables entre los resultados presentados por Pabón (2005) y en este trabajo pueden tener varias explicaciones como: métodos de ajuste y calibración, longitud de las series de tiempo de las estaciones utilizadas, selección del dominio en el modelo PRECIS, condiciones iniciales de los modelos de baja resolución; Pabón (2005) usó HadCM3 mientras que en este trabajo se usó HadAM3P y HadCM3Q. También incide en los resultados finales la selección del período de referencia; Pabón realizó sus diferencias respecto al período de referencia 1961-1990 mientras que en esta investigación se utilizó el período de referencia 1971-2000. Una comparación del ensamble multimodelo de los resultados generados en esta nota técnica con los rangos propuestos por Pabón (2005) para lluvia, se presenta en la Fig.55. Para el caso de la temperatura, no se presentaron diferencias notables en ambos resultados.

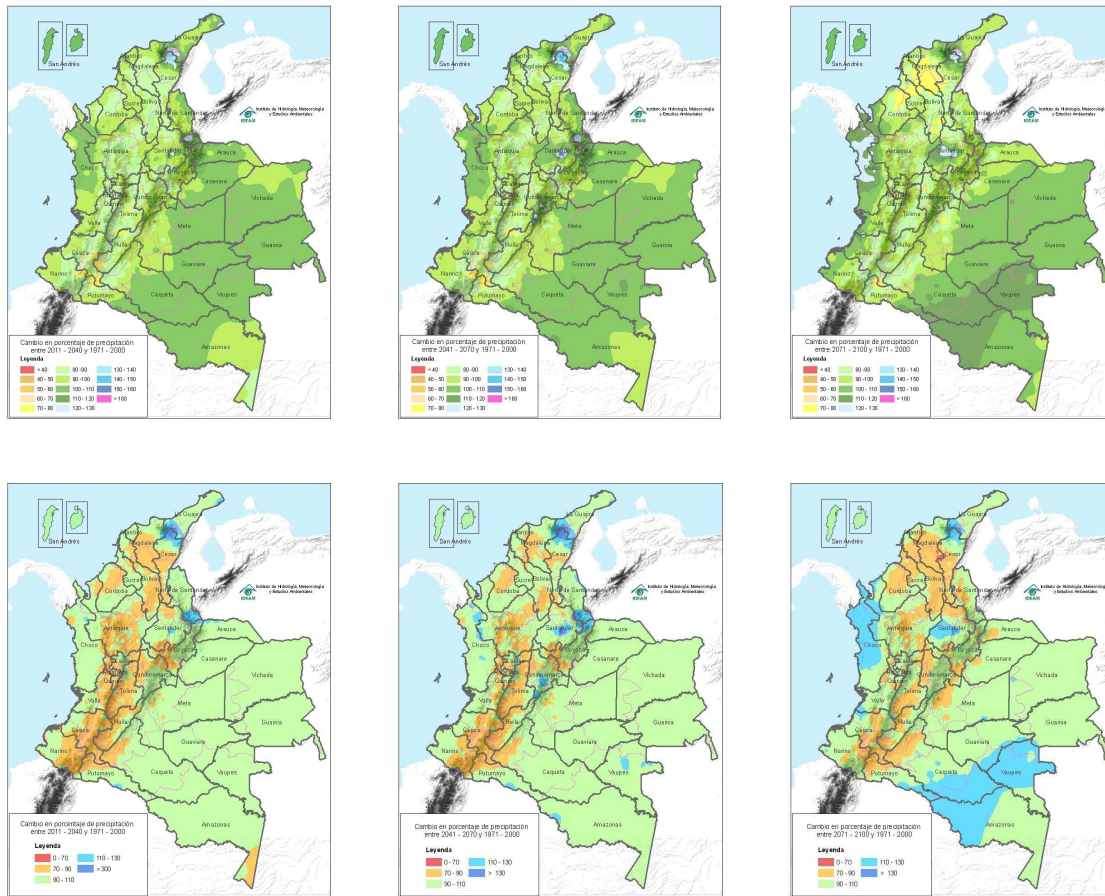


Figura 55. Comparación del ensamble multimodelo en diferentes escalas. Arriba en detalle cada 10% y abajo la escala propuesta por Pabón (2005)

Lo más característico del resultado del ensamble en la Fig. 55, son las reducciones de lluvia a lo largo del siglo XXI para amplias zonas de la Región Andina y Caribe entre el 10 y 30% excepto hacia el departamento de Santander. Aumentos de la lluvia a lo largo del siglo XXI al oriente de la Sierra Nevada de Santa Marta y solo hacia el período 2071-2100 en Chocó y franja central de la Amazonía.



