



SEÑALES DE CAMBIO CLIMÁTICO

POR ANÁLISIS DE

EXTREMOS CLIMÁTICOS

Plan Regional Integral de Cambio Climático
Región Capital Bogotá - Cundinamarca

INFORME TÉCNICO



Al servicio
de las personas
y las naciones

SEÑALES DE CAMBIO CLIMÁTICO POR ANÁLISIS DE EXTREMOS CLIMÁTICOS

Plan Regional Integral de Cambio Climático
Región Capital Bogotá - Cundinamarca

INFORME TÉCNICO



Con la colaboración de:



PUNTOS FOCALES DIRECTIVOS DE LAS INSTITUCIONES SOCIAS

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO PNUD Fabrizio Hochschild Coordinador Residente y Humanitario de la ONU Silvia Rucks Directora de País Fernando Herrera Coordinador Área de Pobreza y Desarrollo Sostenible Jimena Puyana Oficial de Desarrollo Sostenible	IDEAM Omar Franco Torres Director José Alaín Hoyos Subdirector de Estudios Ambientales María Teresa Martínez Subdirectora de Meteorología Paola Bernal Jefe oficina de Cooperación Internacional	GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA Álvaro Cruz Vargas Gobernador de Cundinamarca Fredy William Sánchez Secretario de Integración Regional Andrés Alejandro Romero Secretario de Planeación Marcela Orduz Quijano Secretario de Ambiente Jaime Matiz Ovalle Oficina de Atención y Prevención de Desastres	ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ Gustavo Petro Urrego Alcalde Mayor de Bogotá Gerardo Ardila Calderón Secretario Distrital de Planeación Néstor García Buitrago Secretario Distrital de Ambiente Alberto Merlano Gerente EAB Javier Pava Director IDIGER
CAR Alfred Ignacio Ballesteros Director	CORPOGUAVIO Oswaldo Jiménez Director	CORPORINOQUIA Martha Jhoven Plazas Directora	INSTITUTO ALEXANDER VON HUMBOLDT Brigitte LG Baptiste Directora
PARQUES NACIONALES NATURALES Julia Miranda Directora Parques Nacionales Naturales	MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE Rodrigo Suárez Director de Cambio Climático	DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN Alexander Martínez Subdirector de Desarrollo Ambiental Sostenible	

PUNTOS FOCALES DEL PRICC EN LAS INSTITUCIONES SOCIAS

PNUD: Claudia Marín; IDEAM: Vicky Guerrero, Juan Gabriel Osorio; Gobernación de Cundinamarca: Marleny Urbina, Constanza Cruz; Secretaría Distrital de Ambiente: Gloria Esperanza Narváez; Secretaría Distrital de Planeación: Carolina Chica; IDIGER: Lina María Hernández; EAB: Francisco Javier Canal; CAR: María Elena Báez; CORPOGUAVIO: Myriam Amparo Andrade; Instituto Alexander von Humboldt: Jorge Enrique Gutiérrez; Parques Nacionales Naturales: Juan Giovany Bernal; DNP: Silvia Calderón; MADS: Maritza Florián.

PLAN REGIONAL INTEGRAL DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA BOGOTÁ CUNDINAMARCA (PRICC)

UNIDAD COORDINADORA DEL PRICC Coordinador: Javier Eduardo Mendoza Sabogal Asesor técnico: Jason García Portilla Asesor comunicaciones: Juan Carlos Forero Amaya Asistente administrativo: Isabel Castro Robledo Consultoría elaborada por: Freddy Grajales Contrato No. PNUD 0000013418 Las opiniones expresadas en este informe no suponen la expresión de una opinión o posición alguna de ninguna de las instituciones socias del Plan Regional Integral de Cambio Climático para Bogotá Cundinamarca (IDEAM, PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguavio, Instituto Humboldt, Parques Nacionales de Colombia, MADS, DNP). Los autores son responsables de la selección y presentación de los datos que figuran en sus respectivos informes y de las opiniones expresadas en ellos, que no son forzosamente	las de las instituciones socias del Plan Regional Integral de Cambio Climático para Bogotá Cundinamarca (PRICC). El PRICC es fruto de un trabajo en colaboración que ha sido posible gracias al apoyo y participación de numerosas personas e instituciones. Se ha financiado en virtud del documento de proyecto firmado entre las instituciones socias y también gracias a las generosas contribuciones del Gobierno de España y del Gobierno de Quebec, Canadá.	Fotografías: Instituto Humboldt, IDEAM, Oficina de prensa Alcaldía Mayor de Bogotá, Oficina de prensa Gobernación de Cundinamarca, El Tiempo. Diseño gráfico: Una tinta medios. Bogotá, Colombia - abril 2014
Cítese como: IDEAM, PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguavio, Instituto Alexander von Humboldt, Parques Nacionales Naturales de Colombia, MADS, DNP. 2012. Señales de cambio climático por análisis de extremos climáticos		

