

CAPÍTULO 7

ALTERACIONES DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO Y DE LA OFERTA HÍDRICA POR VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO

Inundación Canal del Dique, municipio Santa Lucía-Atlántico. / G. Sopó



Autores
MAURICIO BEDOYA
CLAUDIA CONTRERAS
FRANKLIN RUIZ

ESTUDIO NACIONAL DEL
agua
2010

CAPÍTULO 7

ALTERACIONES DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO Y DE LA OFERTA HÍDRICA POR VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO

Establecer la frontera entre los conceptos *variabilidad climática* y *cambio climático* es especialmente difícil en regiones en las que se presenta una fuerte influencia de la primera en las condiciones corrientes del clima (OMM, 2009).¹ Se entiende por *cambio climático* la modificación a largo plazo de las condiciones meteorológicas medias a escala del planeta; estas condiciones pueden tener variaciones en múltiples escalas temporales (días, meses, años, etc.) y espaciales (regional o local), y pueden representar una amenaza natural, como inundaciones, sequías, olas de frío o de calor, tormentas, etcétera.²

Muchos países se han centrado en estudiar los impactos sobre posibles cambios futuros en las precipitaciones y temperaturas como consecuencia del cambio global, y una de las conclusiones se refiere a la importancia de vincular lo que sucede en la actualidad con la gestión del agua, en términos de su déficit y/o exceso, debido a la variabilidad climática natural. Es posible que, en algunas regiones, los problemas relativos fundamentalmente a la variabilidad climática dominen sobre los relacionados con el cambio climático durante un período considerable de tiempo.³ Este podría ser el caso de Colombia, en donde el efecto de la variabilidad climática natural hoy en

día suscita enormes riesgos a los sectores sociales y económicos, debido a la intensidad de los eventos que se vienen presentando.

En el marco del Estudio Nacional del Agua 2010, se analizan las alteraciones por variabilidad climática a partir del fenómeno ENSO (El Niño/Southern Oscillation), determinado por sus dos fases: El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría), dada la importancia que los efectos de este fenómeno tiene en los eventos hidrológicos extremos (sequías e inundaciones) y en la oferta hídrica del país. Asimismo, se analizan los efectos del cambio climático sobre la escorrentía media anual en las principales zonas hidrológicas, bajo predicciones de modelos regionales de clima sobre el territorio colombiano.

7.1. Variabilidad climática y el recurso hídrico en Colombia

El fenómeno ENSO es uno de los forzantes con mayor influencia sobre la variabilidad interanual del clima y del recurso hídrico en Colombia. Una gran porción del territorio es sensible a sus efectos de disminución o aumento de la oferta y de amenaza de eventos, como inundaciones y sequías. En el presente estudio, se lograron estimar anomalías promedio de caudales debidas al ENSO, sobre estaciones hidrológicas

1 Organización Meteorológica Mundial (2009). Tercera conferencia mundial sobre el clima.

2 *Ibidem*.

3 *Ibidem*.

distribuidas en el territorio nacional, operadas por el Ideam, en las temporadas de mayor efecto del fenómeno. Asimismo, se cuantificó el nivel de afectación del evento de El Niño 2009-2010 sobre los niveles de los principales ríos del país. Este análisis permite inferir las zonas hidrológicas sensibles al fenómeno y tener una medida relativa de la afectación con respecto a condiciones promedio; además, proporciona señales para que las entidades nacionales, regionales y locales de Colombia formulen políticas y estrategias de gestión y adaptación acordes con esta variabilidad climática, orientadas a lograr la sostenibilidad del recurso agua en épocas críticas. Igualmente, para épocas húmedas influidas por La Niña, es de gran importancia resaltar los riesgos relacionados con avenidas torrenciales, inundaciones y deslizamientos en poblados y vías del país. En el documento, también se presentan resultados relacionados con el impacto de La Niña sobre los niveles de ríos en Colombia en el año 2010. Los pronósticos generados por el Instituto son herramientas de alerta de gran valor para las estrategias de gestión del recurso hídrico, y de atención a riesgos y desastres.

7.1.1. El fenómeno ENSO: El Niño y La Niña

El fenómeno de El Niño consiste en un calentamiento de las aguas superficiales del Pacífico tropical oriental, localizado entre la costa de América del Sur y la línea de fecha internacional⁴ (línea de 180°, Figura 7.1), que persiste en promedio durante doce meses, con una recurrencia de 2 a 7 años. Esta anomalía oceanográfica de calentamientos sistemáticos está vinculada a cambios en las condiciones atmosféricas a

escala casi mundial. La intensidad del fenómeno depende, en gran medida, de la magnitud de las anomalías océano-atmósfera y del área cubierta por estas sobre el Pacífico tropical. El efecto climático depende de la época del año en que se presente el fenómeno. Generalmente, el mayor impacto tiene lugar entre diciembre y abril, debido a que en el Pacífico ecuatorial las temperaturas superficiales son más cálidas en esta época del año. En consecuencia, un ligero calentamiento de las aguas debido a El Niño puede resultar en una importante redistribución de las precipitaciones convectivas tropicales⁵.

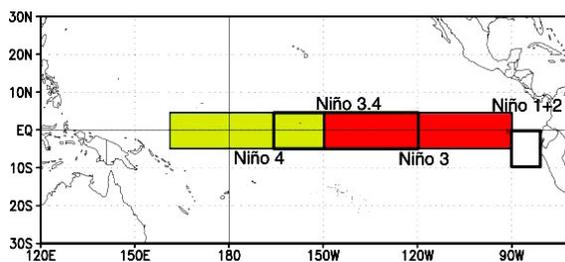


Figura 7.1. Regiones de desarrollo y monitoreo del fenómeno El Niño sobre el océano Pacífico tropical.

(Fuente: http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/nino_regions.shtml).

En condiciones normales, la superficie del mar en la zona oeste del Pacífico tropical siempre es caliente (alrededor de 29 °C), la presión atmosférica es baja, y las precipitaciones, frecuentes e intensas (Figura 7.2). Mientras en el extremo opuesto del Pacífico, unos 15.000 kilómetros al este, cerca de América del Sur, el agua es relativamente fría (21 °C a 26 °C), la presión atmosférica es alta y hay poca lluvia. En el Pacífico ecuatorial oriental, persisten aguas superficiales más frías durante todo el año, siendo más pronunciadas en verano y en otoño en el hemisferio norte, desde

4 Zona de monitoreo de temperaturas superficiales del océano Pacífico, dividida en cuatro regiones: Niño 1 (80°-90°W y 5°-10°S), Niño 2 (80°-90°W y 0°-5°S), Niño 3 (90°-150°W y 5°N-5°S) y Niño 4 (150°-160°E y 5°N-5°S).

5 Consultado en el sitio web de la **National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)**, en http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml

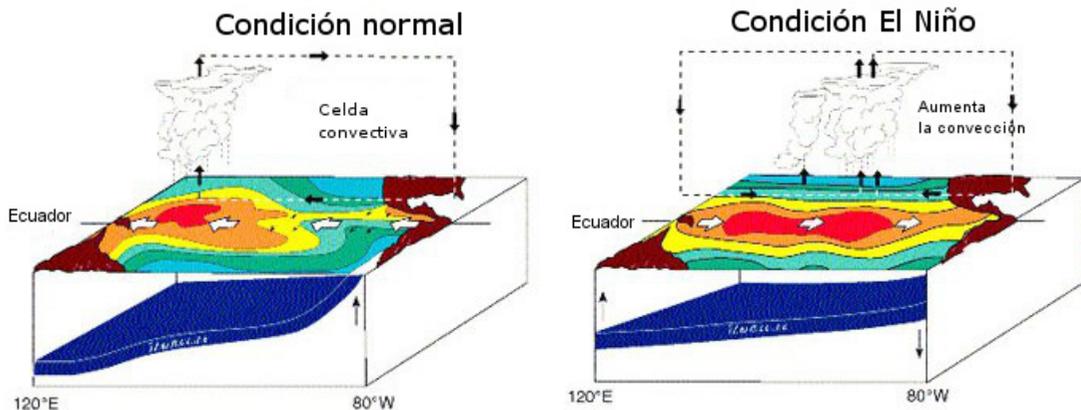


Figura 7.2. Representación de las condiciones en el océano Pacífico tropical a nivel superficial y en profundidad sobre la región de desarrollo del ENSO.

(Fuente: http://www.wrh.noaa.gov/fgz/science/el_niño.php).

julio hasta noviembre. La marcada diferencia de Este a Oeste en la temperatura del océano Pacífico está asociada con lo que se conoce como *Celda de Walker*⁶.

Sin embargo, cuando se presenta El Niño, las aguas cálidas de Asia, al final de la zona del Pacífico tropical, comienzan a dispersarse hacia el Este; y acompañando a estos cambios de temperatura, las regiones de baja presión y lluvias torrenciales también migran hacia el Este. En consecuencia, la zona central y la oriental del Pacífico se calientan y se tornan más lluviosas, mientras que en el extremo occidental del Pacífico las condiciones son más secas y frescas. El término *La Niña* se usa para designar a la oscilación de la temperatura del océano tropical en el sentido opuesto. Las características de *La Niña* son más frías que las condiciones normales en el Pacífico oriental, y más húmedas y más cálidas que las condiciones normales en el Pacífico en la zona oeste.

En resumen, el fenómeno con sus dos fases es conocido como El Niño/Oscilación del Sur⁷ y se refiere a un cambio de temperatura, nivel del mar y presión entre las zonas occidental y suroriental del océano Pacífico. Esta oscilación afecta variables climáticas a escala mundial; por ejemplo, se ha relacionado al ENSO con precipitaciones y temperaturas extremas en África, América, Australia y en algunas partes de Asia. Se ha asociado a epidemias, a variaciones en los rendimientos de los cultivos, perturbaciones de los ecosistemas, a incendios forestales y a hambrunas, entre otros.⁸

En Colombia, el fenómeno se manifiesta en forma directa sobre la Costa Pacífica colombiana, con aumentos de las temperaturas superficiales y del nivel del mar que impactan los ambientes marinos costeros de la zona. A nivel climático, El Niño tiene influencia sobre todo el territorio nacional, principalmente sobre la temperatura del aire y los patrones de precipitación, y presenta variables, como cantidad de nubosidad, radiación y brillo solar. El Niño y La Niña también perturbaban los caudales de los ríos, la humedad del

6 Corresponde a una celda de circulación atmosférica que se desarrolla sobre el Pacífico ecuatorial y que está caracterizada por un flujo hacia el Oeste en superficie (vientos alisios), ascenso en el Pacífico ecuatorial occidental, flujo hacia el Este en niveles altos de la tropósfera, y descenso (subsistencia) distribuido en toda la zona ecuatorial al Este de la región de ascenso.

7 ENSO, sigla en inglés: El Niño/Southern Oscillation.

8 Consultado en el sitio web de la US Global Change Research Information Office (GCRI), en http://www.gcric.org/CONSEQUENCES/vol5no2/article_2.html

suelo y la actividad vegetal en Colombia (Poveda et ál., 2001; Poveda et ál., 2010). Los impactos ecológicos abarcan consideraciones sobre los ecosistemas marinos y costeros del Pacífico colombiano, la estructura vegetación-suelo y los ecosistemas terrestres (por incendios, y por déficits y excesos hídricos). A nivel socioeconómico, tiene efectos sobre el sector agropecuario, la pesca, el transporte, la hidroenergía, el abastecimiento de agua para consumo humano, la salud, la navegación fluvial; sobre riesgos y desastres naturales; y sobre la población y asentamientos humanos (Ideam, 2002).

7.1.2. Índices macroclimáticos relacionados con el ENSO

7.1.2.1. Generalidades

Una clasificación de años para El Niño, La Niña y Normal se hace, por lo general, con el uso de diferentes índices océano-atmosféricos implementados por agencias climáticas, como la NOAA⁹, para realizar la evaluación de anomalías sobre registros hidroclimáticos, como series de lluvias, caudales y niveles mensuales. Poveda (2002)¹⁰ encontró correlaciones simultáneas y rezagadas representativas entre estos índices y los caudales agregados a nivel trimestral, que se interpretan como la validez estadística de la conexión entre el fenómeno ENSO y la hidrología colombiana. Los valores de correlación simultánea son altos durante el trimestre diciembre-enero-febrero, lo que indica una alta influencia del fenómeno en esta época. Los resultados no fueron tan representativos

en la zona oriental del país y fueron mayores con un trimestre de rezago, lo que muestra que el impacto de El Niño es menos intenso en esta zona y que su efecto es menos inmediato.

Los índices evaluados en este estudio son:

1. **ONI** (*Oceanic Niño Index*):¹¹ definido como la media móvil de tres meses de las anomalías en la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4.
2. **MEI** (*Multivariate Enso Index*):¹² basado en seis variables observadas sobre el Pacífico tropical: presión (P), componentes de la superficie del viento zonal (U) y meridional (V), temperatura superficial del mar (S), temperatura superficial del aire (A) y fracción de nubosidad total del cielo (C).
3. **SOI** (*Southern Oscillation Index*):¹³ medida de las fluctuaciones en la presión del aire que se producen entre las regiones occidental y oriental del Pacífico tropical, durante episodios de El Niño y La Niña.

En resumen, los índices señalados evalúan las diferentes anomalías en el océano Pacífico ecuatorial, para realizar el monitoreo y alertar sobre el desarrollo de alguna de las fases del fenómeno ENSO. El objetivo de evaluar estos índices es hallar una separación clara de años según su clasificación ENSO (El Niño, La Niña y Normal) y valorar la intensidad de los diferentes eventos.

9 National Oceanic and Atmospheric Administration, United States Department of Commerce (NOAA). Sitio web <http://www.noaa.gov>.

10 El documento se puede descargar de http://shadow.eas.gatech.edu/~choyos/Papers/Hoyos/PeerReviewedColombianJournals/Hoyos2002_ColombiaMacroClima_MetCol_man.pdf.

11 Mayores detalles en el sitio web de NOAA, en: http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml.

12 Mayores detalles en el sitio web de NOAA, en: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/people/klaus.wolter/MEI/>.

13 Mayores detalles en el sitio web de NOAA, en: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi>.

Tabla 7.1. Consenso para clasificación de diferentes fases del ENSO según índices ONI, MEI y SOI.

El Niño			La Niña			Normal o NO ENSO 1	
Débil	Moderado	Fuerte	Débil	Moderado	Fuerte		
1963-64	1951-52	1965-66	1954-55	1950-51	1955-56	1952-53	1953-54
1968-69	1957-58	1972-73	1956-57	1970-71	1973-74	1958-59	1959-60,
1969-70	1977-78	1982-83	1962-63	1998-99	1975-76	1960-61	1961-62
1976-77	1987-88	1991-92	1964-65	2000-01	1988-89	1966-67	1978-79
1986-87	1994-95	1997-98	1967-68	2007-08	2010-11	1979-80	1980-81
1992-93	2002-03	1971-72				1981-82	1983-84
2004-05	2009-10	1974-75				1985-86	1989-90
2006-07	1984-85					1990-91	1993-94
1995-96						1996-97	2001-02
1999-00						2003-04	2005-06
2008-09							

7.1.2.2. Consenso de los diferentes índices para clasificación según intensidad de las fases del ENSO

Considerando el año hidrológico¹⁴ como el comprendido entre el comienzo de junio de determinado año (Año 0) hasta el fin de mayo del siguiente (Año 1), se realizó un consenso según los índices evaluados para llegar a una clasificación de las fases del fenómeno ENSO para cada uno de los años entre 1950 y 2010. Los resultados finales se presentan en la *Tabla 7.1*.

Obsérvese que los años clasificados como El Niño en los cuales los índices están de acuerdo sobre la intensidad fuerte del fenómeno son 1965-66, 1972-73, 1982-83, 1991-92 y 1997-1998. A pesar de que el ONI califica al evento 2009-2010 como fuerte según el estándar utilizado, el MEI y el SOI lo determinan como de intensidad

moderada, por lo que, en conjunto, se determina que la intensidad del fenómeno fue moderada.