## 6.11. POSIBLE EXPLICACIÓN DE LOS ESCENARIOS MÁS PROBABLES

El escenario más probable de cambio climático para el siglo XXI asociado básicamente a reducciones de volúmenes anuales de lluvia, aumento de la temperatura y reducción de la humedad relativa, podría explicarse en parte desde el punto de vista de la circulación general de la atmósfera; en particular, en el nivel de 850 milibares, los modelos están simulando que el doble paso de la Zona de Convergencia Intertropical, en el segmento correspondiente al ubicado sobre el Océano Pacífico descrito por León et al. (2000), se está perdiendo y que este sistema meteorológico se está posicionando más cercano al Ecuador; también que los vientos Alisios de Noreste junto con el flujo básico del Este, que domina la zona ecuatorial, están incrementando su velocidad especialmente hacia finales del siglo XXI, tal como lo muestran las figuras 56, 57, 58 y 59.

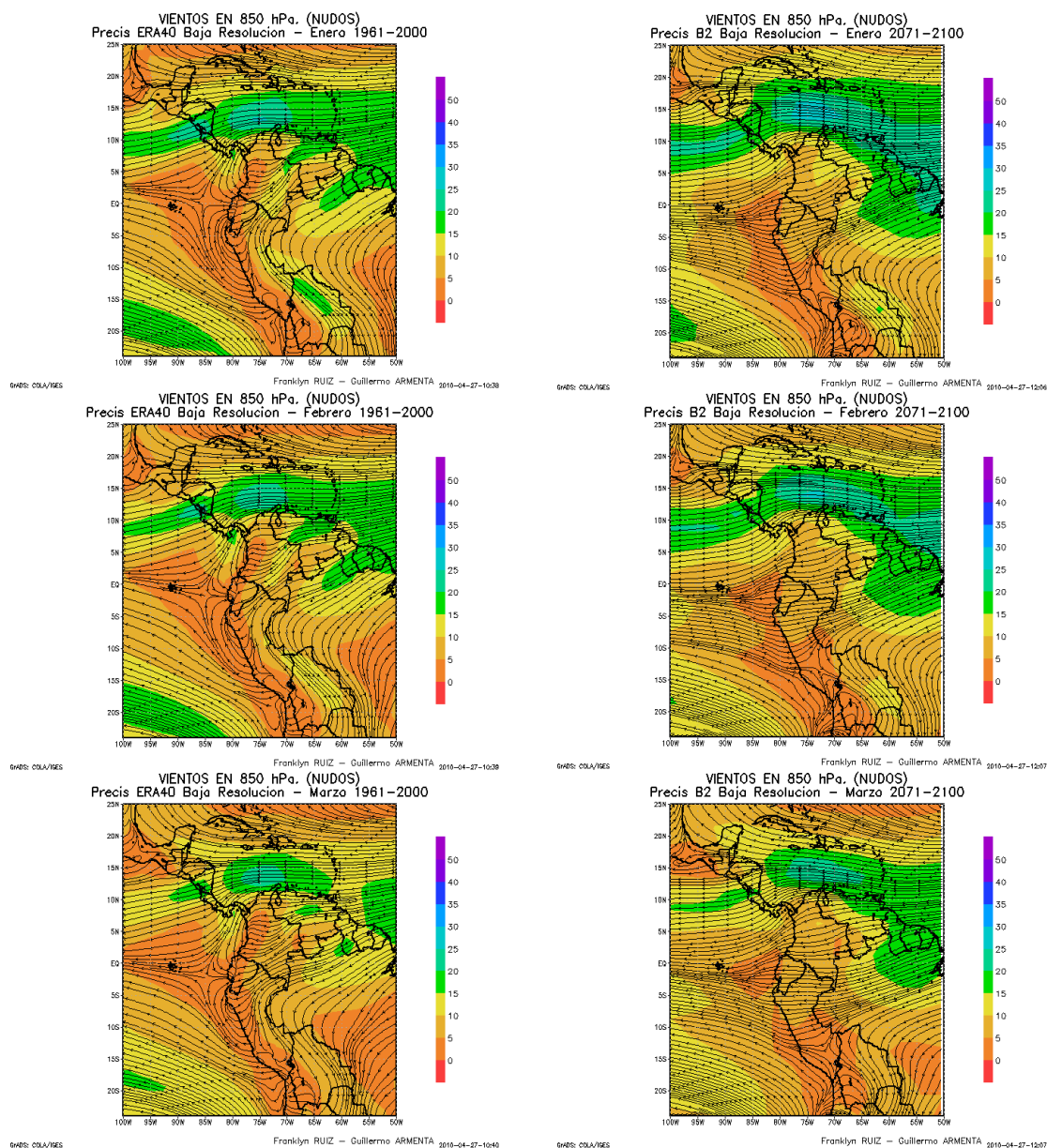


Figura 56. Comparación del campo de viento a 850 milibares de altura entre clima presente 1961-2000 y a finales de siglo XXI (2071-2100) para los meses de enero, febrero y marzo.