PRESENTACIÓN

Los retos que la variabilidad y el cambio climático imponen a la sociedad de la Región Capital trascienden lo ambiental e incluyen todos los aspectos relacionados con nuestras actividades sobre los territorios. Los patrones y procesos de producción, extracción, asentamiento y consumo, van a estar influenciados por la forma como el clima cambie.

Mayor ocurrencia e intensidad de eventos extremos, climas más secos o más húmedos, tendrán efectos directos sobre la economía, la cultura, el medio ambiente y las decisiones políticas (municipales, departamentales y distritales) que se tomarán en el futuro cercano, así como en la planeación territorial, sectorial e institucional de largo plazo.

Todo este conjunto de decisiones permeará de manera directa todos los aspectos relacionados con la calidad de vida de los cundinamarqueses y bogotanos, quienes cada vez más relacionan los cambios en el clima con los desastres y las emergencias, dejando de lado las oportunidades de adaptación que estos nuevos escenarios pueden traer para el desarrollo de la Región.

Por este motivo, el Plan Regional Integral de Cambio Climático Región Capital, Bogotá – Cundinamarca (PRICC), se ha constituido y se consolida como una plataforma de trabajo interinstitucional que permite construir las directrices técnicas, así como una estrategia regional, implementada a través de medidas y proyectos prioritarios de mitigación y adaptación a la variabilidad y al cambio climático, que permitirá a la Región Capital tener las bases científicas para enfrentar los retos y aprovechar las oportunidades de estos nuevos escenarios.

El PRICC es además, uno de los modelos piloto mundiales que, por iniciativa de la Alcaldía de Bogotá y de la Gobernación de Cundinamarca, vienen impulsando las Naciones Unidas (PNUD) y el IDEAM, junto con la activa participación de otros importantes socios (CAR, Corpoguavio, Corporinoquia, PNNC, IAvH, DNP y MADS), para fortalecer las capacidades y la toma de decisiones de las instituciones regionales públicas, para avanzar en la construcción de territorios resilientes a la variabilidad y al cambio climático. Este esfuerzo cuenta con el apoyo financiero de los Gobiernos de España y de Quebec.

A partir de lo anterior, este estudio, “Señales de cambio climático por medio del monitoreo de Índices de Extremos Climáticos - STARDEX para la Región Capital Bogotá - Cundinamarca permite tener una guía para la toma de decisiones de quienes han asumido o asumirán responsabilidades desde el gobierno regional, en materia de la generación de conocimiento y acciones para la mitigación del cambio climático.

Javier Eduardo Mendoza

Coordinador PRICC

RESUMEN

Se presentan una recopilación de índices de extremos climáticos encontrados para la región Bogotá-Cundinamarca calculados por medio del software STARDEX para el periodo 1980-2010, que muestran algunas señales de cambio climático para la región. Se presentan los 13 índices que resultan ser básicos en el monitoreo y detección de señales de cambio climático y 4 índices adicionales seleccionados por el autor. Se analizan las variables temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y precipitación diaria, variables que se describen tanto en la magnitud, como en la frecuencia de ocurrencia de los eventos. Los índices presentados tienen una significancia estadística mínima del 80 % para los periodos trimestrales DEF, MAM, JJA, SON y para el periodo Anual.

Los resultados muestran algunas señales de cambio climático encontradas para la región Bogotá-Cundinamarca, evidenciadas como aumentos y disminuciones en las tendencias de las variables analizadas, tanto en la magnitud como en la frecuencia de los eventos de las variables analizadas.