7.1.3. El ENSO y la hidroclimatología colombiana

El ENSO (El Niño y La Niña) afecta el clima del territorio nacional y tiene efectos, en particular, sobre la magnitud y los componentes del ciclo hidrológico: precipitación, escorrentía, humedad del suelo y actividad vegetal (Ideam, 2002; Poveda et ál., 2001). Asimismo, la duración y magnitud de los eventos hidrológicos extremos en las cuencas del país se ve fuertemente influida por las fases del ENSO. Los eventos de El Niño, desarrollados durante 1991-1992, 1997-1998 y en 2009-2010, están presentes por sus impactos sobre el funcionamiento normal de diversos sectores (sociales y económicos) del país, que dependen del recurso hídrico. La estimación de la oferta hídrica durante un fenómeno de El Niño está afectada por el déficit en la magnitud del ciclo anual de lluvias y el aumento consistente de las temperaturas. Por el contrario,

14 El año hidrológico no coincide necesariamente con el año sidéreo, es decir, el periodo que convencionalmente transcurre entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de un mismo año. El año hidrológico se establece para intentar reflejar adecuadamente el comportamiento de las precipitaciones y variables climáticas sobre una determinada zona hidrográfica (Poveda et ál., 2001).

durante La Niña, la oferta se ve aumentada por excesos hidrológicos. En las siguientes secciones, se ilustra este concepto claramente.

7.1.3.1 Ciclos anuales promedio de caudal para años El Niño, La Niña y normal

El fenómeno ENSO, en sus diferentes fases (El Niño y La Niña), influye de forma diferente sobre la dinámica climática según las etapas de su desarrollo. Sobre la zona de mayor influencia en Colombia, es decir, la zona occidental y central, es típicamente más intenso en los trimestres septiembre-octubre-noviembre (SON) y diciembre-enero-febrero (DEF). Para representar los ciclos de caudal en las fases El Niño y La Niña a lo largo de un año promedio, se tomaron las series de caudales mensuales procesadas durante el desarrollo del ENA-2010 y se asociaron con el análisis de los índices macroclimáticos relacionados con el fenómeno. De esta manera, se extrajeron tres muestras para el cálculo del ciclo anual promedio en cada fase del ENSO: El Niño (EN), La Niña (LN) y Normal (N), correspondientes a los periodos señalados en la *Tabla 7.1*. El resultado en estaciones representativas dentro las zonas de Catatumbo, Orinoquía, Medio Magdalena, Zona Caribe, Cauca y Alto Magdalena están referidas en la *Figura 7.3*.

El Niño (línea en rojo) tiene influencia en los caudales de los ríos analizados, especialmente en el trimestre diciembre-enero-febrero con respecto a los otros trimestres del año. Para esta época, las disminuciones pueden ser mayores del 20% con respecto a caudales promedio en años catalogados como normales en todas las zonas analizadas, a excepción de la estación ubicada en la zona de la Orinoquía (*Figura 7.3*, ciclo C), en donde las anomalías son menos severas, confirmando que los efectos de El Niño tienen mayor representatividad e inmediatez sobre el Occidente que sobre el Oriente del país (Poveda et ál., 2010). En

general, los registros de estaciones localizadas en la Orinoquía presentan este comportamiento, con reducciones que oscilan entre 5% y 15%.

Asimismo, sobre la cuenca del río Cauca se presentan anomalías significativas, como las representadas para el río San Juan (departamento de Antioquia), en límites con la zona hidrológica del Pacífico en la *Figura 7.3*, ciclo F. Obsérvese la magnitud de las reducciones para el trimestre DEF que alcanzan el orden de 29% con respecto a años normales, mientras que para La Niña los aumentos alcanzan el 40% para los meses de agosto y septiembre.

7.1.3.2. Análisis de anomalías promedio sobre caudales para eventos de El Niño en el trimestre diciembre-enero-febrero

Con base en el análisis anterior y usando la información de los mismos registros, se calculó la anomalía en caudales para los meses en promedio de años El Niño (EN) con respecto a años Normales, de la siguiente manera para cada mes del ciclo anual promedio:

$$\text{Anomalía Caudales EN}_{\text{mes } i} = \left(\frac{Q_{\text{medio El Niño mes } i} - Q_{\text{medio Normal mes } i}}{Q_{\text{medio Normal mes } i}} \right) * 100$$

Posteriormente, se estimó y se cartografió el promedio de estas anomalías para los meses diciembre-enero-febrero, dado que la reducción en caudales para este trimestre asociada a eventos de El Niño resulta ser más representativa con respecto a la estimada para el resto de trimestres. En esta época, se presentan las condiciones más secas en gran porción del territorio y, al coincidir con el desarrollo de El Niño, se potencian las afectaciones sobre el recurso hídrico. En la *Figura 7.4*, los colores se vinculan con el valor de la anomalía en el trimestre DEF para 180 estaciones hidrológicas, con información validada estadísticamente en la que se estimó este valor.

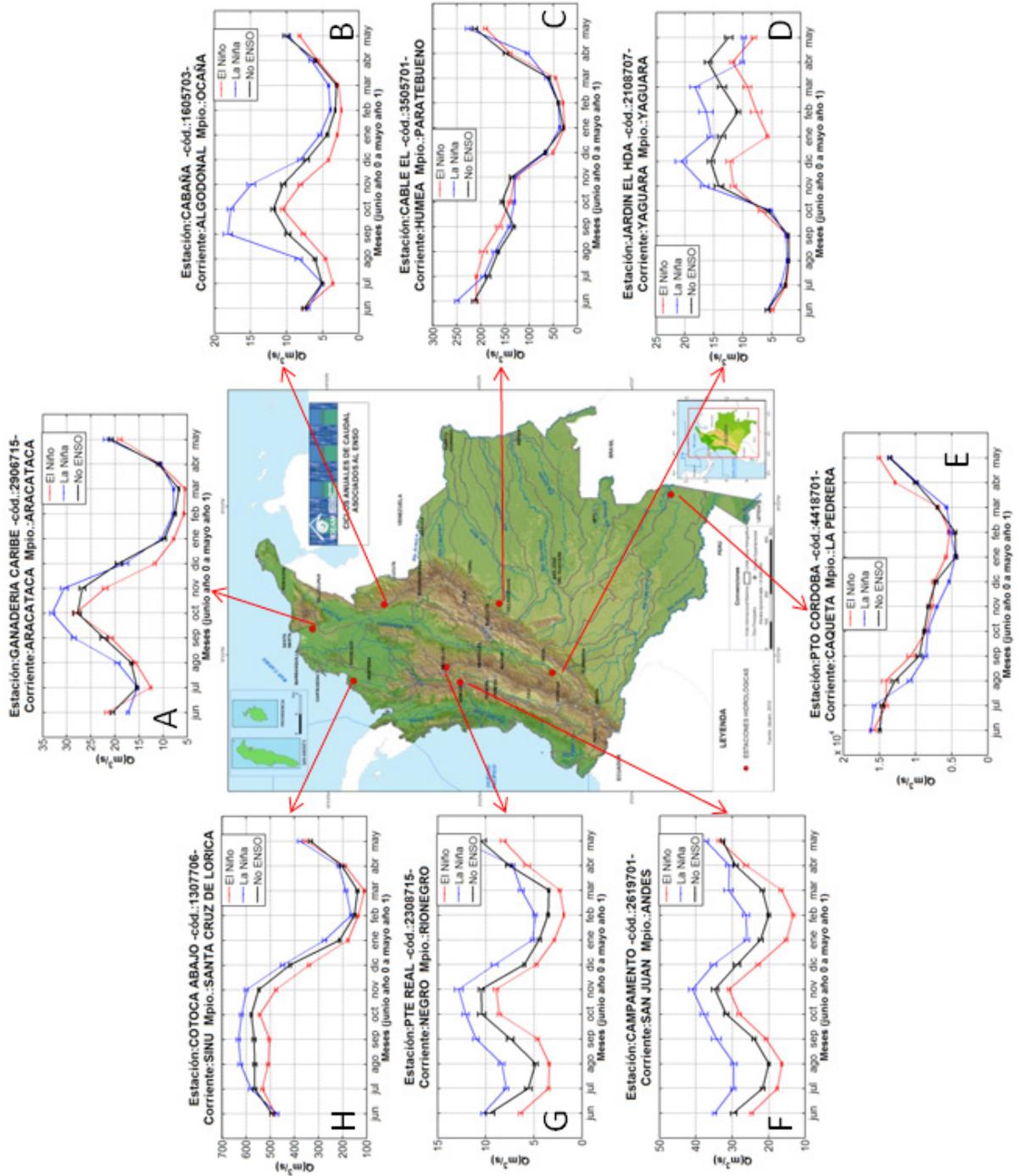
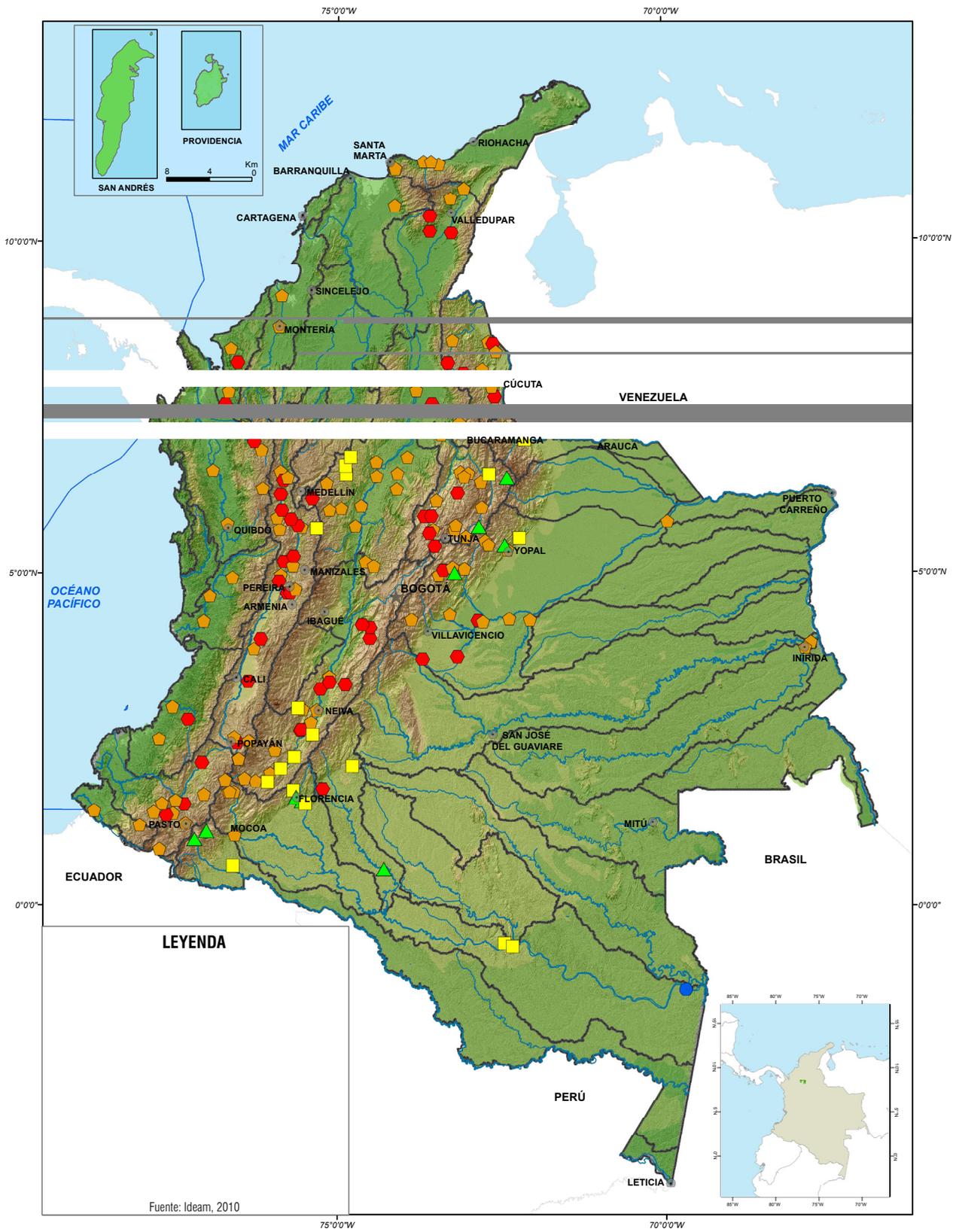


Figura 7.3. Ciclos anuales promedio para El Niño (en rojo), La Niña (en azul) y Normal (en negro) para estaciones representativas, por regiones hidrológicas: A. Bajo Magdalena, río Aracataca; B. Zona Catatumbo, río Algodonal; C. Orinoquía, río Humea; D. Alto Magdalena, río Yaguara; E. Amazonía, río Caquetá; F. Zona del Cauca, río San Juan; G. Zona Medio Magdalena, río Negro; H. Zona Sinú, río Sinú. En el encabezado de cada gráfica se presenta el código y municipio de ubicación. Las barras de error representan el error estándar sobre la estimación del promedio mensual.



En rojo, se representan disminuciones entre 30% y 50% con respecto al promedio del trimestre de caudales de años Normal o No ENSO (condición más crítica); en amarillo, disminuciones entre 10% y 30%; en verde claro, disminuciones entre 0% y 10%; y en azul, al contrario, se esquematizan incrementos entre 0% y 10%.

Los resultados permiten inferir que El Niño tiene efectos sobre la hidrología colombiana, con reducciones significativas (hasta del 40%) en la oferta del trimestre DEF para algunas zonas del país, uno de los más secos en promedio sobre el territorio. Según este análisis, en la zona del Pacífico las disminuciones son del 20% para ríos como el Atrato y el San Juan. A partir de los registros en estaciones sobre la zona del Patía, se estimaron disminuciones del 40% con respecto a años normales. Para los ríos León, Carepa, Grande y Mulatos, en el Urabá antioqueño, se presentan anomalías entre el 30% y el 40%.

Asimismo, sobre la cuenca del río Cauca, las disminuciones son significativas y los valores críticos van desde el río Palacé, en el alto Cauca, con reducciones de 23%, pasando por el río Tuluá con 33%, hasta la estación La Coquera sobre el bajo Cauca, donde las anomalías promedio son del 26%. También, en promedio para eventos de El Niño, son críticas las condiciones en la zona del Cesar, sobre las estaciones operadas por el Ideam en los ríos Ariguaní, Jobo y Mariangola, donde se estiman reducciones entre 18% y 46%. Igualmente, sobre las estaciones analizadas en la Sierra Nevada de Santa Marta, las reducciones están entre 10% y 30%.

En la zona del Catatumbo, la condición es similar; para el río Pamplonita, las anomalías son del 30%. Sobre la cuenca del río Sogamoso, el impacto de El Niño sobre los caudales en el trimestre DEF causa reducciones hasta del 30%, como en el río Suárez,

sobre los registros de la estación Puente Nacional. En estaciones ubicadas sobre el río Sumapaz, en la zona hidrológica del Alto Magdalena, las disminuciones son coherentes y tienden hacia el 40% con respecto al promedio de años normales. Sobre el río Cabrera, en esta misma zona, las reducciones son del 34%. En las estaciones del Alto Magdalena, en la ladera oriental, las disminuciones en corrientes como Guarapas y el mismo río Magdalena están entre 0% y 10%; lo mismo sucede sobre la zona de la Orinoquía, donde los impactos sobre la oferta media no son tan representativos en este trimestre como lo son en la zona Andina.

En resumen, se puede afirmar que el área hidrológica Magdalena-Cauca presenta las mayores disminuciones por efecto de eventos de El Niño; se estima una reducción promedio de 26%, con respecto a los años clasificados como Normal, sobre las 94 estaciones analizadas en esta área. En especial, la cuenca del Cauca presenta reducciones importantes en los caudales a la altura de la cuenca media, con una reducción promedio de 38% para el trimestre DEF en 18 estaciones hidrológicas operadas por el Ideam en la región. Igualmente, la hidrología de la zona del Pacífico y del Caribe es sensible a los efectos de El Niño.

7.1.3.3. Análisis de anomalías promedio sobre caudales para eventos de La Niña en el trimestre septiembre-octubre-noviembre

Igualmente, se estimó la anomalía en promedio para cada mes debida a efectos de La Niña (LN) bajo la siguiente ecuación:

$$\text{Anomalía Caudales LN}_{mes i} = \left(\frac{Q_{\text{medio La Niña mes } i} - Q_{\text{medio Normal mes } i}}{Q_{\text{medio Normal mes } i}} \right) * 100$$

Se siguió el mismo procedimiento desarrollado en el análisis de anomalías en caudales debidas a El Niño, promediando, en este caso, sobre el trimestre septiembre-octubre-noviembre, debido a que para esta época el modo húmedo en precipitación influye en el desarrollo de caudales altos en la zona Andina, Caribe y Pacífica del país, que son potenciados por el efecto de La Niña. Impactos de la misma magnitud están asociados al trimestre marzo-abril-mayo, también de carácter húmedo. Los resultados sobre las 180 estaciones analizadas se presentan en la *Figura 7.5*.