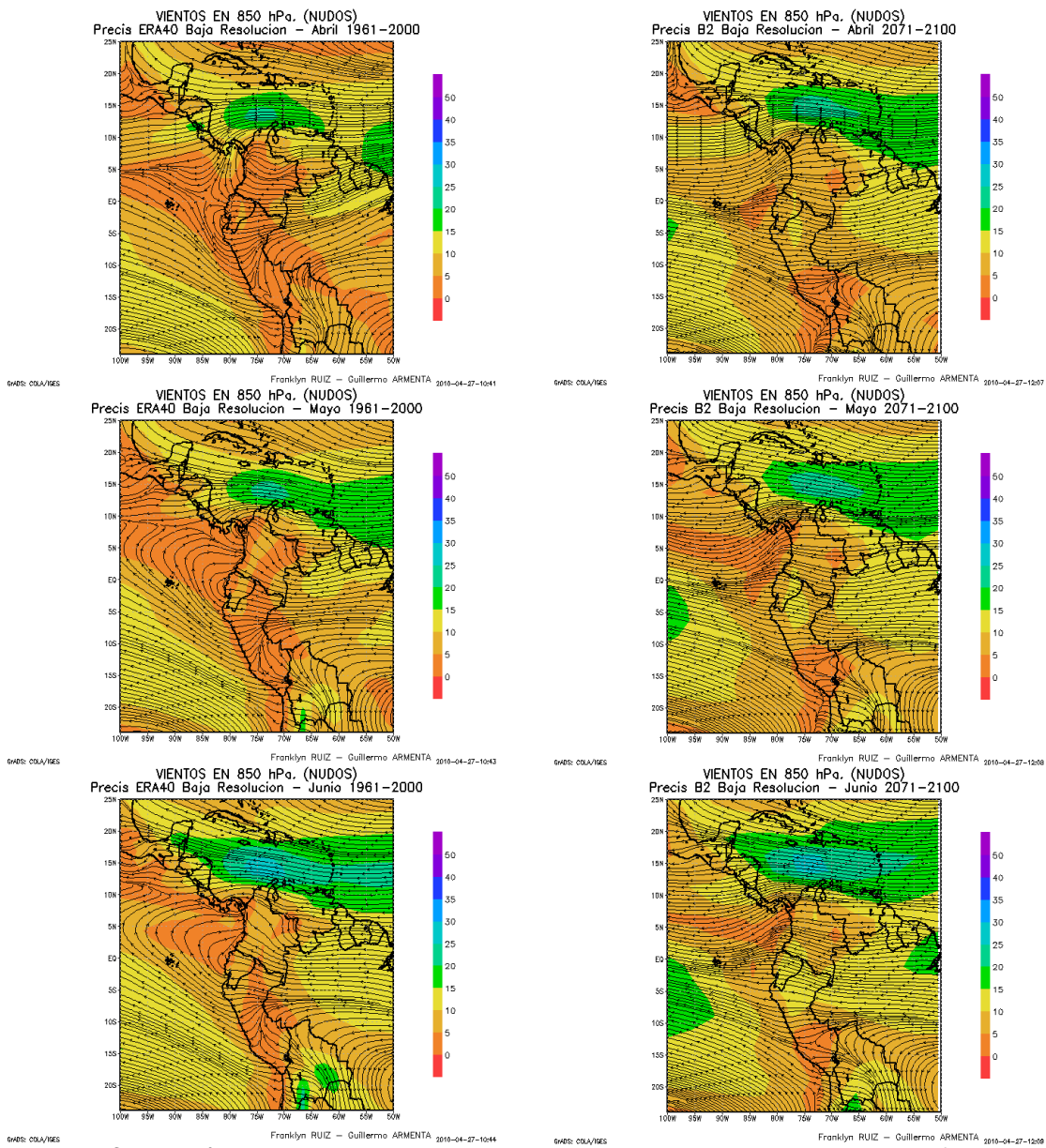


Figura 57. Comparación del campo de viento a 850 milibares de altura entre clima presente 1961-2000 y a finales de siglo XXI (2071-2100) para los meses de abril, mayo y junio.