PALABRAS CLAVES:

Índices de extremos climáticos, STARDEX, temperatura mínima diaria, temperatura máxima diaria, precipitación diaria, tendencias, Bogotá-Cundinamarca.

TABLA DE CONTENIDO

- PRESENTACIÓN..... 4
- RESUMEN 5
- INTRODUCCIÓN..... 8
 - 1. Objetivo General..... 10
 - 1.1 *Objetivos específicos*..... 10
 - 2.Marco Teórico 10
 - 2.1 *STARDEX*..... 10
 - 3.Metodología..... 12
 - 3.1 *Cálculo de índices por medio de STARDEX*..... 12
 - 3.2 *Índices seleccionados*..... 14
 - 3.2.1 Temperatura máxima..... 15
 - 3.2.2 Temperatura mínima..... 16
 - 3.2.3 Precipitación..... 16
 - 3.3 *Análisis de Tendencias*..... 17
 - 4.Resultados..... 18
 - 4.1 *Interpretación de mapas y tablas*..... 18
 - 4.2 *Temperatura Máxima* 19
 - 4.2.1 Temperatura Máxima - Magnitud: txav Temperarura Máxima promedio - txq90 Percentil 90 de la Temperatura Máxima..... 19
 - 4.2.2 Temperatura Máxima - Frecuencia: txhw90 Percentil 90 de la Dura-

	ción de ondas de calor para 10 días de Tx - txf90 fracción de días por encima del rango muy alto (percentil 90) de la Tx.....	22
4.3	<i>Temperatura mínima</i>	24
4.3.1	Temperatura Mínima - Magnitud: tnav Temperatura Mínima promedio - tnq10 Percentil 10 de la Temperatura Mínima.....	24
4.3.2	Temperatura mínima - frecuencia.....	27
4.4	<i>Precipitación</i>	29
4.4.1	Precipitación - Magnitud: pav Promedio de precipitación total - pint Promedio de precipitación para días húmedos - pq90 Percentil 90 de días húmedos - px5d Máximo de precipitación en 5 días consecutivos - pfl90 Promedio para las precipitaciones extremas.....	29
4.4.2	Precipitación - Frecuencia: pxcdd Máximo de días consecutivos secos - pxcwd Máximo de días consecutivos húmedos - pn10mm No. de días donde precip \geq 10mm - pnl90 Eventos de precipitación extrema en el largo plazo.	35
	CONCLUSIONES	41
	BIBLIOGRAFÍA	44

INTRODUCCIÓN

Con el fin de avanzar en la planificación referente a las estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático en su nivel regional, el Plan Regional Integral de Cambio Climático Región Capital (PRICC), propone que dichas estrategias provengan de la recopilación y el análisis de información técnica, en aspectos como la vulnerabilidad al riesgo y su gestión, el ordenamiento territorial y el análisis alrededor de la información climática.

Esta información técnica busca ser base para la generación de políticas, que en conjunto sean útiles en el desarrollo de la Región Capital Bogotá-Cundinamarca. Se puede afirmar que en general existe un consenso en la comunidad científica, que cualquier cambio en la magnitud y frecuencia de los eventos extremos puede tener profundos impactos sobre la naturaleza y la sociedad en general, de aquí la importancia de su análisis.

Por esta razón se han construido índices de extremos climáticos, los cuales son cálculos numéricos sobre una serie de datos (por ejemplo la precipitación diaria), que permite evaluar la tendencia de la variable, es decir si esta aumenta o disminuye en la región y de esta forma detectar señales de cambio climático, que al menos en el corto plazo y dada una inercia climática, tienen una certeza alta, la cual desciende en el tiempo.

Para esto se usan como insumos básicos los datos observados provenientes de estaciones meteorológicas en series históricas diarias, series que han sido sometidas previamente a un control de calidad y a un proceso de homogenización de series[Grajales F., 2013].

En este documento se presentan una selección de 17 índices de extremos climáticos de los 49 obtenidos inicialmente [Grajales F., 2013], en este caso analizados para la región Bogotá - Cundinamarca. Se presentan 10 de los 17 índices, que corresponden a los llamados centrales ó core en STARDEX [Stardex,2004, Stardex,2005] y que resultan básicos en el monitoreo y detección de posibles señales de cambio climático.