En rojo, se representan aumentos mayores del 60% en el trimestre septiembre-octubre-noviembre (SON) con respecto al promedio del trimestre de caudales de años Normal o No ENSO. Estas serían las estaciones que representan la condición más crítica; en amarillo, aumentos entre 40% y 60%; en verde claro, aumentos entre el 20% y el 40%; en azul claro, entre 0% y 20%. En azul oscuro, se esquematizan las condiciones de no cambio o posibles disminuciones, aunque en ningún caso sobrepasaron el 10%.

Según este análisis, la Orinoquía es la menos afectada en este trimestre bajo el efecto de La Niña. La mayor sensibilidad al fenómeno en esta zona se observa en las estaciones hidrológicas ubicadas en el piedemonte, sobre todo las que se encuentran en la parte alta de la cuenca del río Meta. En las estaciones ubicadas en las áreas hidrológicas Magdalena-Cauca, Caribe y Pacífico, se registran las mayores afectaciones. Específicamente, se observan aumentos que superan el 60%, con respecto al promedio, sobre la cuenca media del río Cauca. Tal es el caso del río Chinchiná, a los 800 msnm, en donde los aumentos para este trimestre debidos al efecto de La Niña alcanzan el 68% con respecto al promedio de caudales de años normales. De modo coherente, en el río Risaralda, a los 920 msnm, los aumentos en promedio se estiman en 58%. Obsérvese en el mapa que

los puntos en rojo (aumentos mayores al 60%) y naranja están concentrados en esta zona del Cauca.

De la misma manera, los aumentos son considerables en la zona del Medio Magdalena y en el río Sumapaz, que registra ser altamente sensible (aumentos del 20 al 40%) al fenómeno en las diferentes estaciones hidrológicas ubicadas en la cuenca. La zona del Catatumbo presenta también importantes aumentos en las estaciones en las que el Ideam realiza monitoreo en la actualidad. Por ejemplo, sobre el río Algodonal (municipio de Ocaña), a la altura de la estación Cabaña (1220 msnm), se estimaron aumentos promedio de 58% con respecto a años normales para el trimestre SON. Para el río Patía, en estaciones a los 2920 msnm y 700 msnm, se evidenció un aumento considerable del caudal, que alcanzó valores hasta del 60% en ambas alturas. Por último, en las estaciones sobre la zona del Alto Magdalena se observaron aumentos hasta del 20%, valores que no son tan representativos con relación a lo que sucede en el resto de la cuenca, posiblemente debidos a la influencia climática que la zona amazónica tiene sobre la zona oriental del Alto Magdalena.

En resumen, se encontraron aumentos promedio significativos en el trimestre SON con respecto al promedio de años catalogados como normales en las 180 estaciones hidrológicas de análisis para este estudio. Los aumentos son considerables sobre la cuenca del río Cauca, río Patía, río Sumapaz y del río Sogamoso. Asimismo, las zonas hidrológicas del Caribe, Catatumbo y Medio Magdalena resultan ser altamente sensibles durante este trimestre a eventos de La Niña. El significado de estas anomalías promedio resume la posible ocurrencia de fenómenos extremos asociados a altos caudales, por lo que se llama la atención sobre estos resultados para que sean incorporados en la planificación y gestión del riesgo asociado a este tipo de eventos en Colombia.

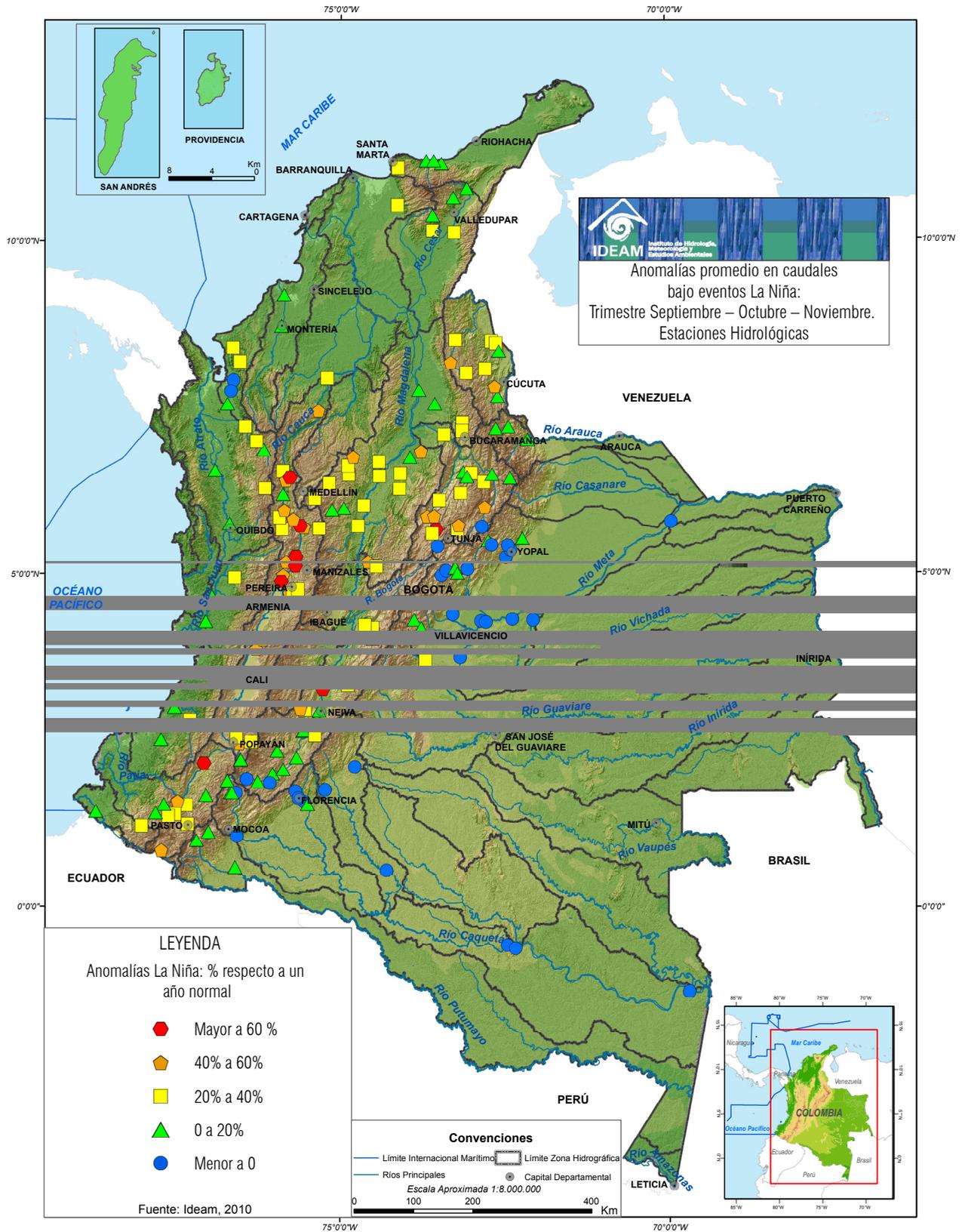


Figura 7.5. Anomalías en caudales para el trimestre septiembre-octubre-noviembre debidas al efecto de La Niña sobre 180 estaciones de la red hidrológica del Ideam en el país (periodo 1974-2008).

7.1.4. Impactos sobre los niveles de los principales ríos de Colombia durante el evento de El Niño 2009-2010

Durante el año hidrológico 2009-2010 se presentó un evento de El Niño, que afectó de manera significativa la dinámica climática promedio del país y generó condiciones secas extremas en algunas regiones. Con el objetivo de estimar los impactos sobre el recurso hídrico debidos a la ocurrencia de este fenómeno, se utilizaron los registros de niveles diarios durante el período 2009-2010 (promediados a escala mensual), en estaciones hidrológicas automáticas operadas por el Ideam sobre las principales cuencas del país: Magdalena, Cauca y Orinoquía, y se contrastaron con relación a niveles promedio mensuales multianuales, medios, mínimos y máximos, calculados para un período mínimo de 20 años.

7.1.4.1. Datos y aspectos metodológicos

La información con la que se realizó este análisis proviene de estaciones hidrológicas automáticas operadas por el Ideam, que registraron valores de nivel para el periodo que va de enero de 2009 a agosto de 2010, y de las series históricas recolectada por el Ideam en las mismas estaciones para extraer promedios mensuales multianuales, de niveles máximos, medios y mínimos.

Como paso inicial, se agregó toda la información que se encontraba a escala diaria disponible desde enero del 2009 hasta agosto del 2010, en promedios mensuales. Se usó el criterio de estimar estos valores para aquellos meses con más de 20 días de registro para todas las estaciones analizadas. Posteriormente, se superpusieron estos datos con los valores promedio máximos, medios y mínimos mensuales, y se graficaron a nivel espacial para evaluar las tendencias de

esta variable en cuencas representativas del país. El tipo de gráfico obtenido se muestra en la Figura 7.6. Los niveles máximos mensuales multianuales son representados con azul; los niveles medios mensuales multianuales, con verde; los mínimos mensuales multianuales, con rojo; y los niveles promedio mensuales desde junio de 2009 hasta mayo de 2010 se representan en color negro.

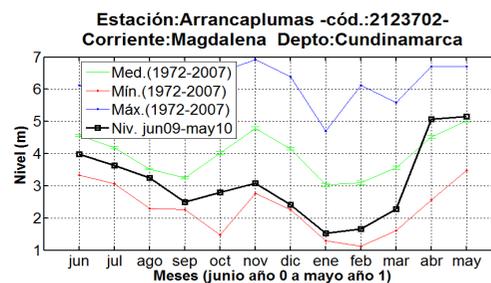


Figura 7.6. Esquema comparativo de niveles promedio máximo (en azul), niveles medio (en verde) y niveles mínimo (en rojo) con relación a niveles promedio mensuales, en el periodo que comprende desde inicios de junio de 2009 hasta finales de 2010 (en negro).

La construcción de estos gráficos permitió espacializar la comparación del comportamiento de los niveles de los ríos afectados por El Niño 2009-2010 con respecto a los ciclos promedio, para estimar diferencias entre ambos e identificar la coherencia de la afectación a nivel regional. Asimismo, se busca contrastar el comportamiento de los niveles 2009-2010 con respecto a niveles medios mensuales mínimos para evaluar qué tan intensa fue la caída de los niveles con relación a las condiciones secas históricas promedio, presentadas en los ríos del análisis.

7.1.4.2. Impacto en los niveles de los ríos por El Niño 2009-2010

La comparación de los niveles promedio mensuales multianuales máximos, medios y mínimos versus los niveles promedio mensuales, desde junio del 2009 hasta mayo del 2010, sobre estaciones en el río

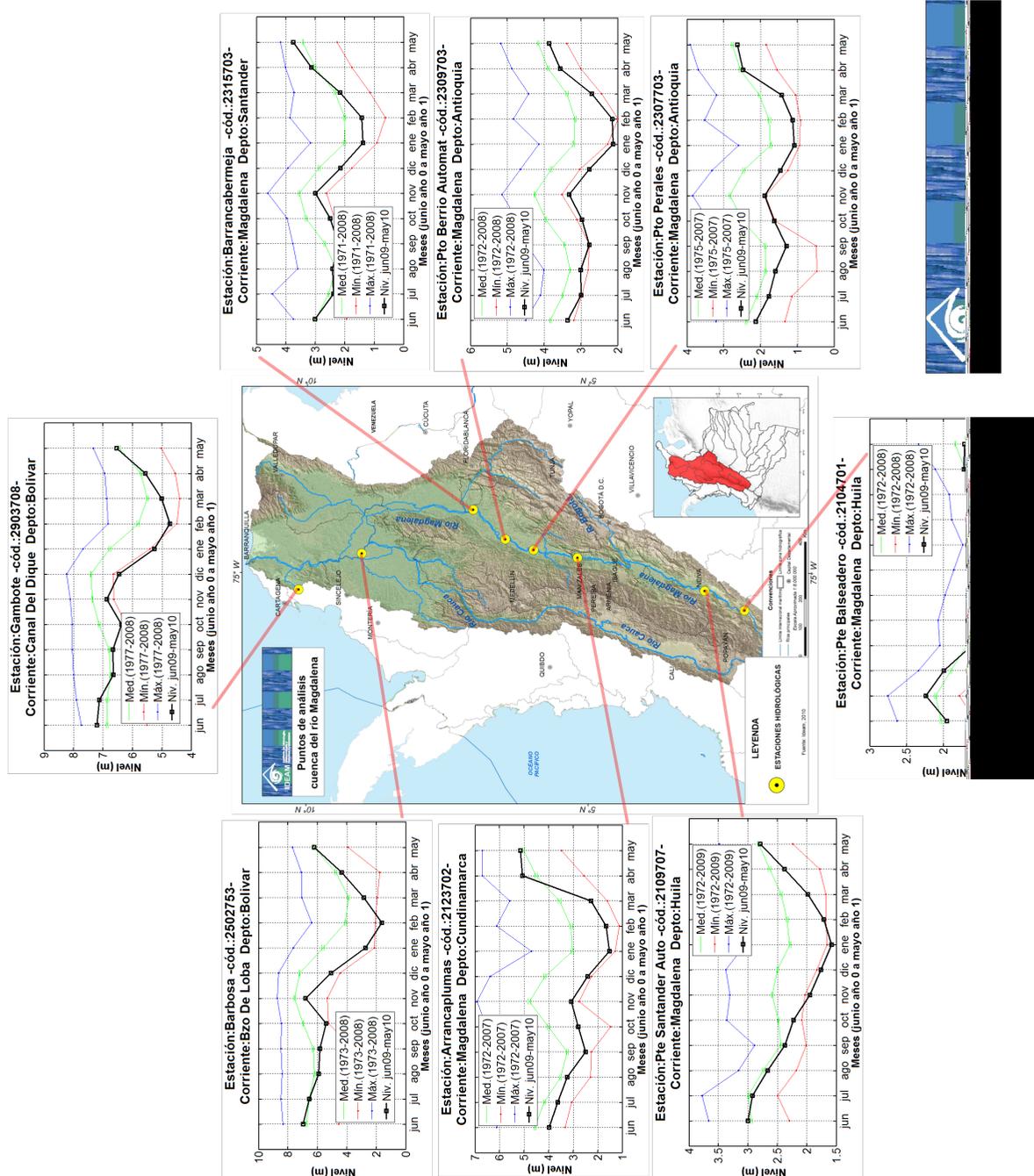


Figura 7.7. Ciclo anual de niveles máximos (en azul), medios (en verde) y mínimos (en rojo) con respecto a caudales mensuales promedio en el año 2009-2010, para estaciones sobre la cuenca del río Magdalena.

Magdalena se encuentran en la Figura 7.7. En general, el ciclo promedio anual en esta cuenca tiene un carácter bimodal, con máximos en los meses de abril-mayo y

octubre-noviembre. Los niveles mínimos se presentan en los meses de enero-febrero-marzo, durante el primer semestre del año; y en los meses de junio-julio, para el

segundo semestre; esto se debe, principalmente, al doble paso de la Zona de Convergencia Intertropical sobre el territorio colombiano.