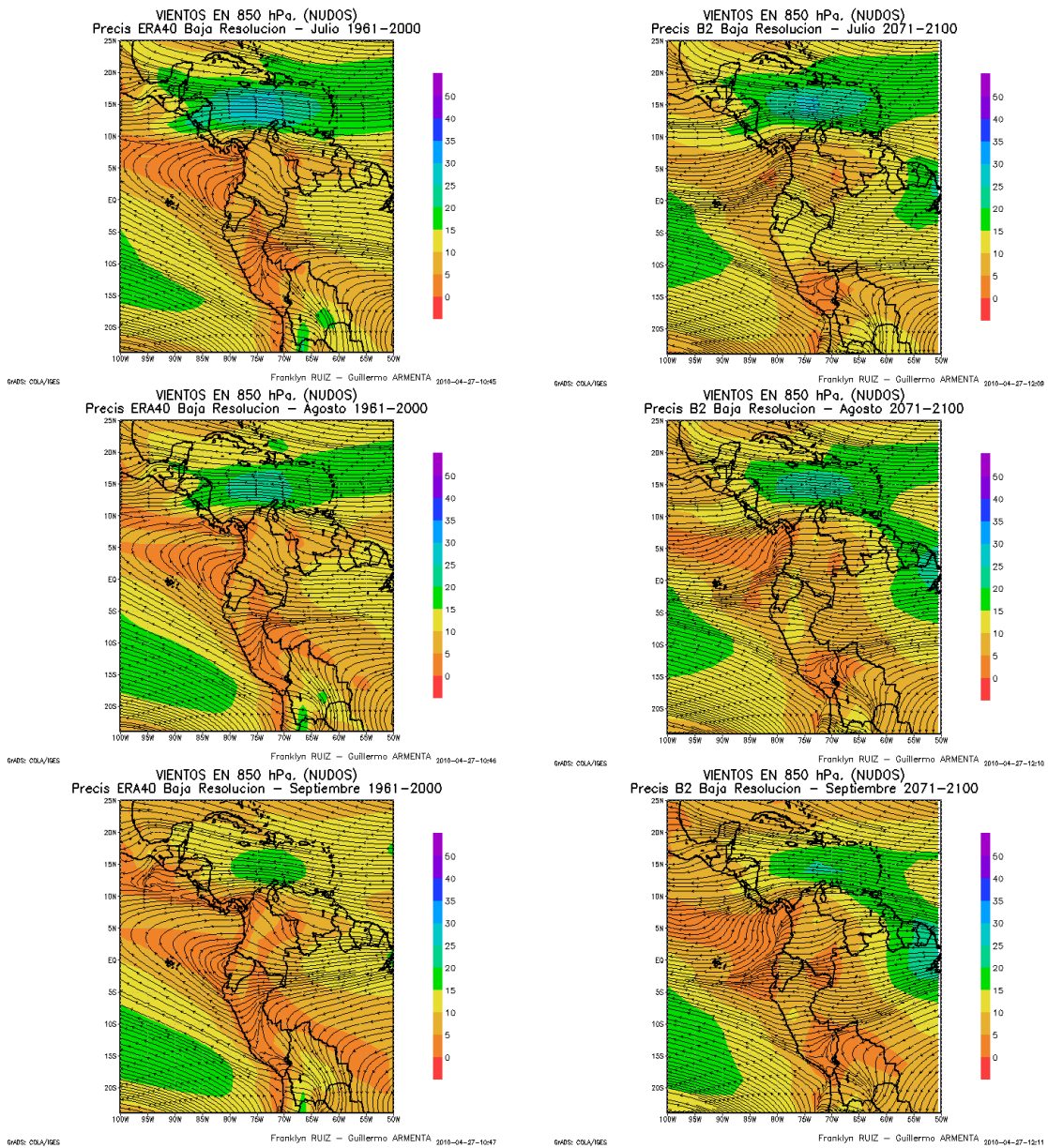


Figura 58. Comparación del campo de viento a 850 milibares de altura entre clima presente 1961-2000 y a finales de siglo XXI (2071-2100) para los meses de julio, agosto y septiembre.