Otros 3 de estos 17 índices son los promedios de cada una de las variables seleccionadas y 4 de estos índices son seleccionados por el autor dada la complementación de información con los otros índices y además por resultar severos en el análisis para la región. Con respecto a las variables, 4 índices corresponden a la variable temperatura máxima (2 de magnitud y 2 de frecuencia) y de igual forma para la variable temperatura mínima; mientras que para la variable precipitación se tienen 9 índices (5 para magnitud y 4 para frecuencia).

Tener un panorama de las tendencias en variables como la temperatura y la precipitación y sus posibles cambios en horizontes de tiempo de 20, 30, 50 años ó más, puede ayudar a soportar decisiones locales en el diseño futuro de sectores como los recursos hídricos, la agricultura, sistemas pluviales y de drenaje de tierras, carreteras, ferrocarriles, generación de energía, el diseño de edificios y otros sectores como el turismo donde el tiempo y el clima son clave determinante de la vida cotidiana.

Este análisis de extremos climáticos es un esfuerzo de colaboración entre el Programa para el Desarrollo de las Naciones Unidas (PNUD) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), dentro del proyecto “Plan Regional Integral de Cambio Climático, PRICC”.

1. OBJETIVO GENERAL

Encontrar señales de cambio climático por medio de las tendencias en los índices de extremos climáticos calculados durante en el periodo 1980-2010, analizando la magnitud y la frecuencia de estos para la región Bogotá - Cundinamarca.

1.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Hacer una selección de los principales índices de extremos climáticos encontrados mediante STARDEX en el periodo 1980-2010 para la región capital Bogotá-Cundinamarca, a partir de todos los índices calculados[Grajales F., 2013].
2. Hacer un análisis de las tendencias de los índices seleccionados, tanto en magnitud como en la frecuencia, que permitan evidenciar posibles señales de cambio climático en la región Bogotá-Cundinamarca.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 STARDEX

STARDEX, STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes, es parte de un grupo de tres proyectos cooperativos que exploran los futuros cambios en eventos extremos como respuesta al calentamiento global por parte de la Union Europea.

Los otros miembros de este grupo son MICE (Modelling the Impacts of Climate Change¹) y PRUDENCE (Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects²). Estos proyectos ayudan a direccionar la preguntas vitales acerca de como los extremos climáticos pueden ocurrir más frecuentemente en el futuro. PRUDENCE esta centrado en el desarrollo y aplicación de modelos regionales climáticos y MICE sobre el uso de la información generada por los modelos regionales y globales en el estudio de los impactos del cambio climático. Por su lado, STARDEX se encuentra centrado en dos objetivos principales:

3. Generar una intercomparación y evaluación rigurosa y sistemática de métodos estadísticos y dinámicos de downscaling³.
4. Identificar las técnicas más robustas de downscaling y aplicarlas para proveer escenarios futuros confiables de extremos en temperatura y precipitación.

1 <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/mice>

2 <http://prudence.dmi.dk>

3 El término downscaling, hace referencia a métodos que conllevan a una reducción de escala, es decir métodos que permiten pasar de una baja resolución (rejillas grandes) a mejores resoluciones (rejillas más pequeñas).

El downscaling estadístico consiste en la aplicación de las relaciones identificadas en el clima observado, entre una escala grande (modelos globales) y una escala más pequeña (que puede llegar hasta la escala local), relaciones aplicadas a los datos de salida de los modelos climáticos globales. Esto se basa en dos suposiciones: La primera suposición es que las relaciones observadas son también aplicables a un futuro clima más calido ó más frío, lo cual se conoce como la hipótesis de estacionariedad.

La segunda suposición es que los modelos climáticos globales, representan mejor los patrones de circulación de gran escala que los patrones climáticos locales. Estas relaciones entre eventos extremos y la circulación de gran escala, nos dan la clave básica para el downscaling estadístico, suponiendo que los supuestos de regionalización se cumplen.

Este proyecto de la Unión Europea ha desarrollado 22 diferentes métodos de downscaling estadístico⁴ y Stardex ha llevado a cabo una evaluación sistemática de estos. Por su parte el proyecto PRUDENCE, ha llegado a desarrollar modelos dinámicos⁵ regionales (a partir de los modelos globales) hasta de 50Km de resolución espacial, lo cual resulta interesante en especial para regiones montañosas.