Sobre la cuenca del río Magdalena, en el trimestre comprendido entre diciembre del 2009 y febrero del 2010, se registraron los valores de nivel más críticos,

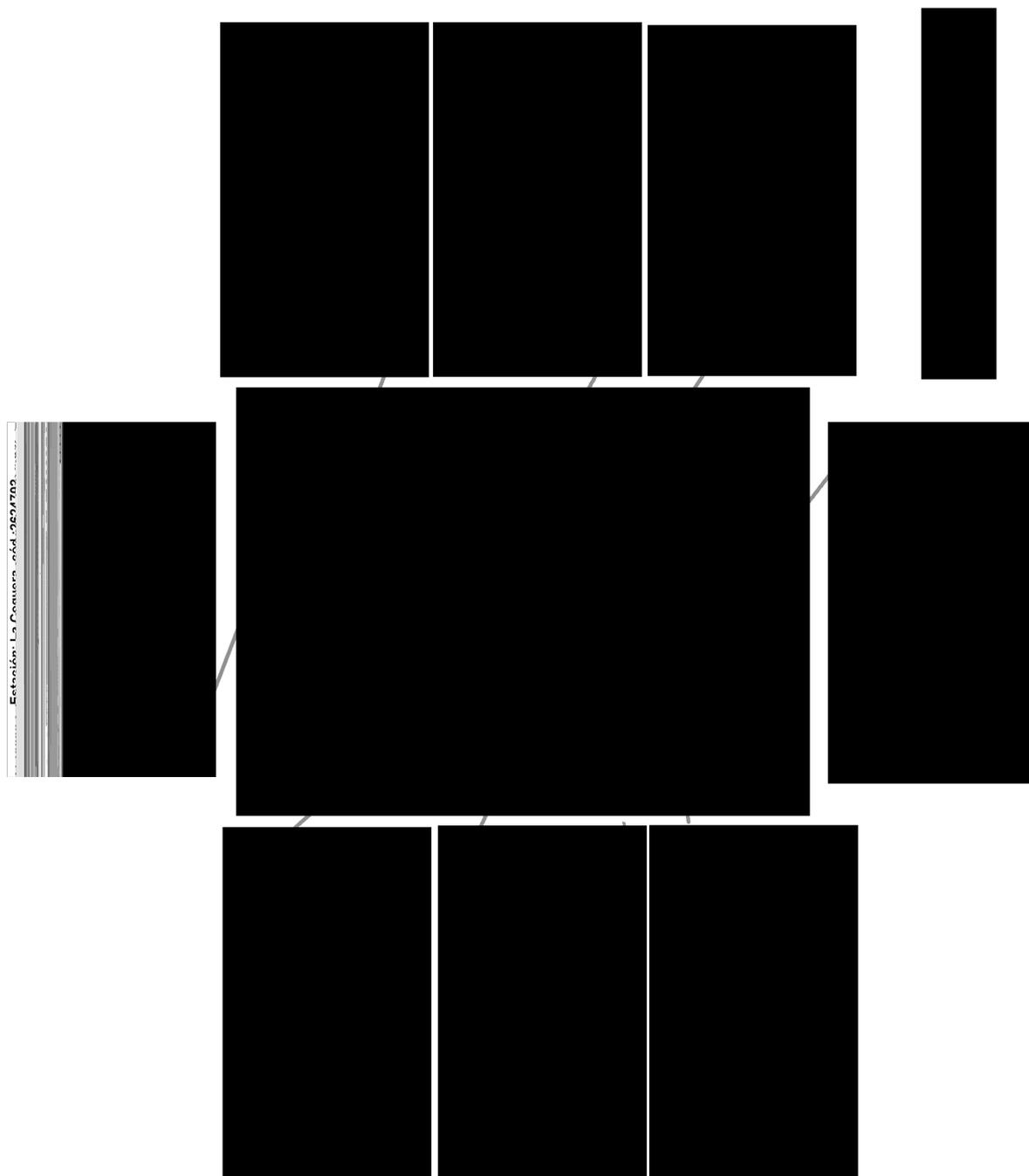


Figura 7.8. Ciclo anual de niveles máximos (en azul), medios (en verde) y mínimos (en rojo) respecto a caudales mensuales promedio en el año 2009-2010, para estaciones sobre la cuenca del río Cauca.

que alcanzaron reducciones hasta del 50% con relación al promedio en las estaciones de Arrancaplumas (municipio de Guaduas) y Barbosa en el municipio de Magangué; y, en general, presentaron valores promedios mensuales al mismo nivel de los mínimos promedio multianuales, en estaciones hidrológicas como Puerto Santander y Puente Balseadero (municipio El Agrado), en el Alto Magdalena. En el mes de enero de 2010, se estimó una reducción media en niveles de $-36\% \pm 3\%$ para las estaciones utilizadas. El mes de enero de 2010 fue el más crítico para los niveles en la cuenca como consecuencia de El Niño y la temporada seca promedio dentro del ciclo anual.

A lo largo de la cuenca del río Magdalena, se observa un comportamiento generalizado y coherente de los registros en el período de evaluación (2009-2010). En los meses de julio y agosto de 2009, la transición hacia el evento de El Niño comenzó a percibirse en los niveles. Asimismo, para los meses de marzo-abril de 2010, los niveles en la cuenca comenzaron a incrementarse hacia los promedios multianuales, dándose finalización al evento y su influencia en los niveles de los principales ríos de Colombia.

En la cuenca del río Cauca, al igual que en la del Magdalena, el ciclo promedio anual es de carácter bimodal, con niveles máximos en abril-mayo y octubre-noviembre. El comportamiento de los niveles 2009-2010 presenta las mismas particularidades exhibidas sobre el río Magdalena: disminuciones de niveles debidas al efecto de El Niño en el trimestre DEF, con reducciones medias en niveles del 33% (Figura 7.8). El segundo modo del ciclo anual de niveles en 2009 se debilitó fuertemente con respecto al promedio. Por ello, a partir del mes de octubre de 2009, los niveles registrados exhibieron la misma magnitud que los niveles mínimos promedio multianuales y, en algunas estaciones, estuvieron por debajo, como en el caso de las estaciones Juanchito y la Balsa en los

municipios de Candelaria y Buenos Aires respectivamente (Figura 7.8).

Se puede afirmar que el comportamiento de los niveles de las estaciones en el río Cauca es coherente y regionalizado durante el intervalo analizado. Gráficamente se observa, en la forma de la curva de niveles mensuales 2009-2010, la tendencia decreciente desde junio del 2009 respecto a niveles promedio y el ligero aumento para los meses octubre-noviembre; la caída de los niveles para el trimestre DEF y la tendencia creciente de los niveles a la altura del promedio a partir del mes de marzo de 2010. Obsérvese que el área incluida entre la curva en verde (niveles medios) y la curva en negro (niveles registrados en el 2009-2010) representa la magnitud de la reducción durante el periodo de análisis y que, en efecto, los meses de inicio y final son junio del 2009 y mayo del 2010, respectivamente (año hidrológico). Estas anomalías son más significativas para estaciones como las de La Virginia, La Victoria y Cartago, sobre el Medio Cauca, respecto a las estaciones ubicadas en el Bajo Cauca. Las reducciones en los niveles sobre la cuenca del río Cauca fueron las más intensas con relación a las demás áreas evaluadas.

7.1.4.3. Efectos de El Niño 2009-2010 sobre los niveles de los ríos colombianos, en relación con eventos anteriores

A partir del ejercicio desarrollado en la sección 7.1.2.2 para diferenciar los eventos de El Niño de acuerdo a sus intensidades, con base en índices macroclimáticos (Tabla 7.1), se superpusieron las curvas de niveles medios mensuales para el evento 2009-2010 (en rojo) con los eventos catalogados como fuertes: 1982-1983 (en verde), 1991-1992 (en negro) y 1997-1998 (en azul). Los eventos se graficaron por año hidrológico, desde inicios de junio del año 0 hasta finales de mayo del año 1, para representar de una

manera más adecuada la época de desarrollo del fenómeno y visualizar impactos en épocas críticas (trimestre DEF).

Para las estaciones Puente Balseadero y Puente Santander (Alto Magdalena), Puerto Berrío (Medio Magdalena) y Calamar (Bajo Magdalena), los niveles 2009-2010 para los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero (los más críticos) presentan valores muy cercanos a los del periodo 1997-1998 (Figura 7.9).

En las estaciones Puerto Berrío y Puente Santander, los niveles 2009-2010 incluso fueron más bajos comparados con los presentados durante El Niño 1997-1998 para los meses nov.-dic.-ene.-feb., y alcanzaron mínimos históricos. Este comportamiento es particular, dado que se esperaba que, al ser un fenómeno de

menor intensidad, debería tener un menor efecto sobre esta variable. En general, los efectos de los eventos 1982-1983 y 1991-1992 fueron menos pronunciados respecto a los eventos 1997-1998 y 2009-2010.

En la cuenca del río Cauca, los resultados son coherentes con el comportamiento en el río Magdalena. Los niveles alcanzaron mínimos históricos para las estaciones La Victoria y Virginia, sobre el río Cauca, para el mes de diciembre de 2009. En el río La Vieja, estación Cartago, las condiciones son más críticas que las del 1997-1998, para los meses de diciembre a marzo. Sobre el río Cauca, al nivel de la estación Las Varas (departamento de Bolívar), el impacto sobre los niveles del evento 1997-1998 fue mayor que en el 2009-2010; los niveles no presentaron condiciones tan críticas recientemente (Figura 7.10).

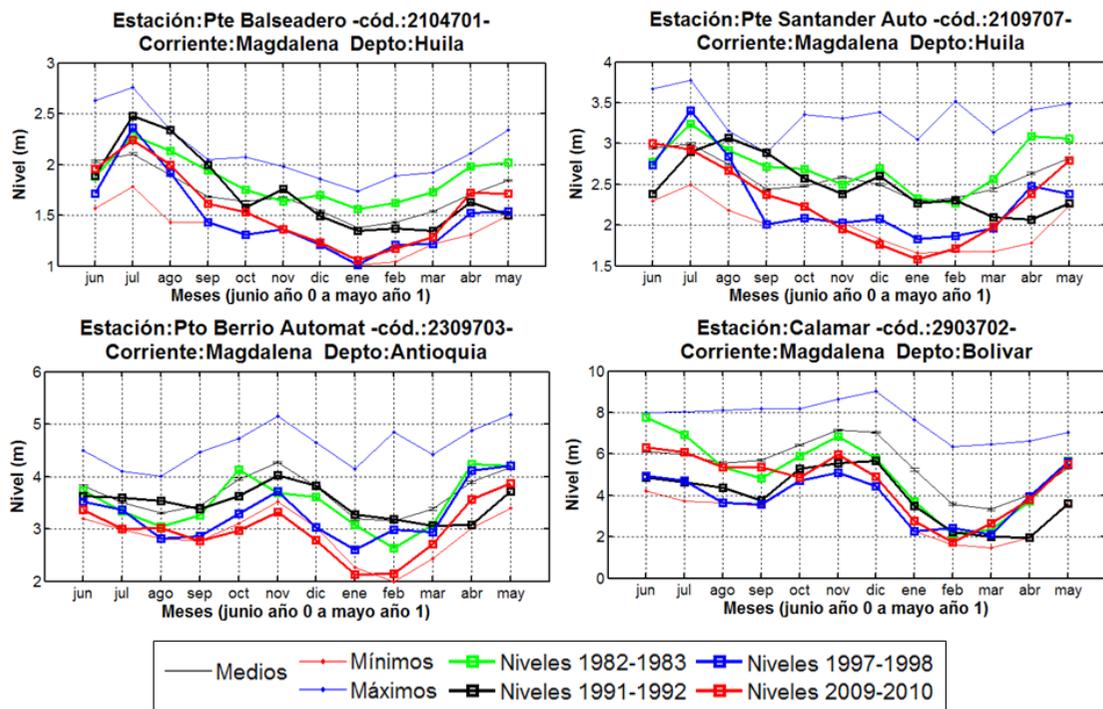


Figura 7.9. Comparación de niveles mensuales promedio para los eventos 1982-1983, 1991-1992, 1997-1998 y 2009-2010, en estaciones sobre el río Magdalena.

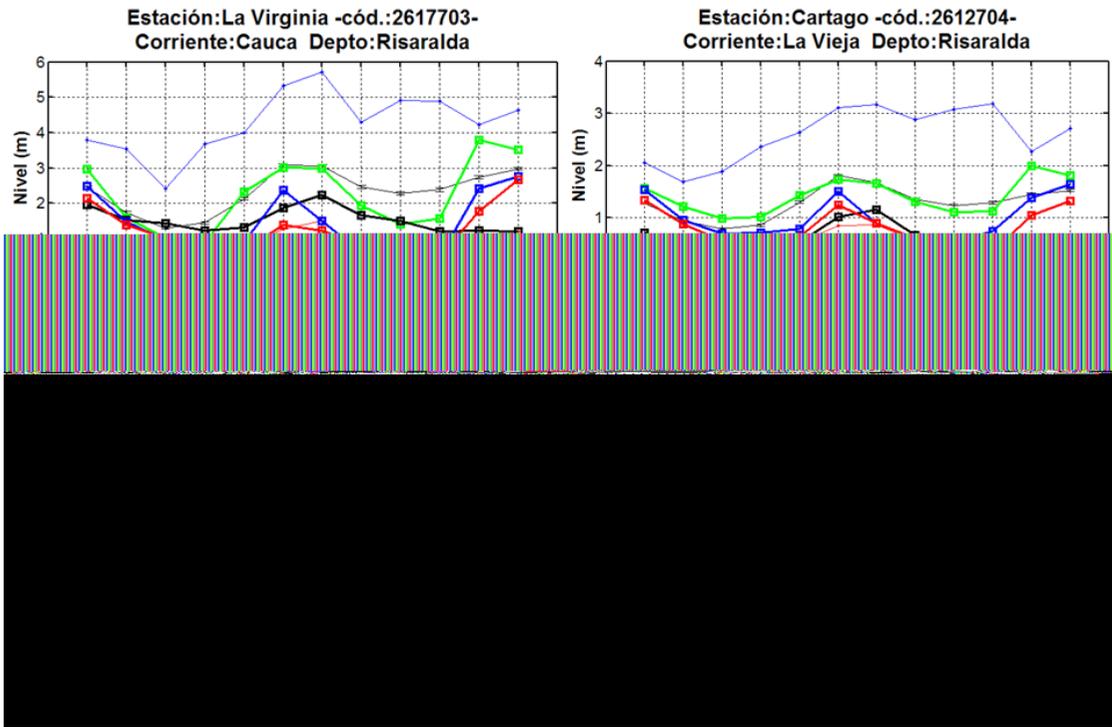


Figura 7.10. Comparación de niveles mensuales promedio para los eventos 1982-1983, 1991-1992, 1997-1998 y 2009-2010 en estaciones sobre el río Cauca.

Figura 7.11. Comparación de niveles mensuales promedio para los eventos 1982-1983, 1991-1992, 1997-1998 y 2009-2010 en estaciones sobre el Orinoco.

Para la cuenca de la Orinoquía, los niveles en 2009-2010 son más críticos respecto a los registrados en los eventos anteriores para las estaciones analizadas (*Figura 7.11*).

Sobre la red de medición del río Meta, en las estaciones Puerto Rico y Puente Lleras, los niveles alcanzaron mínimos significativos para el trimestre diciembre-enero-febrero. Según la información hidrológica analizada, el impacto del evento 2009-2010 sobre la zona Orinoquía fue considerable con relación a otros eventos.

7.1.5. Impactos del evento de La Niña 2010 sobre los niveles de los principales ríos de Colombia

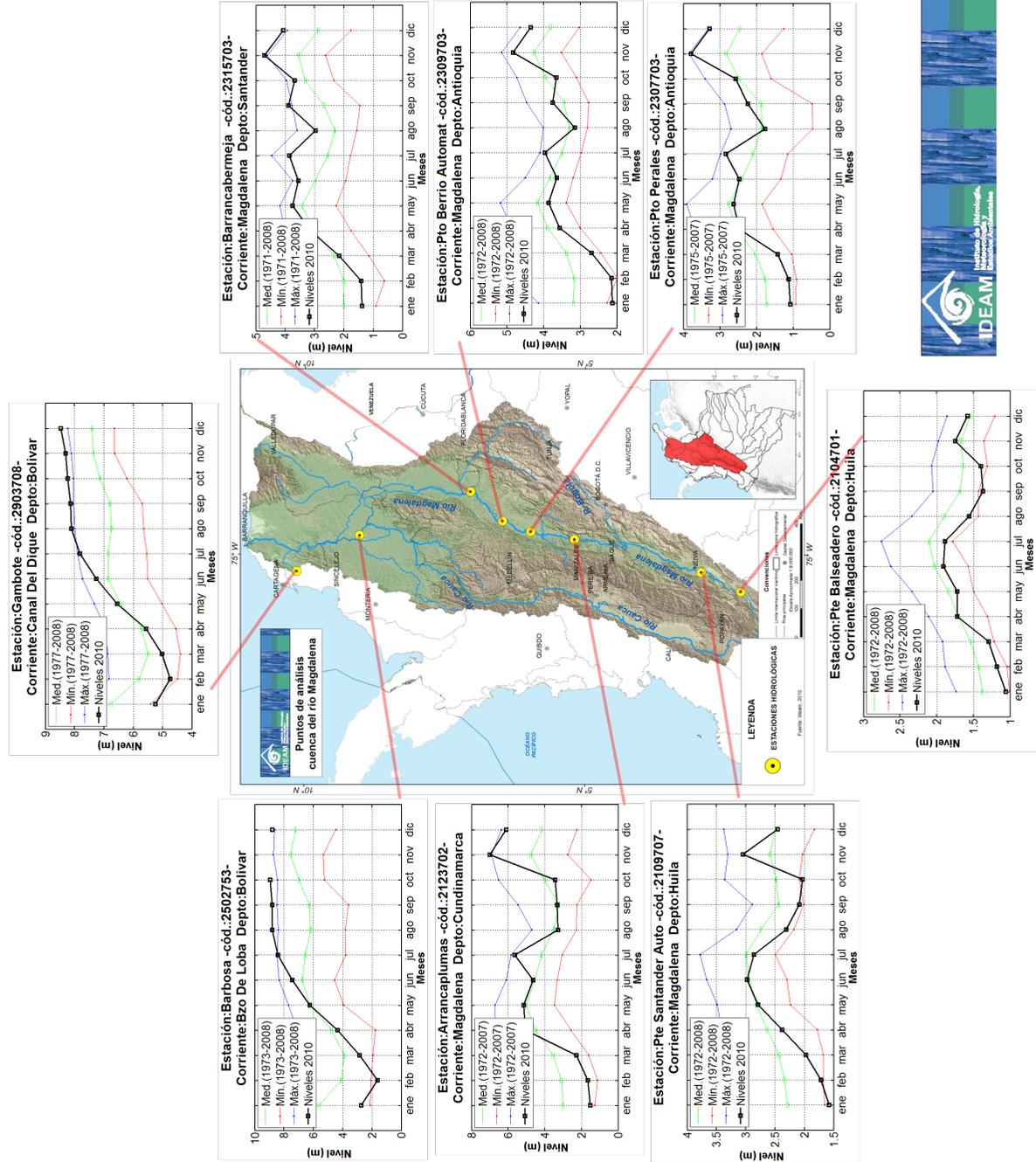
Según el Ministerio del Interior,¹⁵ debido a la influencia de La Niña sobre el clima y los excesos de precipitación asociados, el balance aproximado de los impactos, para finales del año 2010 en Colombia, fue de 267 heridos, 62 desaparecidos, 2.155.386 personas afectadas, 3.173 viviendas destruidas y 310.351 viviendas dañadas. Asimismo, se registró que las regiones en peor situación eran Bolívar, Magdalena, Atlántico, La Guajira, Córdoba, Sucre y Cesar, en el norte; Chocó y Antioquia, en el noroeste; y Valle del Cauca, en el oeste del país.