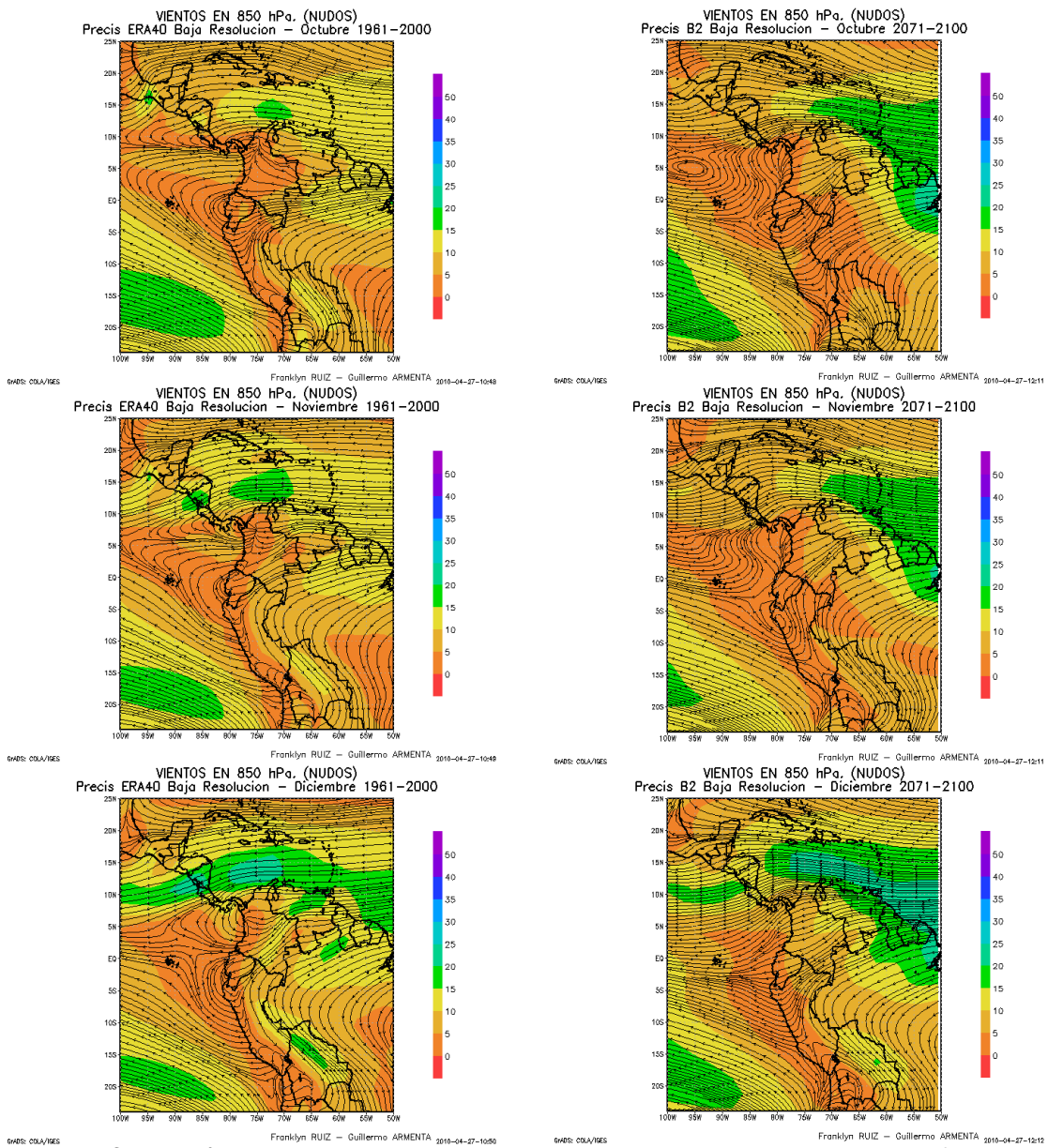


Figura 59. Comparación del campo de viento a 850 milibares de altura entre clima presente 1961-2000 y a finales de siglo XXI (2071-2100) para los meses de octubre, noviembre y diciembre.

## CONCLUSIONES

El análisis de las **tendencias** de largo plazo en los registros históricos climatológicos tomados en diferentes regiones del país, muestra las siguientes evidencias de cambio climático:

1. La **temperatura media** está aumentando a una tasa de cambio de 0.13°C por década para el período 1971-2000. Los departamentos en los que se están presentando los mayores aumentos son: Córdoba, Valle, Sucre, Antioquia, La Guajira, Bolívar, Chocó, Santander, Norte de Santander, Cauca, San Andrés, Tolima y Caquetá; indicando de alguna manera que son lugares que han sentido mayormente el calentamiento global sobre el territorio nacional.
2. Las tendencias para el período 1971-2000 de la **precipitación** total anual, han mostrado disminución en unos sectores y aumentos en otros. En particular, las disminuciones más significativas en la lluvia total anual se registraron en Atlántico, Arauca, Guaviare, Boyacá y Cundinamarca; mientras que las tasas de aumento se registraron a nivel regional en áreas de Quindío, San Andrés, Cesar, Cauca, Vaupés, Guainía, Antioquia, Chocó y Caldas.
3. La **humedad relativa** no ha presentado cambios significativos para el período 1971-2000, es decir, sus valores han permanecido estables.
4. Los **glaciares** están perdiendo anualmente entre el 3 y 5% del área glaciar en el país.
5. En cuanto a **nivel medio del mar** existe una tendencia al aumento que puede oscilar entre 2.3 y 3.5 milímetros al año en el Mar Caribe colombiano y de 2.2 milímetros al año en la costa Pacífica colombiana.

Mediante una evaluación de los modelos climáticos globales que mejor representan el clima regional y con la ayuda de modelos climáticos regionales de alta resolución espacial, se simularon diversos escenarios climáticos que ocurrirían sobre el territorio colombiano en los decenios venideros del siglo XXI. Con base en lo anterior se plantea el siguiente como el **escenario de cambio climático** más probable para el país:

1. La **temperatura media** en el territorio nacional continuará incrementándose durante el transcurrir del siglo XXI de tal manera que para el período 2011-2040 habría aumentado en 1.4°C, para 2041-2070 en 2.4°C y para 2071-2100 en 3.2°C. Los aumentos más significativos de la temperatura media se esperarían en gran parte de las regiones Caribe y Andina especialmente en los departamentos de Sucre, Norte de Santander, Risaralda, Huila y Tolima
2. En cuanto a los valores medios de **temperatura mínima**, se proyectan aumentos del orden de 1.1°C para el 2011-2040, 1.8°C para 2041-2070 y 1.9°C para 2071-2100, mientras que, con respecto a los valores medios de **temperatura máxima**, las proyecciones calculan aumentos del orden de 1.5°C para el 2011-2040, 2.3° C para 2041-2070 y 3.6°C para 2071-2100, indicando que los días serán más cálidos respecto al período de referencia 1971-2000.
3. En cuanto a **precipitación**, las proyecciones indican que habrá lugares donde aumentaría y sectores donde se reduciría. En promedio, para el período 2011-2070 la precipitación anual decrecería en no más de un 15% del valor del período 1971-2000. No obstante, los escenarios de cambio climático más pesimistas analizados proyectan reducciones hasta del 36% con respecto al período de referencia 1971-2000, especialmente hacia finales de siglo XXI (2071-2100).