Dos de los modelos climáticos globales más importantes en Europa (HadCM3 y ECHAM4) han sido ampliamente validados, con énfasis particular en extremos. Estos dos modelos de igual forma, presentan una muy buena validación de los datos climáticos en Colombia [Rodríguez, 2010]. Lo interesante en este punto es poder comparar directamente los dos downscaling realizados; el estadístico y en dinámico regional, con el fin de identificar la mejor técnica para una región.

De la intercomparación del downscaling (bien sean métodos estadísticos ó dinámicos), se busca identificar que métodos puedan reproducir al menos en parte, los extremos que ya han ocurrido en nuestro presente cercano, lo cual toma lugar usando datos climáticos observados desde la mitad del siglo XX. Identificando cuales técnicas de downscaling son las mejores (para una región determinada), se puede tener cierta certeza en la construcción de escenarios de extremos futuros.

Stardex proporciona información muy valiosa, que los métodos de downscaling deben encontrar o al menos reproducir en parte. Se fundamenta en que los cambios en los extremos observados en nuestro presente cercano (en este caso se usaron 40 años) pueden ser explicados por medio de predictores de circulación general a gran escala e incluso otros a escala regional. Por ejemplo la correlación entre «días de precipitación fuertes» y la «oscilación del Atlántico Norte» para toda la región Europea, ha resultado muy fuerte [STARDEX, 2005].

No se trata que Stardex haga una proyección o un pronóstico del futuro⁶, sino más bien proveer información sobre los cambios más probables en los extremos y dar un escenario confiable y creíble de lo que

4 Algunos categorías de estos métodos: Regresión lineal múltiple, análisis de correlación canónica, redes neuronales artificiales, modelos autoregresivos multivariados, remuestreo condicional y otras técnicas análogas.

5 Los métodos dinámicos buscan representar matemáticamente las condiciones de la atmósfera

6 En el sentido del IPCC, una proyección equivale a una descripción del futuro, hecha mediante alguna técnica específica, normalmente a partir de estimaciones de modelos o técnicas estadísticas. De aquí que en la terminología del IPCC se prefiera usar el término «proyección climática». Mientras que cuando se habla de un pronóstico o una predicción, se hace referencia a la proyección más pro-

puede pasar⁷ [IPCC, 2011]. Stardex se define como una construcción de índices moderados en vez de eventos muy extremos, pues estos no representan una muestra estadísticamente consistente. Además la construcción de los índices esta basada en umbrales definidos usando el valor de percentil en vez de valores fijos. STARDEX provee escenarios de cambios esperados en la **magnitud** (intensidad) y la **frecuencia** de los eventos extremos, tales como fuertes precipitaciones que resultan en inundaciones y extremos en temperaturas; eventos que tienen probablemente un impacto sobre la vida y las actividades en el medio ambiente.

En este trabajo se usan los índices de extremos climáticos construídos por el proyecto Stardex, con el fin de identificar regiones en Cundinamarca que presentan una tendencia y una regionalización clara de lo que esta pasando.

3. METODOLOGÍA

Como ya se ha mencionado, este trabajo corresponden a una selección de los índices presentados en la tabla 4.1 ([Grajales F., 2013]). En esta tabla se presentan la cantidad de estaciones para cada periodo analizado, con una significancia estadística de al menos 80 % ó un p-value menor a 0,2. El lector puede verificar la metodología usada para el cálculo de índices de extremos climáticos en el capítulo 4 de [Grajales F., 2013].

3.1 CÁLCULO DE ÍNDICES POR MEDIO DE STARDEX

Los índices de extremos climáticos calculados por medio de Stardex, son presentados como el valor de la tendencia⁸, para cada uno de los 5 periodos de tiempo presentados en la tabla 4.2.

El valor de la tendencia es presentado, siempre y cuando su valor de p-value no supere 0,2, lo que nos ha permitido tener una significancia estadística de al menos 80 %, que si bien no es estricto en términos estadísticos, si nos permite tener una mayor cantidad de estaciones y por tanto una mejor inferencia sobre la señal de cambio climático en la región.