Dentro del Estudio Nacional del Agua 2010 se realizó una aproximación a los impactos del evento de La Niña durante el año 2010: se estimaron registros de niveles mensuales durante el período enero-noviembre 2010 (simbolizados en línea negra) y se contrastaron con niveles promedios mensuales multianuales medios (línea en verde), mínimos (línea en

rojo) y máximos (línea en azul). Es importante anotar que las oscilaciones climáticas durante el año 2010 resultaron ser severas sobre las zonas del país con mayor influencia del fenómeno ENSO (Andina, Pacífica, Caribe), lo que dinamizó los niveles desde los más mínimos hasta los más altos registrados históricamente en algunos puntos de medición, como en el caso de los registros en la estación hidrológica Cartago sobre el río La Vieja, en la zona del río Cauca. Obsérvese que durante el trascurso del año 2010 se presentó una rápida transición entre un evento de El Niño y un evento de La Niña.

El comportamiento de los niveles sobre la cuenca del río Magdalena durante el año 2010 está reflejado en la *Figura 7.12* para las estaciones Puente Balseadero, Puente Santander, Arrancaplumas, Puerto Perales, Puerto Berrío, Barrancabermeja, Barbosa y Gambote, a lo largo del Alto, Medio y Bajo Magdalena. A partir de allí, se generaliza la condición seca para el mes de enero del 2010 (niveles cercanos a los mínimos representados en rojo), relacionada con el impacto del fenómeno de El Niño que presentaba su máximo desarrollo para esta época. Para los meses de febrero y marzo, los niveles registrados en los diferentes puntos en la cuenca transitaban hacia la condición promedio (línea verde) hasta junio, mes a partir del cual se dispararon de manera significativa hacia los máximos (línea en azul), especialmente en las estaciones localizadas en el Medio y Bajo Magdalena, en donde se percibieron los mayores aumentos registrados en los niveles (estaciones Barrancabermeja, Gambote y Barbosa sobre los departamentos de Santander y Bolívar). Mientras tanto, en el Alto Magdalena, sobre estaciones como Puente Balseadero, representativa del río Magdalena en esta zona, el aumento de los niveles no fue tan pronunciado y estos se mantuvieron alrededor de los medios (línea verde), debido a la influencia del régimen climático del piedemonte amazónico. El aumento adquirió significancia a partir de octubre de

15 Consultado en enero de 2011 en la página web del Ministerio del Interior y de Justicia: <http://www.mij.gov.co>.



2010, con un nivel ligeramente superior con respecto al promedio multianual para el mes de noviembre. De igual manera, se puede generalizar la considerable

anomalía positiva en nivel (aumentos) para todas las estaciones en el mes de noviembre en los departamentos del Huila, Cundinamarca, Antioquia,

Figura 7.12. Ciclo anual de niveles máximos (en azul), medios (en verde) y mínimos (en rojo), respecto a caudales mensuales promedio en el año 2010 para estaciones sobre la cuenca del río Magdalena.

Santander y Bolívar. El comportamiento exacerbado de los niveles en la zona del Bajo Magdalena podría estar asociado al exceso de escorrentía generado en

las partes alta y media de la cuenca que transitó hasta esta zona y que sobrepasó sus límites de amortiguación, la que posiblemente se ha visto disminuida por

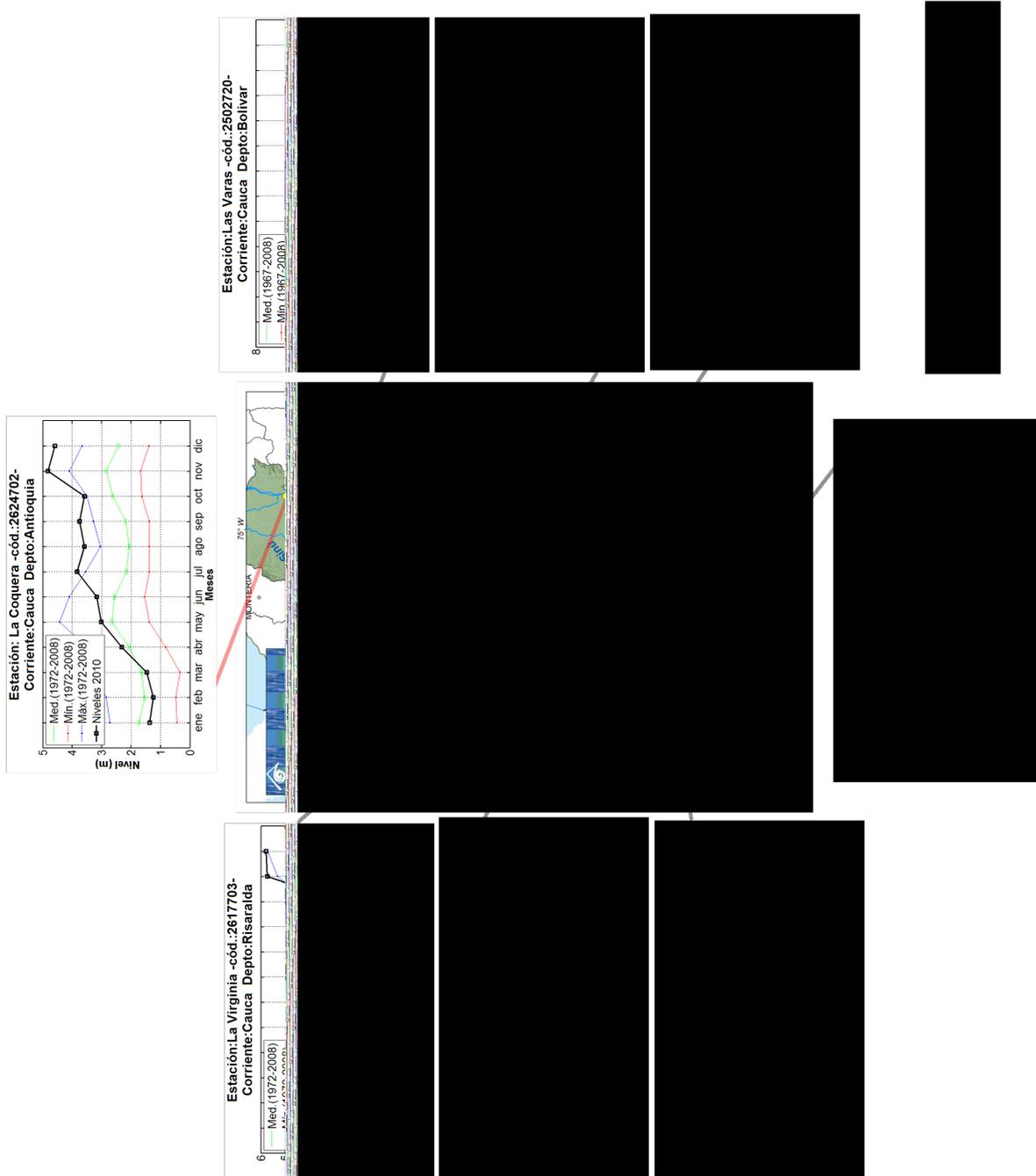


Figura 7.13. Ciclo anual de niveles máximos (en azul), medios (en verde) y mínimos (en rojo), respecto a caudales mensuales promedio en el año 2010 para estaciones sobre la cuenca del río Cauca.

procesos de colmatación¹⁶ de los suelos en los cuales las aguas de exceso solían infiltrarse con mayor facilidad en el pasado. De igual manera, los efectos locales de aumento de precipitación en la zona baja de la cuenca aportan a la saturación del suelo: factor sinérgico para provocar inundaciones, ya que se calcula que las intensidades de las lluvias que se presentaron durante el evento húmedo podrían alcanzar períodos de retorno de entre 40 y 80 años.

Para la cuenca del río Cauca, se presenta un gráfico similar en la *Figura 7.13*, para las estaciones La Balsa, Juanchito, La Victoria, Cartago (sobre el río La Vieja), La Virginia, Bolombolo, La Coquera y Las Varas, sobre el Alto, Medio y Bajo Cauca. Al igual que en la cuenca del Magdalena, según los registros de las estaciones hidrológicas, la condición seca persistió en los meses de enero, febrero y marzo; a partir de allí, se inicia la transición, alcanzando niveles promedio en el mes de junio (es decir, alrededor de la línea verde). Es coherente en los registros de las estaciones un aumento significativo de los niveles en el mes de julio, cercano a los niveles máximos (línea en azul), y un posterior descenso temporal leve, que mantuvo los niveles entre medios y máximos (zona entre línea verde y azul), excepto para las estaciones La Coquera, Las Varas y Bolombolo, ubicadas en el Medio y Bajo Cauca, en donde los niveles oscilaron alrededor de la línea de máximos.

En general, los niveles respondieron en forma brusca al alto aporte de precipitación presentado durante el mes de noviembre y estuvieron por encima de los máximos promedio históricos. Gráficamente, se observa en la fuerte pendiente de la línea en negro, correspondiente a los niveles en el año 2010, entre

los puntos que unen los niveles de octubre y noviembre para todas las estaciones, excepto para la estación Las Varas, en la que el efecto de la Ciénaga La Raya y de los rompederos que desaguan hacia la zona de La Mojana amortiguan el aumento de niveles aguas arriba de dicho punto y, por ende, de sus registros.

Igualmente, vale la pena resaltar la alta variabilidad que registraron en general los niveles a lo largo del año 2010 en las estaciones de análisis: para enero, los niveles se encontraban en valores iguales o por debajo de los mínimos promedio multianuales, mientras que para noviembre, alcanzaron valores iguales o por encima de los máximos promedio multianuales, lo que constituye un hecho bastante particular, dada la baja probabilidad histórica que existe de este suceso.

7.2. Vulnerabilidad de los recursos hídricos ante el cambio climático

“Los problemas relacionados con el agua desempeñan un papel crucial en el conjunto de las vulnerabilidades regionales y sectoriales clave. Por ello, la relación entre el cambio climático y los recursos hídricos suscita una preocupación y un interés de primer orden” (Bates et ál., 2008: 210). Bajo esta premisa, en el ENA se analiza el impacto sobre el recurso hídrico ante los efectos del cambio climático en el territorio nacional, en las principales zonas hidrológicas del país.¹⁷ Se busca establecer una relación entre los escenarios generados por el Ideam para variables meteorológicas bajo escenarios de cambio climático y los balances hídricos en diferentes unidades hidrológicas.

Análisis previos han sido realizados por el Ideam (2001). Las diferencias en el presente análisis con

¹⁶ Se dice que un suelo está colmatado cuando su permeabilidad original se ha reducido sustancialmente a causa del progresivo entupimiento de los poros existentes entre sus partículas, con materiales finos transportados en suspensión por el agua que se va infiltrando, en las etapas iniciales del proceso.

¹⁷ Zonificación hidrográfica establecida por Ideam (2009).

respecto a este estudio radican en la base climática de análisis prospectivo que se usó y los modelos hidrológicos implementados. Los procedimientos científicos que aportan al análisis del cambio climático están en constante desarrollo, buscando una mejor representación de los impactos a nivel espacial y temporal, al mismo tiempo que se reduce la incertidumbre. Los escenarios implementados para el ENA corresponden a las premisas y productos del Cuarto Informe de Evaluación de IPCC (AR4)¹⁸ consignado en la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático ante Naciones Unidas (Ideam, 2010), y sustentado en el trabajo realizado por Ruiz (Ideam-Ruiz, 2010).¹⁹

7.2.1. Los recursos hídricos en el contexto del cambio climático

Se espera que el cambio global y la variabilidad climática afecten la magnitud y los ritmos de la escorrentía superficial y la humedad del suelo (IPCC, 2007). Las implicaciones de este hecho son importantes para el balance hidrológico y los recursos hídricos, así como para el futuro manejo y planificación ambiental. Las estimaciones cuantitativas de los efectos del cambio climático son esenciales para entender y resolver los problemas potenciales del recurso hídrico que podrían ocurrir en el futuro (Guo y Ying, 1997).

Los registros de observaciones y las proyecciones climáticas aportan abundante evidencia de que

18 AR4 (*Fourth assessment report*, en español,). IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Véase en www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf.

19 Se recomienda la lectura de estos documentos para la contextualización sobre modelos de circulación global, modelos de circulación regional, escenarios y resultados. Documentos descargables de <http://www.cambioclimatico.gov.co/publicaciones.html>.

los recursos de agua dulce son vulnerables y pueden resultar afectados de manera grave por el cambio climático, con muy diversas consecuencias para las sociedades humanas y los ecosistemas (Bates et ál. 2008). En la *Figura 7.14* se representa el cambio respecto a la escorrentía anual para el período 2090-2099, en comparación con el período 1980-1999 sobre los continentes. Los valores representan la mediana de doce modelos climáticos basados en el escenario A1B, un modelo más bien optimista. Las áreas en las que los modelos coinciden y difieren, respectivamente, en el signo del cambio se denotan mediante áreas punteadas y de color blanco: se observa la amplitud de las áreas en que el signo del cambio es incierto.

Según este reporte, para Colombia los modelos de circulación global apuntan a una reducción fuerte en la escorrentía en la zona Caribe (40% menos que la actual), posibles aumentos de la escorrentía para la zona Pacífico y una alta incertidumbre en los impactos sobre la zona Andina, Orinoquía y Amazonía (zona en blanco), donde más del 66% de los modelos de circulación global no concuerdan en el signo de cambio.