4. Las **mayores reducciones de lluvia**, para el resto del siglo XXI (2011-2100), se esperarían en Córdoba, Bolívar, Huila, Nariño, Cauca, Tolima y Risaralda, pero en algunos de estos departamentos este cambio ya se empezaría a evidenciar en el transcurso del período 2011-2040. Desde el punto de vista de los escenarios más “pesimistas” analizados, éstos calculan que las reducciones más significativas de lluvia se darían, especialmente, en gran parte de los departamentos de la región Caribe así: Sucre (-36.3%), Córdoba (-35.5%), Bolívar (-34.0%), Magdalena (-24.6%) y Atlántico (-22.3%). Vale la pena destacar que, en la región Andina, los departamentos de Caldas (-21.9%) y Cauca (-20.4%) también tendrían importantes reducciones en los volúmenes de precipitación.
5. Los **mayores aumentos de precipitación** se observarían en Vaupés, Chocó, Guainía, Amazonas y Vichada.
6. Para Bogotá, los escenarios de cambio climático más pesimistas analizados arrojan reducciones de precipitación del -11.6% para el período 2011-2040, -16.1% para el 2041-2070 y del -3.4% para 2071-2100, con respecto a la climatología del período de referencia 1971-2000.
7. Para la zona insular de San Andrés y Providencia, los escenarios pesimistas indican reducciones del volumen de precipitación del orden de -6.7%, -7.0% y -10.0% para los períodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, respectivamente.
8. Las proyecciones de cambio climático evaluaron que la **humedad relativa**, se reduciría en Colombia en 1.8% para el 2011-2040, 2.5% para 2041-2070 y 5.0% para 2071-2100; las disminuciones más significativas comenzarían a manifestarse en el transcurso del período 2011-2040 en Tolima, Quindío y Huila y paulatinamente, para mediados y finales de siglo, se extenderían a otros departamentos como Sucre, Bolívar, Cesar, La Guajira, Norte de Santander, Cauca, Cundinamarca, Santander, Nariño y Risaralda
9. Con lo anterior, se deduce que los menores cambios del clima se presentarían en: la Península de La Guajira, la cual mantendría sus características desérticas, el Chocó, donde continuaría prevaleciendo el clima superhúmedo, la Amazonía, que seguiría siendo húmeda y en gran parte de los Llanos Orientales, donde el clima semihúmedo persistiría. Los cambios más significativos se esperarían en la Región Caribe que cambiaría de un clima semihúmedo (condiciones actuales) a semiárido y luego a árido para finales del siglo XXI. En la Región Andina, los cambios más notables representados en una transición de clima semihúmedo a clima semiárido, se presentarían en áreas de Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Huila y hacia oriente del Valle, especialmente.

Posibles efectos y/o implicaciones del cambio climático son:

1. **Implicaciones en el confort térmico:** el cambio en el confort térmico asociado a los cambios descritos podría tener un impacto drástico en la población, debido a que el área del territorio colombiano con condición de “muy caluroso” o “incómodamente caluroso” aumentará en gran parte de las regiones Caribe, Orinoquía y Amazonía y a lo largo del valle del Magdalena, en la zona Andina. En las zonas de cordillera, el confort térmico de frío y muy frío se estaría reduciendo paulatinamente.
2. **Implicaciones en la salud humana:** se ha establecido que con el calentamiento, el dengue y la malaria pueden expandirse a zonas más altas del país y, por ende, pisos térmicos más altos serían vulnerables a estas enfermedades.
3. Si los **glaciares** siguieran perdiendo anualmente entre el 3 y 5% de su área glaciar, éstos podrían desaparecer en 30 o 40 años.

4. **Ascenso al nivel de mar:** de continuar con las tendencias analizadas, el aumento del nivel del mar en Colombia, sobre el Mar Caribe, podría estar alrededor de entre 9 y 12 centímetros para 2040, entre 16 y 22 centímetros al 2070 y entre 23 y 32 centímetros al 2100. Para la costa Pacífica, este aumento se situaría alrededor de 8 centímetros para el 2040, 15 centímetros para el 2070 y 22 centímetros para el 2100.
5. El **sector agropecuario** se vería vulnerable especialmente por procesos de avance de la desertificación y los cultivos más sensibles serían arroz seco manual, arroz seco mecanizado, tomate de árbol, trigo y papa. No obstante, la producción agropecuaria no solo depende de la relación clima-planta sino también de la relación clima-plagas, clima-enfermedades y por la influencia del clima en las prácticas agrícolas. Otro aspecto importante de tener en cuenta en el futuro, sería el relacionado con el corrimiento de los pisos térmicos; lo cual en muchos casos ocasionaría reducción en las áreas potenciales para desarrollo de algunos cultivos, especialmente de clima templado y frío.
6. Con respecto a impactos del **recurso hídrico** ante cambio climático en Colombia, el cambio en el ciclo hídrico podría generar desabastecimiento de agua para consumo humano especialmente en las regiones Caribe y Andina, desmejoraría el saneamiento básico con implicaciones en la salud humana, incrementaría los costos de provisión de agua y en algunos casos podría ocasionar conflictos entre la población y entidades encargadas de la gestión de los recursos y de la provisión de agua potable.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se hace un reconocimiento al apoyo de las oficinas administrativas y jurídicas y en general a los funcionarios del IDEAM que participaron en esta investigación, sin cuyo aporte no hubiera sido posible la realización de esta nota técnica; en especial, al Subdirector de Meteorología Ing. Ernesto Rangel Mantilla que a través de su tarea administrativa adquirió y consiguió recurso tecnológico nacional e internacional con el fin de generar escenarios de cambio climático, al Ing. de sistemas Guillermo Armenta quien mantuvo operativo el funcionamiento de la corrida del modelo PRECIS, a la Ing. de sistemas Nelly Nova quien desarrollo software para las tareas de post-proceso de la información de los modelos; a la Ing. Olga Cecilia González por su apoyo con la elaboración de los mapas en ArcGIS; así como, a los técnicos meteorólogos Patricia Mesa y Araminta Vega quienes prepararon la información de las estaciones y corrieron los algoritmos diseñados por el autor para los análisis finales.

Asimismo, se hace un reconocimiento al Dr. José Daniel Pabón Caicedo, profesor del Departamento de Geografía de la Universidad Nacional de Colombia por sus oportunos y valiosos aportes.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acevedo, L. M., 2009: Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia. Postgrado de aprovechamiento de recursos hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Arakawa, A., & V. R. Lamb, 1977: Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. In: *Methods in Computational Physics*, 17. Academic press, New York, 173-265

Benavides H., & G. León: 2005: Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Nota Técnica IDEAM-METEO-008-2007. Bogotá, Colombia.

Brookshaw, A & M. Davey .2005: Linear regression downscaling of seasonal predictions for the UK climate districts. Hadley Center Technical Note 61 April 2005.

Cadena, M., 2010: Tendencias del nivel del mar en Colombia. Segunda Comunicación Nacional de Colombia. Capítulo IV Vulnerabilidad (por publicar)

Carte, T. R., M. L. Parry, H. Harasawa & S. Nishioka, 1994: The IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change. IPCC Special Report 0904813118. Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO and UNEP, Geneva.

Ceballos, J., 2009: Manifestación del Cambio Climático "Los glaciares en Colombia". Calentamiento Global, mas ciencia, mejores políticas. Revista LA TADEO 63 ISSN 0120-5250

Collins, W. J., D.S. Stevenson, C. E. Johnson & R. G. Derwent, 1997. Tropospheric ozone in a global-scale three-dimensional Lagrangian model and its response to NOx emission controls. *J Atmos. Chem.*, 26, 223-274.

Cox, Peter M., Richard A. Betts, Chris D Jones, Steven A. Spall & Ian J. Totterdell, 2000; Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in coupled climate model. *Nature*, 408:184-187.

Cullen, M.J., 1993: The unified forecast/climate model. *Meteorol. Mag.*, 122, 81-94

Dorado, J., 2008: Preparación de la Segunda Comunicación Nacional de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático – CMNUCC. PNUD/COL/00045745, 79 pp

Dudhia, J., D. Gill, K. Manning, W. Wang & C. Bruyere, 2004: PSU/NCAR Mesoscale Modeling System, Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System versión 3. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research (NCAR). Pennsylvania, United States.

Giorgi, F., & L. O. Mearns, 1999: Introduction to special section: Regional Climate modeling revisited. *J Geophys. Res.* 104(D6), 6335-6352.

Giorgi F., B. Hewiston, J. Christensen, C. Fu, R. Jones, M. Hulme, L. Mearns, H. Von Storch and P. Whetton. Regional climate information – evaluation and projections. In IPCC WGI TAR, 2001 (ibid)

Habata, S., K. Umezawa, M. Yokokawa & S. Kitawaki, 2004: Hardware system of the Earth Simulator Parallel Computing, 30, 1287-1313.