7.2.2. Dinamizantes de la oferta hídrica y cambios futuros

En el contexto de los cambios futuros referidos a la disponibilidad y demanda de agua por efecto del cambio climático, debe tenerse en cuenta que los principales dinamizantes climáticos que establecen la disponibilidad de agua son: la precipitación, la temperatura y la evaporación (determinada por la radiación neta en la superficie del terreno, la humedad atmosférica, la velocidad del viento y la temperatura). El análisis de estas variables bajo el efecto del cambio climático revela que la escorrentía anual total a escala mundial, se manifestaría en un aumento en algunas

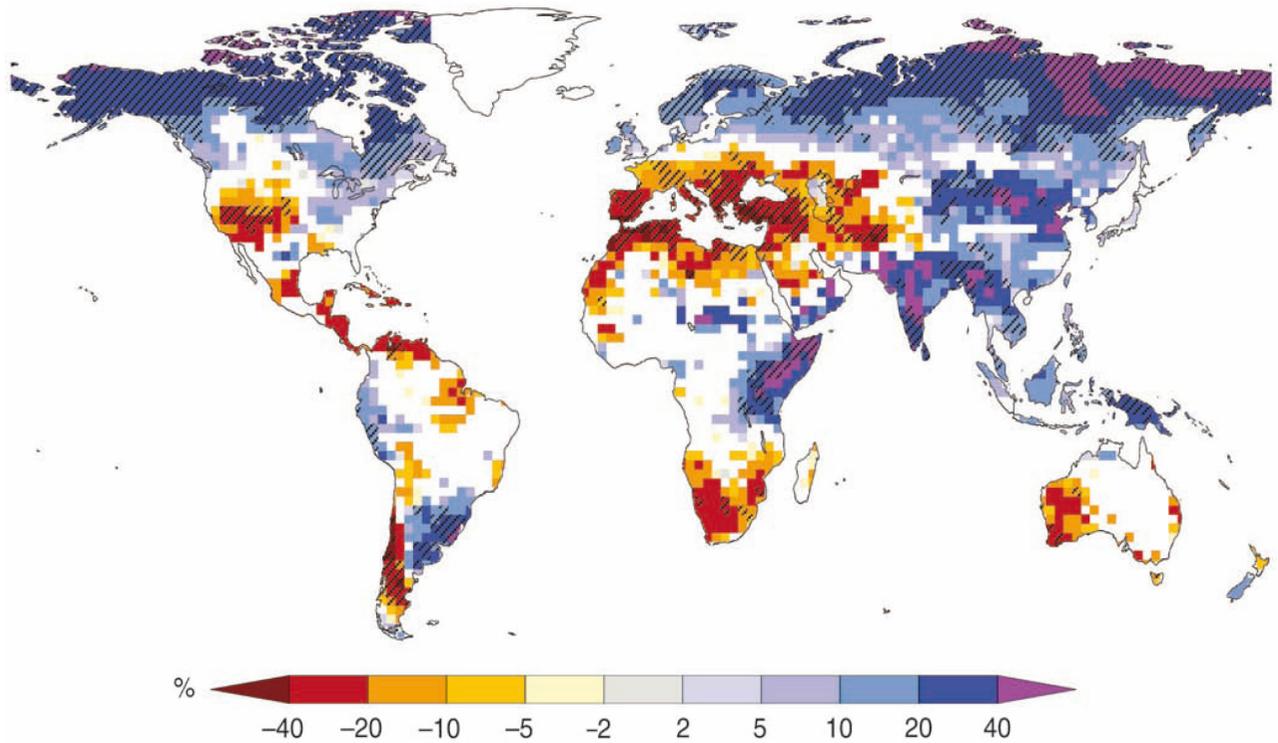


Figura 7.14. Cambios relativos en gran escala de la escorrentía anual para el periodo 2090-2099 respecto de 1980-1999. Las áreas en blanco indican que menos de un 66% del agregado de 12 modelos concuerdan en el signo del cambio, y las áreas en trama sombreada indican que más de un 90% de los modelos concuerdan en el signo del cambio (Milly et ál., 2005, en Bates et ál., 2008).

regiones, en particular, en latitudes superiores; y en otras, en una disminución, por ejemplo, en partes del África occidental, sur de Europa y sur de América Latina (Bates et ál., 2008).

Asimismo, son numerosos los factores no climáticos que influyen tanto en la cantidad como en la calidad de los recursos hídricos a escala mundial (UN, 2003, citado en Bates et ál., 2008): los cambios de uso del suelo, la construcción y operación de embalses, la contaminación y el tratamiento de aguas de desecho, entre otras. Es así como la gestión del agua a nivel nacional e internacional influye en forma directa sobre la vulnerabilidad de los sistemas hídricos, particularmente, al cambio climático. Por ello, la gestión integral del recurso hídrico debe ser un tema preponderante en todo el mundo (UN, 2002; World Bank, 2004a; y World

Water Council, 2006, citados en Bates et ál., 2008; «[...] con ello el agua, como recurso y como ecosistema, sería el centro de atención de los responsables de políticas» (Bates et ál., 2008).

7.2.3. Incertidumbre en los impactos del cambio climático sobre el recurso hídrico

Las incertidumbres relacionadas con los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos se derivan, principalmente, de la incertidumbre existente respecto a los aportes de precipitación; y, en menor medida, de las incertidumbres con relación a las emisiones de gases de efecto invernadero, o respecto a

las sensibilidades climáticas o a la sensibilidad inherente a los propios modelos hidrológicos.²⁰

Una comparación entre diferentes fuentes de incertidumbre en las estadísticas sobre las crecidas de dos cuencas del Reino Unido condujo a la conclusión de que la mayor fuente de incertidumbre era la estructura del *modelo de circulación global* (MCG),²¹ seguida de los escenarios de emisiones y de la modelización hidrológica.²²

La incertidumbre proviene también de la selección de indicadores y de valores de umbral para cuantificar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos, estrechamente relacionados con la línea base definida.

Dado que la escala de los MCG es muy gruesa, hay un desajuste entre las escalas de discretización espacial para realizar análisis de procesos hidrológicos sobre cuencas específicas. Por ello, se han desarrollado técnicas que adaptan la escala de los resultados del MCG a una resolución espacial (y temporal) más fina. «Las técnicas de reducción de escala o *downscaling* podrían permitir a los modelizadores incorporar la variabilidad en los cambios futuros y aplicar un marco de referencia probabilístico para generar información sobre los futuros caudales fluviales en la planificación de los recursos hídricos».²³ Estos planteamientos ayudan a comparar diferentes fuentes de incertidumbre que afectan a las proyecciones de los recursos hídricos.

20 *Ibidem*.

21 Estos modelos resuelven ecuaciones matemáticas complejas basadas en las leyes físicas que definen el comportamiento del clima y tienen resoluciones gruesas (hasta de 250x250 km)

22 Bates et ál., 2008.

23 *Ibidem*.

Para Colombia, el Ideam ha realizado un *downscaling* dinámico²⁴ con el modelo de circulación regional PRECIS, sobre las series de precipitación, temperatura y humedad relativa; estos resultados han sido aprovechados para evaluar el impacto del cambio climático sobre el recurso hídrico.

7.2.4. Aspectos metodológicos

El interés por definir el impacto del cambio climático sobre los procesos hidrológicos en cuencas se reporta con amplitud en la literatura, aunque todavía no hay un consenso general sobre las herramientas óptimas para hacer esta clase de análisis. Básicamente, las metodologías consisten en procesar resultados de escenarios de cambio en las variables climáticas provenientes de *modelos de circulación regional* (MCR) –precipitación, temperatura, humedad relativa, etc.– como entrada en modelos hidrológicos a diferentes escalas temporales (Fowler, 2007; Gardner, 2009; Chiew et ál., 2002; Chiew et ál., 2010, Lavado, 2009; y Guo et ál., 2002, entre otros).

7.2.4.1. Metodología implementada

El efecto del cambio climático sobre la escorrentía media anual en el territorio colombiano se estimó con la metodología propuesta por Gardner (2009), que utiliza el balance hídrico a largo plazo y las salidas para las variables precipitación y temperatura de los modelos climáticos regionales (MCR). La aplicación de la metodología tiene como referencia la disponibilidad de datos como línea base de precipitación, temperatura (Ideam-Ruiz, 2010) y escorrentía del presente estudio (véase el *Capítulo 3*); los cambios proyectados sobre las variables climáticas, según modelos regionales

24 El *downscaling* dinámico implica el uso de modelos numéricos meteorológicos para reflejar cómo los patrones globales afectan las condiciones climáticas locales.

Precis y MR;²⁵ y las zonas y subzonas hidrológicas que conforman las unidades de análisis, definiendo extensiones de cuencas y homogeneidad regional. En la *Figura 7.15* se representa el esquema metodológico resumido, aplicado para el ENA 2010.

Gardner (2009) encontró que los resultados del modelo propuesto en su trabajo, comparados con los resultados de modelos hidrológicos complejos y calibrados a escalas temporales diaria o mensual, en cuencas ubicadas en Australia, China, Irlanda y Estados Unidos, son consistentes en sus estimaciones.

Dado que la mayoría de las formulaciones para la evapotranspiración potencial están altamente correlacionadas con el balance de radiación, así como con la temperatura media anual, es posible estimar la escorrentía media anual en términos de la precipitación y la evapotranspiración potencial (Gardner, 2009; Davies & Simonovic, 2005). El planteamiento se sustenta en la ecuación del balance hídrico y las relaciones empíricas formuladas por Budyko (1977)²⁶ sobre la evapotranspiración real media anual (ETR), para estimarla usando datos de precipitación y evapotranspiración potencial:

$$ETR = ETP * \tanh(P / ETP) \quad (1)$$

$$ETR = P * [1 - \exp(-ETP / P)] \quad (2)$$

donde

ETP es la evapotranspiración potencial y

P es la precipitación media anual.

25 El Ideam ha publicado en la Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, los resultados de tres modelos de circulación regional corridos y validados sobre el territorio nacional: Precip, MRI y WRF. Documento descargable de la página web www.cambioclimatico.gov.co.

26 Budyko (1977) derivó una ecuación para la evapotranspiración en términos de funciones hiperbólicas. Los argumentos relacionan la energía total disponible con la energía requerida para evaporar toda la precipitación anual. La ecuación fue probada con una amplia variedad de ríos en Europa, con valores observados de evaporación y de escorrentía al realizar el balance hídrico.

En la ecuación de balance hídrico,²⁷ la escorrentía media anual (*R*) a largo plazo puede ser estimada en función de *P* y *ETP* con alguna de las dos siguientes expresiones:

$$R = P - ETP * \tanh(P / ETP) \quad (3)$$

$$R = P - P * [1 - \exp(-ETP / P)] = P * \exp(-ETP/P) \quad (4)$$

La evapotranspiración potencial se puede estimar con métodos como el de Thornthwaite, basado en la variación anual de las temperaturas medias anuales, o el Malmstrom, cuya fundamentación es la relación entre la presión de saturación de vapor y la temperatura usando datos mensuales de temperatura, entre otros. El método propuesto en este ejercicio es el de Holland (1978), que relaciona la *ETP* y la temperatura media anual, y se presenta bajo la siguiente expresión:

$$ETP = 1.2 \times 10^{10} * \exp(-4620 / Tk) \quad (5)$$

donde

ETP es la evapotranspiración potencial y

Tk es la temperatura media en grados Kelvin.

Se utilizó la ecuación de Holland (1978) y luego se transformó en evapotranspiración real por medio de la formulación de Budyko [ecuación (2)].

Finalmente, para evaluar el efecto del cambio climático sobre la escorrentía en las cuencas, se implementó

27 Las principales hipótesis del presente modelo son: a) en el largo plazo los cambios en el almacenamiento de la cuenca son despreciables en comparación con los valores medios de precipitación, evapotranspiración y escorrentía; b) el agua sale de la cuenca solamente como caudal y evapotranspiración, no existe importación o exportación de agua por flujos de agua subterránea y/o por transferencia de flujo entre cuencas.

Dadas estas condiciones, se cumple que:

$$R = P - ETR$$

Además, la evapotranspiración real nunca sobrepasa la evapotranspiración potencial. Si no hay precipitación, entonces *R* y *ETP* deben ser iguales a cero. Similarmente, a medida que *P* alcance valores altos, la evapotranspiración real se aproxima en forma asintótica a la evapotranspiración potencial.

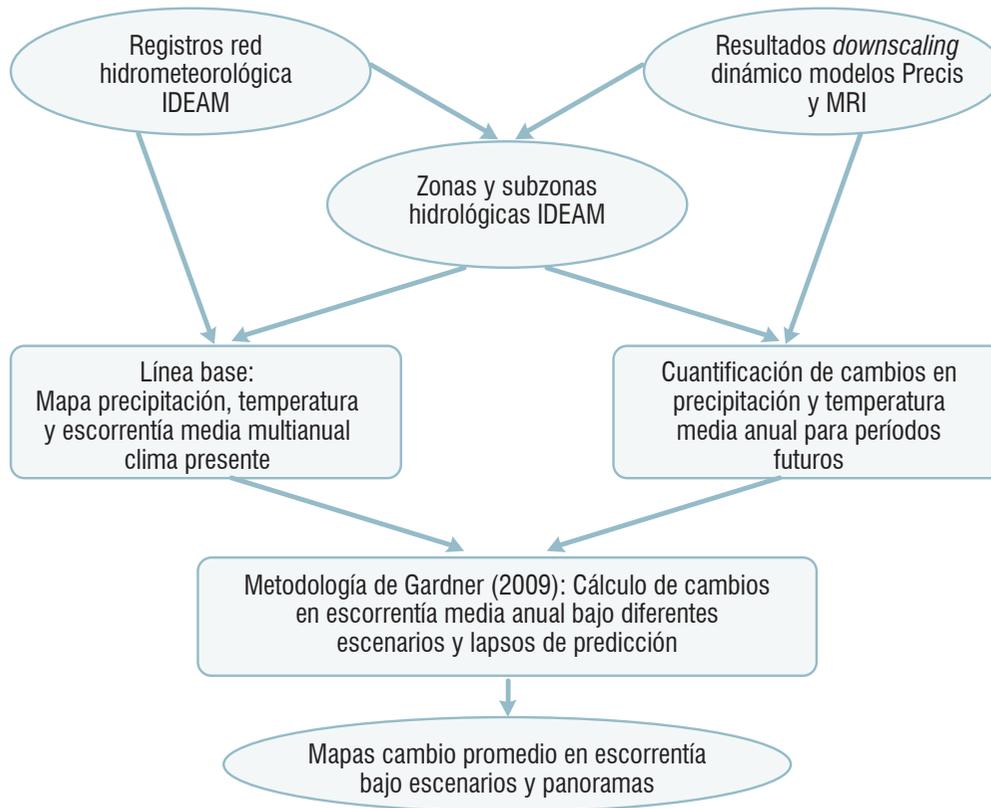


Figura 7.15. Esquema metodológico implementado para estimar el efecto del cambio climático sobre la escorrentía media anual en el territorio colombiano.

la regla del cálculo para diferenciación parcial sobre R en la ecuación (6) (Gardner, 2009):

$$dR = \exp(-ETP/P) * (1 + ETP/P) * dP - dETP \quad (6)$$

donde dP y $dETP$ son los diferenciales totales de precipitación y evapotranspiración potencial.

Al usar el método de Holland [ecuación (4)] para estimar la ETP, entonces el diferencial total de evapotranspiración sería:

$$dETP = 4620 * 1.2 * 10^{10} * T_k^{-2} \exp(-4260/T_k) * dT_k \quad (7)$$

Al substituir la ecuación (12) en la ecuación (11), se obtiene la siguiente ecuación para estimar cambios en R en función de los cambios en P y T:

$$dR = \exp(-ETP/P) * (1 + ETP/P) * dP - [5444 * 10^{10} * \exp(-ETP/P) * \exp(-4620/T_k) * T_k^{-2}] * dT_k \quad (8)$$

Para evaluar la validez de la expresión (5), se comparó la estimación de la evapotranspiración real medio de la ecuación de Holland y de Budyko con respecto a los resultados del método de Turc, usado para estimar valores de evapotranspiración real (ETR), cuyas entradas principales son la media de la temperatura y la precipitación.

Tabla 7.2. Modelos globales y regionales utilizados para la generación de escenarios de cambio climático en Colombia (Ideam-Ruiz, 2010).

Condiciones iniciales modelos de baja resolución	Modelo para downscaling dinámico	Resolución	Escenario	Periodo analizado
HadAM3P (UK)	PRECIS (UK)	25kmx25km	A2	2011-2100
HadAM3P (UK)	PRECIS (UK)	25kmx25km	B2	2011-2100
ECHAM4(Alemania)	PRECIS (UK)	25kmx25km	A2(s) ²⁹	2071-2100
ECHAM4(Alemania)	PRECIS (UK)	25kmx25km	B2(s)	2071-2100
HadCM3Q (UK)	PRECIS (UK)	25kmx25km	A1B(s)	2071-2100
CCM3 (USA)	GSM-MRI (Japón)	20kmx20km	A1B	2080-2099

7.2.4.2. Información utilizada

Como se mencionó anteriormente, el Ideam validó el modelo de circulación regional Precis (*Providing REgional Climates for Impacts Studies*) y MRI (*Meteorological Research Institute*) sobre el territorio colombiano, en el intervalo 1970-2000, lo que generó series de predicciones sobre cambios en patrones de precipitación, temperatura y humedad relativa a lo largo del periodo 2011-2100, con promedios representativos para los intervalos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, bajo los escenarios de emisión de gases invernadero A2, B2 y A1B con sulfatos²⁸. Los modelos, escenarios utilizados, condiciones iniciales de cada uno y resolución se presentan en la *Tabla 7.2*.

Las zonas y subzonas hidrológicas (Ideam, 2009) son las unidades de análisis del presente estudio. Los mapas de precipitación y temperatura promedio anual constituyen la línea base de validación de los modelos climáticos regionales corridos (1970-2000) y son comparados con los resultados de los escenarios simulados para 2011-2100 en los diferentes intervalos. Dado

que el presente análisis se está realizando a nivel de las 309 subzonas hidrológicas, se hizo un estimativo de los promedios de precipitación y de temperatura sobre estas unidades, con base a los mapas generados por el Ideam, para la definición de la línea base climática de referencia en la Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (*Figura 7.16*).