- Huntingford, C. R. Jones, C. Prudhomme, R. Lamb & J. H. C. Gash, 2003: Regional climate model predictions of extreme rainfall for changing climate. *Q. J. R. Meteorol Soc.* 129:1607-1621.
- IDEAM, 2005: Clasificaciones climáticas y confort térmico anual. Atlas Climatológico de Colombia. Capítulo 2, 78-87.
- INAP, 2003: Integrated National Adaptation Plan: High Mountain Ecosystem, Caribbean Islands and human Health. Conservation International, World Bank, IDEAM, INVEMAR, CORALINA, INS, Humbolt Institute. Bogota, Colombia.
- IPPC WG1 TAR, 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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jones R., M. Noguer, D. Hassell, D. Hudson, S. Wilson, G. Jenkins & J. Mitchell, 2004: Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Hadley Center for Climate Prediction and Research, UK.
- Kida, H., T. Koide, H. Sasaki & M. Chiba, 1991: A new approach to coupling a limited area model with a GCM for regional climate simulation. *J. Meteor. Soc. Of Japan* 69:723-728.
- León, G., 1998: Tendencia de la temperatura del aire en Colombia. Nota Técnica IDEAM – METEO/010-1998. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá D.C., Colombia
- León, G., J. A. Zea, J. A. Eslava, 2000: Circulación general del Trópico y la Zona de Convergencia Intertropical en Colombia. *Revista Meteorología Colombiana* No. 1. ISSN 0124-6984. Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia. 31-38pp
- Mearns L. O., M. Hulme, T.R. Carter, R. Leemans, M. Lal & P. Whetton, 2001: Climate Scenario development. In IPCC WGI TAR, 2001 (ibid).
- Michalakes, J., J. Dudhia, D. Gill, J. Henderson, J., J. Klemp; W. Skamarock & W. Wang, 2004: The weather research model: software architecture and performance. Meso-scale & Micro-scale Division. National Center for Atmospheric Research NCAR. Boulder, Colorado 80307 U.S.A.
- Mizuta, R., Oouchi, K, Yoshimura, H., Noda, A., Katayama, K., Yukimoto, S, Hosaka, M. Kusunoki, S., Kawai, H and Nakagawa M, 2005: 20km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Tsukuba, Japan.
- Morita T., J. Robinson, A. Adegbulugbe, J. Alcamo, D. Herbert, E.L. La Rovere, N. Nakicenovic, H. Pitcher, P. Raskin, K. Riahi, A. SanKovski, V. Sokolov, D. de Vries & D. Zhou, 2001: Greenhouse Gas Emission Mitigation Scenarios and implications. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ohfuchi, W., H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomot, K. Tayaka, X Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara & K. Ninomiya, 2004: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on Earth Simulator – preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator), *J Earth Simulator*, 1, 8-34.
- Pabón, D., 2005: 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. Proyecto INAP. Bogotá, Colombia.

Pabón, D., 2005: Escenarios de Cambio climático para territorio colombiano. Documento INAPPDF-B/GECC/I. Universidad Nacional de Colombia y Conservación Internacional. Bogotá, Colombia.

Pabón, D., 2010: Informe de evaluación del Cambio Climático en Colombia. Universidad Nacional de Colombia y Conservación Internacional. Bogotá, Colombia.

Ruiz, J. F., 2007: Escenarios de cambio climático, algunos modelos y resultados de lluvia para Colombia bajo el escenario A1B. Nota Técnica IDEAM – METEO/003-2007. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá D.C., Colombia

Ruiz, J. F., 2008: Implementación del Modelo WRF en el IDEAM. Nota Técnica IDEAM – METEO/003-2008. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá D.C., Colombia.

Ruiz, F. & J. Melo, 2004: Generalidades del modelo meteorológico de mesoescala MM5. Nota Técnica IDEAM-METEO/010-2004. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Bogotá, Colombia.

Ruiz, F., & M.C. Martinez, 2007: Report on Activities Performed in MRI-Japan to Simulate Climate in Colombia and the A1B Scenario with the Japanese Model using a Resolution of 20 x 20 Km. Visualizing Future Climate in Latin America: Results from the application of the Earth Simulator. Latin America and Caribbean Region Sustainable Development Working Paper 30, 43-59.

Sasaki, H., H. Kida, T. Koide and m. Chiba, 1995: The Performance of long-Term Integrations of limited area Model with Spectral Boundary Coupling Method. J. Meteor. Soc. Japan, 73 No. 2 pp. 165-181.

SURFER., 1994: Surfer for Windows – User’s Guide Contouring And 3D Surface Mapping. Golden Software, INC. Colorado, Estados Unidos

Vergara, W., 2003: Project development facility request for pipeline entry and PDF-B approval. World Bank

Wicker, L. & W. Skamarock, 2001: Time-Splitting Methods for Elastic Models Using Forward Time Schemes. Monthly Weather Review. Volume 130.

Yamagishi, Y., 2003: Introduction to the numerical weather prediction with emphasis on the application to the short term weather forecasting. Japan Meteorological Agency. Octubre 2003. Tokyo, Japan. pp 2 –11.