Las subzonas con precipitaciones promedio más bajas en el país son aquellas ubicadas sobre la Guajira, el Caribe colombiano, Cesar, Bajo y Alto Magdalena, Patía y Sogamoso. La predominancia de temperaturas entre 25 °C y 27 °C se puede observar para la mayoría de las subzonas. Las temperaturas más bajas en promedio se presentan sobre las zonas del Patía, Alto Magdalena, Cauca y Sogamoso.

7.2.5. Resultados

Las premisas y consideraciones metodológicas anteriores permitieron derivar los resultados que se presentan a continuación.

²⁸ El efecto directo principal de los sulfatos en el clima implica la dispersión de la luz, lo que aumenta con eficacia el efecto del albedo sobre la tierra.

²⁹ (s): modelo corrido con sulfatos.

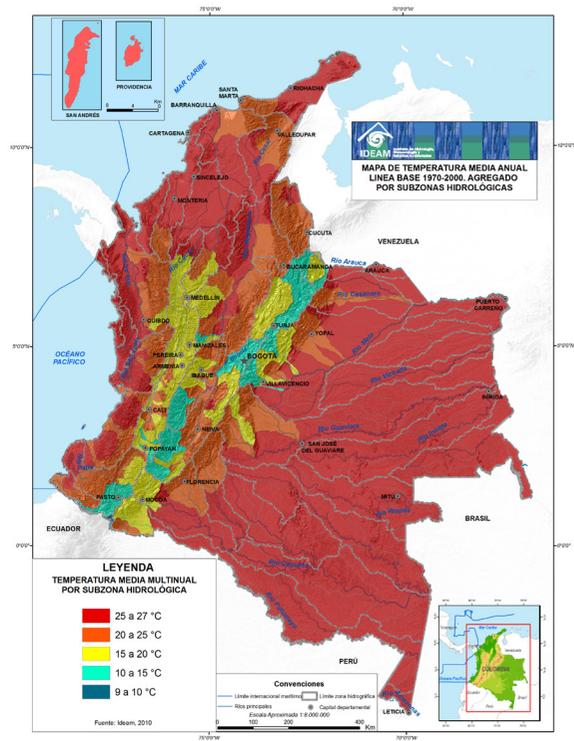


Figura 7.16. Mapas de precipitación y temperatura generados por el Ideam para el

ensamble multiexperimento (Ideam-Ruiz, 2010) recoge el promedio de todos los escenarios corridos [A2, A2(s), B2, B2(s), A1B, A1B (s) y tendencial] para cada uno de los modelos (Precis y MRI) y periodos

(2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100). Los datos promedio de cambio en precipitación y temperatura, bajo los periodos de predicción para las subzonas hidrológicas, según el ensamble multiexperimento, se ilustran en la *Figura 7.19*.

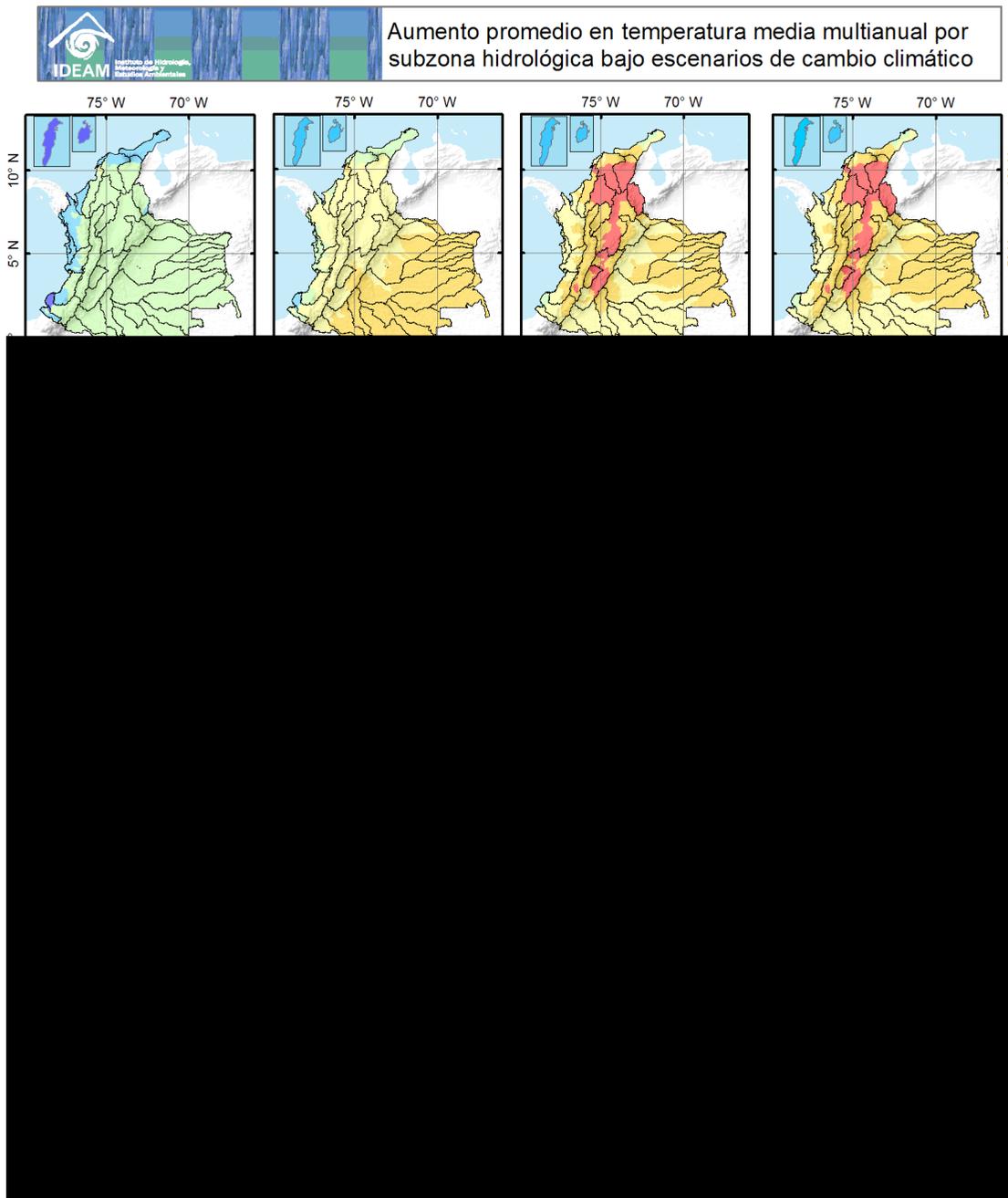


Figura 7.18. Cambio promedio de la temperatura por subzona hidrológica en grados centígrados, para escenario A2, B2 y A1B, en los intervalos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, con respecto al promedio 1970-2000.

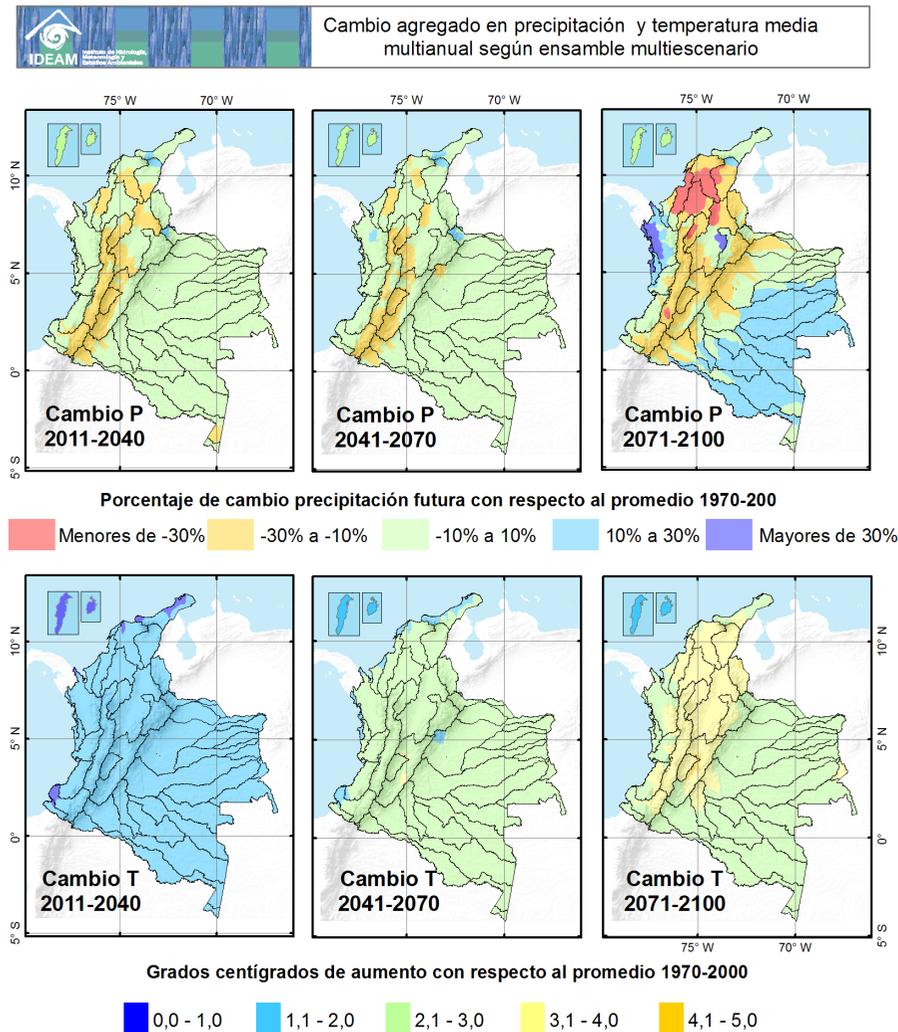


Figura 7.19. Cambio promedio de la precipitación (arriba) y temperatura (abajo) por subzona hidrológica para ensamble multiescenario, intervalos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.

En general, para los tres intervalos evaluados, predominan disminuciones para la precipitación entre -30% y -10% respecto al promedio 1970-2000 en la zona Andina y, en especial, en el alto Magdalena, Cauca y Patía; y se afectan en este mismo rango, para el periodo 2071-2100, en el Caribe y el Bajo Magdalena. El aumento de temperatura oscila entre uno y dos grados para el intervalo 2011-2040; entre dos y tres grados, para el intervalo 2041-2070; y entre tres y cuatro grados, para el intervalo 2071-2100 para la zona Andina y el Caribe.

7.2.5.3. Afectación sobre la escorrentía promedio anual en las principales subzonas hidrológicas por efectos del cambio climático

La afectación sobre la escorrentía promedio anual en las principales subzonas hidrológicas en Colombia se presenta en la *Figura 7.20* y se estimó utilizando en la ecuación (8) los cambios en precipitación (dP) y temperatura (dT) para cada uno de los escenarios (A2, B2 y A1B con y sin sulfatos) y para los tres intervalos de

predicción. Para la interpretación de los resultados se definieron los siguientes rangos de evaluación de cambio en la escorrentía **media respecto al promedio actual**, estos corresponden a los rangos definidos para la variación de la precipitación (*Tabla 7.3*).

Las estimaciones bajo los diversos escenarios coinciden en una reducción fuerte en la escorrentía para la región Andina y Caribe respecto a las demás áreas hidrológicas del país (disminuciones mayores del 30% respecto al promedio). Igualmente, los escenarios coinciden en una tendencia hacia el mantenimiento de las condiciones actuales en la zona de La Guajira, Pacífico, Orinoquía y Amazonía. (*Figura 7.20*).

Existe concordancia en los modelos para 2070-2100 en disminuciones importantes para las cuencas ubicadas en el piedemonte llanero y aumentos para la zona hidrológica del Bajo Meta. Para el periodo 2080-2099, el escenario más optimista es el A1B(s), con cambios en la zona Andina y Caribe entre -30% y -10%.

En la *Figura 7.21*, se presentan los cambios en la escorrentía por subzona hidrológica asociados a los posibles cambios en precipitación y temperatura de acuerdo al ensamble multiescenario.

Según este análisis, la región Andina y Caribe son las más afectadas durante todos los periodos (entre -30% y -10%). Para 2070-2100, el resultado es más crítico aún para la zona Caribe y la Sabana de Bogotá (cambio menor a -30%). En las zonas del Pacífico, La Guajira, Orinoquía y Amazonía, las condiciones actuales persisten según el modelo (entre -10% y 10%).

Según este análisis, la región Andina y Caribe son las más afectadas durante todos los periodos, con reducciones promedio entre -30% y -10%, con cuencas específicas donde se esperan reducciones mayores.

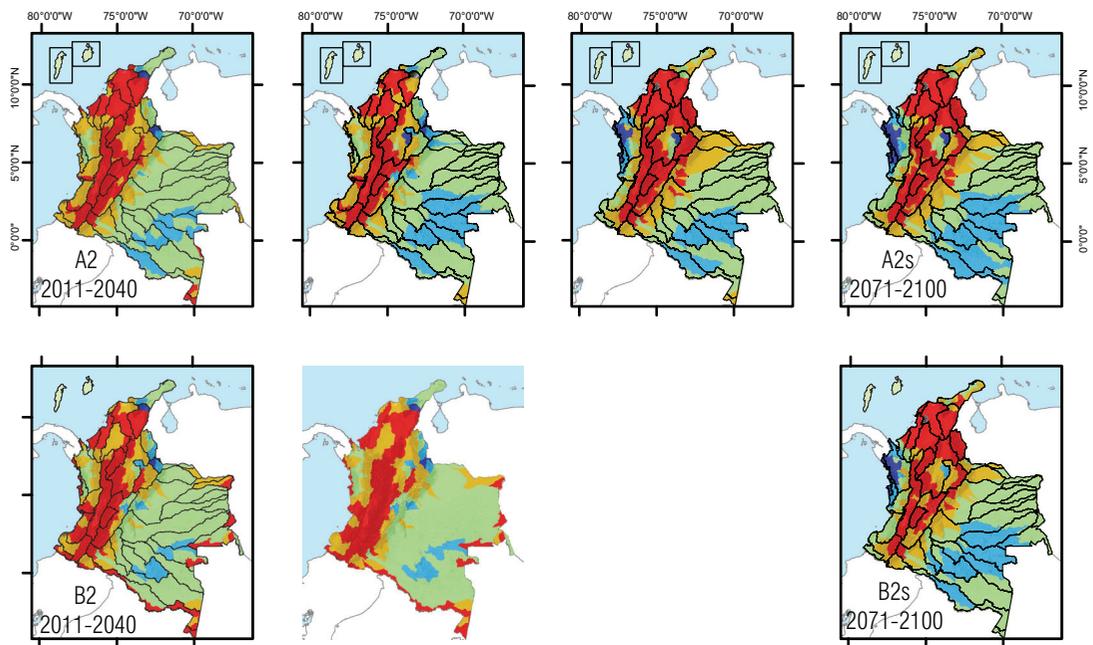
Específicamente, para el periodo 2011-2040 se esperan impactos representativos sobre la zona hidrológica del Patía, en las cuencas de los ríos Juananbú y Guachicono, con reducciones que alcanzan el 30% (reducción fuerte). Para este mismo intervalo, se esperan las mayores reducciones sobre el territorio nacional en algunas regiones de la zona del río Cauca, en especial sobre el Alto Cauca y en las cuencas de los ríos Ovejas, Piendamó, Quinamayo y Palo. Asimismo, en el Alto Magdalena, sobre las cuencas de los ríos Saldaña, Yaguará, Aipe, Luisa, Bache y Seco, se esperan reducciones cercanas al 35% respecto al promedio actual, en el intervalo 2011-2040. El Bajo Nechí y las cuencas asociadas a drenajes directos al Bajo Magdalena presentan las reducciones más

Tabla 7.3. Rangos de interpretación de los resultados para afectación de la escorrentía en el territorio nacional bajo escenarios de cambio climático.

Descripción	Rango	Interpretación
Disminuciones mayores del 30%	<-30%	Reducción fuerte respecto al promedio actual de escorrentía
Disminuciones entre el 10% y el 30%	-30, -10	Reducción respecto al promedio actual de escorrentía
Disminuciones menores del 10% y aumentos menores del 10%	-10, +10	Similar a la escorrentía promedio
Aumentos entre el 10% y el 30%	+10, +30	Aumento respecto al promedio actual de escorrentía
Aumentos mayores del 30%	>30	Aumento fuerte respecto a la escorrentía actual



CAMBIO PROMEDIO DE LA ESCORRENTÍA POR SUBZONAS HIDROLÓGICAS, PARA ESCENARIO A2, B2 Y A1B



PORCENTAJE DE CAMBIO ESCORRENTÍA FUTURA CON RESPECTO AL PROMEDIO 1970-200

Menores de -30% -30% a -10% -10% a 10% 10% a 30% Mayores de 30%

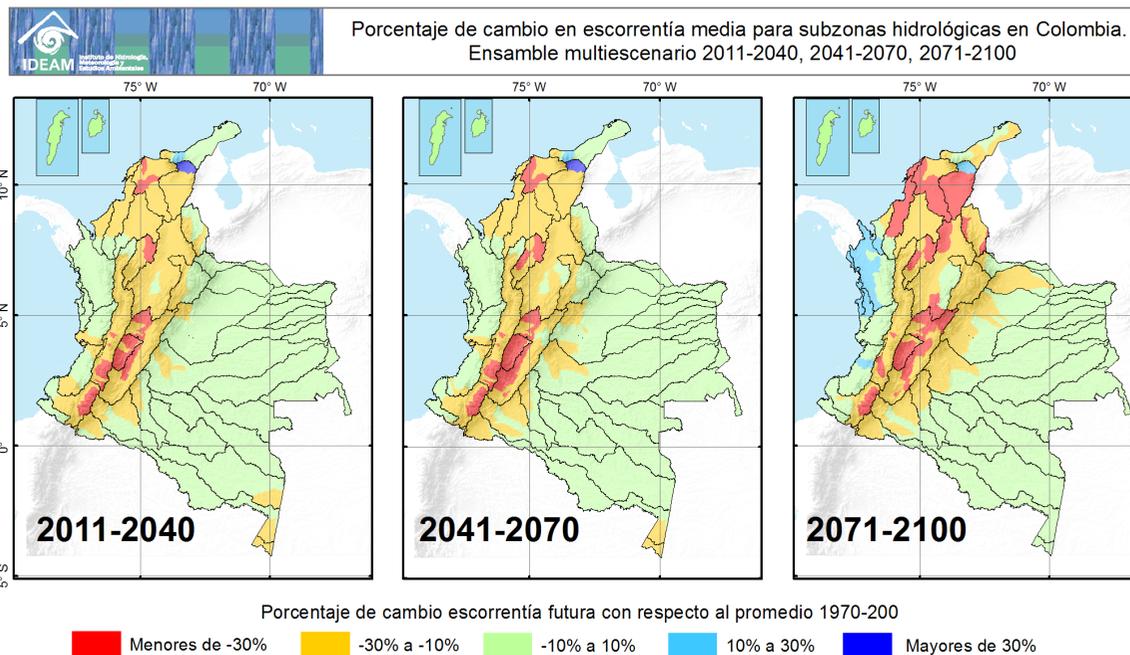


Figura 7.21. Cambio en escorrentía media por subzona hidrológica según ensamble multiescenario.

importantes regionalizadas; se presentan reducciones cercanas al 12% para las cuencas de los ríos Guejar, Guape, Guayas, Orteguala y Pescado.

Para el período 2041-2070, la distribución de las reducciones es bastante similar a la predicha para 2011-2040. La disminución en la escorrentía media anual sobre las cuencas críticas señaladas en el párrafo anterior es en promedio 5% mayor a la del período 2011-2040. Obsérvese que las reducciones al sur del Alto Magdalena se hacen más intensas, y cuencas como las del río Ariari, Metica, Upia, Tunjita, Chivor y embalse de Guavio entran al rango de disminuciones entre 10% y 20% respecto a la media anual.

Para 2070-2100, la distribución de las reducciones se expande, especialmente sobre la zona Caribe y el Bajo Magdalena, y son fuertes en las subzonas hidrológicas del Cesar, arroyo Corozal, Brazo Morales, Bajo Magdalena-Canal del Dique, María la Baja, río Sinú y río Ariguaní. Asimismo, las reducciones son fuertes

para la cuenca del río Nechí y la del río Algodonal en la zona del Catatumbo. En la zona del Alto Magdalena, las reducciones disminuyen al sur con respecto a los intervalos 2011-2040 y 2041-2070, y se tornan de carácter fuerte (mayores del 30%) al norte, en inmediaciones del río Bogotá, Negro y Prado. La reducción en la escorrentía media anual, con relación al promedio actual, se presenta en mayor proporción de cuencas sobre ambos piedemontes con respecto a los intervalos anteriores, de modo que alcanzan disminuciones entre el 10% y el 30%. Aquí se incluyen cuencas como las de los ríos Cravo Norte y Sur, Casanare, Cusiana, Guacavía, Guatiquia, Guayabero y Caguán Alto. Para este mismo periodo, se presentan aumentos importantes sobre las zonas del Darién y Baudó.

Por último, en la *Figura 7.22*, se representan en forma gráfica las relaciones entre los resultados de los modelos climáticos regionales para precipitación y temperatura, y los cambios en escorrentía según la metodología empleada. El gráfico se construyó

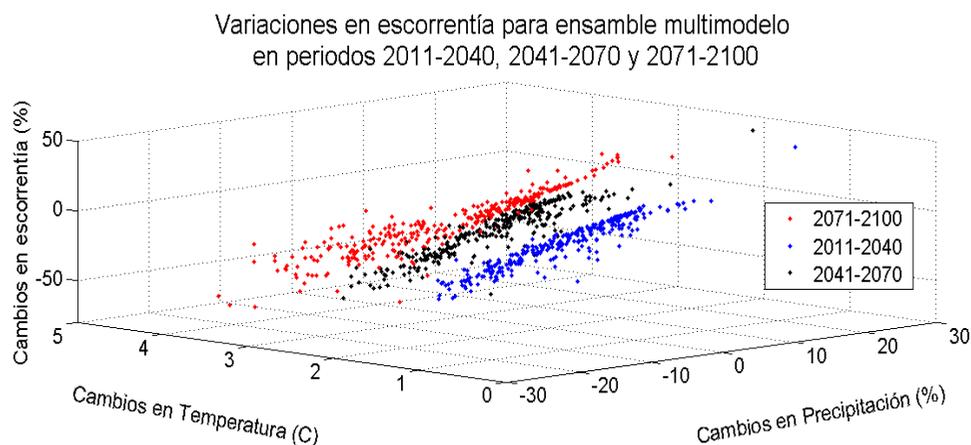


Figura 7.22. Cambios en escorrentía media anual relacionada con cambios en precipitación y aumentos de temperatura sobre las 309 subzonas hidrológicas oficiales del país.

determinando los aumentos en temperatura (que varían desde 0 hasta 5 grados centígrados) y afectaciones en precipitación (entre 30 y -30% respecto al promedio actual) en los ejes X y Y, respectivamente; y los cambios en escorrentía asociados se determinan en el eje Z. Los puntos representan los resultados para cada una de las 309 subzonas hidrológicas. En azul, se simbolizan los resultados para la afectación de la escorrentía en el periodo 2011-2040 con respecto al promedio actual; y se representan en negro y en rojo para los intervalos 2041-2070 y 2071-2100, respectivamente.

Obsérvese el aumento consistente de la temperatura sobre cada intervalo y la clara influencia de los aportes por precipitación en las reducciones o aumentos de la escorrentía media anual sobre las subzonas hidrológicas. Igualmente, es importante anotar que, según los resultados, las anomalías en escorrentía tienen una tendencia clara hacia la disminución y no hacia el aumento. Las mayores disminuciones se observan en el intervalo 2071-2100 (futuro lejano), en cuencas con aumentos proyectados para temperatura de 4 °C a 5 °C y disminuciones en precipitación promedio cercanas al 20% con respecto a la actual. Asimismo, se observa una mayor dispersión de los

resultados en este intervalo respecto a los encontrados para 2011-2040 y 2041-2070.

7.3. Conclusiones

Los resultados y análisis realizados a futuro serán, con toda seguridad, objeto de refinamientos metodológicos y tecnológicos que permitirán reducir la incertidumbre de los resultados. Sin embargo, con las aproximaciones conceptuales y metodológicas realizadas en este Estudio Nacional del Agua, se obtienen resultados que parten del conocimiento y de las posibilidades tecnológicas actuales para la predicción de estos eventos de naturaleza compleja.

7.3.1. Fenómeno ENSO: El Niño y La Niña

El fenómeno ENSO es un sistema de interacciones naturales entre el océano Pacífico ecuatorial y la atmósfera, que trastorna los patrones de precipitación tropical y de circulación atmosférica, que se presenta con una periodicidad de 3 a 7 años. La intensidad del fenómeno en curso es fundamental para relacionar su

efecto sobre los componentes climáticos que afectan el balance hídrico.

En el ENA 2010, se han tipificado las anomalías en caudales debidas a eventos de El Niño y La Niña sobre 180 estaciones hidrológicas distribuidas en el territorio colombiano. La clasificación de los diferentes años se realizó con base en índices macroclimáticos que evalúan el estado y desarrollo del ENSO. De acuerdo a ello, se ha encontrado que el ciclo anual de la hidrología en Colombia está afectado en su magnitud por el fenómeno ENSO y que, en general, ocasiona que se presenten mayores caudales y riesgos de fenómenos extremos durante la fase de La Niña y déficits pronunciados durante El Niño.

Las afectaciones para el recurso hídrico son más críticas para el trimestre diciembre-enero-febrero, cuando se presentan eventos de El Niño, y para el trimestre septiembre-octubre-noviembre, cuando el evento es La Niña; aunque, para este caso, los impactos en el trimestre marzo-abril-mayo también son considerables. Con los resultados del ENA, se considera que en general el recurso hídrico presenta las mayores afectaciones en las zonas Andina y Caribe. Se llama la atención, en especial, sobre las cuencas afluentes del río Cauca, dado que es una de las zonas hidrológicas más vulnerables al fenómeno ENSO, debido sobre todo a la mayor influencia que ejercen las anomalías sobre el océano Pacífico³⁰ y a las características geomorfológicas, que consisten en altos gradientes y áreas de drenaje relativamente pequeñas; esto se traduce en una respuesta rápida a los forzantes climáticos presentes en la zona. Además, es una de las zonas con mayor actividad socioeconómica del país, lo que implica una mayor vulnerabilidad para los usos que se dan al recurso hídrico en esta zona.

30 La cuenca del río Cauca es la cuenca andina más cercana al océano Pacífico y, por ende, la más influenciada por los fenómenos que allí se desarrollan.

Según el análisis realizado con el evento El Niño 2009-2010, los niveles mínimos más extremos se presentaron para la cuenca del río Magdalena en el mes de enero del 2010, alcanzando en promedio, para las estaciones analizadas, una disminución del 36% \pm 3%. Un comportamiento similar se presentó en la cuenca del río Cauca, en donde los mínimos extremos se registraron también en enero de 2010 y alcanzaron una reducción promedio del 33% \pm 6%. Para la Orinoquía, se encontraron disminuciones en el mes de enero de 2010 de 20% \pm 5%, siendo esta la zona menos afectada dentro de las tres evaluadas. Es importante aclarar la incertidumbre asociada a la influencia de la demanda del recurso en estos cálculos, dado que los valores en niveles son afectados por este factor, en especial durante el trimestre diciembre-enero-febrero, cuando los consumos de los múltiples sectores aumentan significativamente por las condiciones secas.

De otro lado, se compararon los niveles 2009-2010 respecto a los niveles en los años 1982-1983, 1991-1992 y 1997-1998, en los cuales la intensidad del fenómeno de El Niño fue caracterizada como fuerte. Se encontró que, en general, el efecto que tuvo el fenómeno de El Niño 2009-2010 sobre los niveles es similar y, para varias estaciones, más crítico que el efecto del evento 97-98, catalogado como uno de los más fuertes del siglo XX. Este último aspecto es destacable, dado que se esperaría que el evento 2009-2010, catalogado como de intensidad media, tuviera un efecto menos significativo sobre los niveles de las principales corrientes del país. Igualmente, a pesar de que las afectaciones sobre la Orinoquía son menores con respecto a las de la zona Andina, están adquiriendo mayor representatividad en los últimos eventos registrados.

Asimismo, se incluyó en el capítulo un análisis de los efectos del evento de La Niña 2010 sobre los niveles de las principales arterias de la zona Andina:

Magdalena y Cauca. En general, los niveles comenzaron a incrementarse a partir del mes de junio debido al efecto de este evento, y desencadenaron un fuerte aumento para los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, siendo este último el mes más crítico, debido a las condiciones de saturación del suelo y a los altos aportes de precipitación, con tormentas que alcanzaron periodos de retorno de entre 40 y 80 años.

También es destacable la frecuencia con que los eventos de El Niño y La Niña se presentaron en la última década, pasando de una fase a otra sin temporada de transición. Esto se refleja claramente en la dinámica de los niveles del año 2010, en el cual ambos eventos fueron relevantes en la respuesta hidrológica de las cuencas analizadas. Según los resultados, el fenómeno ENSO cada vez tiene mayor intensidad en sus efectos sobre el recurso hídrico en el territorio nacional y, por ello, la variabilidad climática debe ser incluida en la ordenación y planificación del territorio.

7.3.2. Cambio climático y recurso hídrico en Colombia

Se han utilizado los resultados de los modelos climáticos regionales Precip y MRI corridos por el Ideam sobre el panorama 2011-2100 para valorar cambios representativos en patrones de temperatura, precipitación y humedad relativa, y así evaluar el impacto del cambio climático bajo diversos escenarios de emisión formulados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en su *Cuarto Informe de Evaluación*. Los resultados a los que se les hace una mayor interpretación en el presente estudio están basados en un ensamble multiescenario que recoge, en cierta medida, el promedio de todos los escenarios de cambio climático obtenidos. Al igual que la distribución de las anomalías presentadas por el régimen hidrológico

debidas al ENSO, las mayores reducciones sobre la escorrentía media anual se esperan para las zonas Andina y Caribe, y se muestran especialmente críticas para el intervalo 2071-2100. Obsérvese que las zonas del Alto Magdalena, Cauca, Caribe Litoral, Saldaña, Patía y Caribe Urabá presentan la mayor afectación para los periodos evaluados. La razón principal para que se obtenga este efecto está vinculada a las reducciones significativas en las precipitaciones sobre estas mismas zonas. Es importante resaltar la alta vulnerabilidad a la luz de estos resultados, dada la concentración de actividades antrópicas en estas zonas. Para el Pacífico, la Guajira, la Orinoquía y la Amazonía, las condiciones actuales persisten según los modelos.

Colombia está caracterizada por una gran variabilidad climática, determinada principalmente por la influencia de los océanos Pacífico y Atlántico, la orografía de la cordillera de los Andes y la dinámica climática del Amazonas. Debido a las relaciones entre estos factores y a las condiciones locales y regionales, los estudios de impacto sobre la respuesta hidrológica en el contexto de la variabilidad y cambio climático adquieren alta complejidad. Actualmente, la variabilidad climática tiene una gran relevancia en el desarrollo de las actividades socioeconómicas del país; por ello, es recomendable desarrollar estrategias de adaptación a la actual variabilidad dentro de los planes de ordenación y gestión del territorio y del recurso hídrico. A su vez, estas estrategias estarían en pro del aumento de la capacidad de adaptación al cambio climático. En resumen, se puede decir que adaptarse a la variabilidad climática es, en cierta medida, adaptarse al cambio climático.

Finalmente, es importante dejar claro que las mayores fuentes de incertidumbre al evaluar el impacto del cambio climático sobre el recurso hídrico son: la incertidumbre asociada con los aportes por precipitación por cuenca; la incertidumbre debida a la

estructura del modelo de circulación global (MCG), que es la base para el *downscaling* dinámico o regionalización efectuada con los modelos Precis y MRI; la incertidumbre en los escenarios de emisiones; y la incertidumbre misma del modelo hidrológico aplicado. Por lo anterior, los impactos sobre el recurso hídrico cuantificados en el presente documento deben ser tomados con precaución debido a las diversas fuentes de incertidumbre mencionadas. Asimismo, es de gran importancia resaltar el esfuerzo del Ideam por

generar resultados sobre los variables climáticos bajo escenarios de cambio global, dada la enorme cantidad de recursos humanos y tecnológicos que implica. Sin embargo, esta es una tarea que debe tener continuidad, especialmente por la constante evolución de la ciencia del cambio climático y sus resultados; además, por la necesidad de involucrar más técnicas de reducción de escala, escenarios y modelos que aseguren un análisis probabilístico del efecto del cambio climático sobre el recurso hídrico en Colombia.