En el caso de STARDEX debe tenerse en cuenta que el cálculo del índice depende del umbral ó fracción mínima de datos perdidos para el periodo específico, el cual es de 0,2; es decir se acepta hasta un 20 % de datos perdidos en cada serie analizada.

bable, la cual es derivada normalmente de un conjunto de modelos determinísticos, los cuales dan un nivel de confianza estadístico a dicha proyección.

7 El término escenario, se refiere a una descripción coherente, consistente y convincente de un estado futuro del mundo. No es un pronóstico, de hecho cada escenario es una imagen alternativa de cómo el futuro puede revelarse. Una proyección puede servir como materia prima para generar un escenario, pero los escenarios requieren información adicional (por ejemplo condiciones base). Un conjunto de escenarios son frecuentemente adoptados para reflejar, tan bien como sea posible, el rango de incertidumbre en las proyecciones. Un sinónimo de escenario usado frecuentemente es «caracterización», así se habla de escenario futuro ó caracterización futura.

8 Se obtiene la pendiente de la recta del gráfico: Valor índice vs. año de la serie analizada: 1980-2010.

TABLA 4.1: RESULTADOS GENERALES OBTENIDOS CON STARDEX PARA LA REGIÓN CAPITAL

No.	Descripción	Nombre	Unidades	Tipo	Cantidad de estaciones por Periodo				
					DJF	MAM	JJA	SON	ANN
1	Temperatura Máxima (Tx) promedio	txav	°C/año	Magnitud	29	24	28	32	28
2	Percentil 10 de la Temperatura Máxima	txq10	°C/año	Magnitud	23	24	22	27	28
3	Percentil 90 de la Temperatura Máxima	txq90	°C/año	Magnitud	26	24	27	36	29
4	Temperatura Mínima (Tn) promedio	tnav	°C/año	Magnitud	24	30	27	25	29
5	Percentil 10 de la Temperatura Mínima	tnq10	°C/año	Magnitud	23	28	24	25	31
6	Percentil 90 de la Temperatura Mínima	tnq90	°C/año	Magnitud	22	23	27	20	25
7	Promedio del rango de las Temperaturas diarias Extremas	trav	°C/año	Magnitud	22	28	24	34	31
8	Percentil 10 del rango de las temperaturas Extremas diarias	trq10	°C/año	Magnitud	21	30	23	28	28
9	Percentil 90 del rango de las temperaturas Extremas diarias	trq90	°C/año	Magnitud	21	25	24	32	23
10	Rango de las Temperaturas diarias Extremas	tiaetr	°C/año	Magnitud	21	23	18	23	22
11	Promedio de precipitación	pav	mm/año	Magnitud	32	53	61	48	67
12	Percentil 20 de días húmedos.	pq20	mm/año	Magnitud	62	57	68	67	72
13	Percentil 40 de días húmedos.	pq40	mm/año	Magnitud	57	55	62	53	75
14	Percentil 50 de días húmedos.	pq50	mm/año	Magnitud	57	49	57	56	71
15	Percentil 60 de días húmedos.	pq60	mm/año	Magnitud	56	47	56	53	70
16	Percentil 80 de días húmedos.	pq80	mm/año	Magnitud	49	35	48	45	67
17	Percentil 90 de días húmedos.	pq90	mm/año	Magnitud	51	36	46	56	69
18	Percentil 95 de días húmedos.	pq95	mm/año	Magnitud	40	35	54	41	53
19	Relación entre la sumatoria de precipitación por encima de pq20 y la precipitación total del periodo.	pf20	Ninguno	Magnitud	45	57	65	61	67
20	Relación entre la sumatoria de precipitación por encima de pq40 y la precipitación total del periodo.	pf40	Ninguno	Magnitud	32	52	58	58	62
21	Relación entre la sumatoria de precipitación por encima de pq50 y la precipitación total del periodo.	pf50	Ninguno	Magnitud	35	56	56	55	62
22	Relación entre la sumatoria de precipitación por encima de pq60 y la precipitación total del periodo.	pf60	Ninguno	Magnitud	38	52	55	53	64
23	Relación entre la sumatoria de precipitación por encima de pq80 y la precipitación total del periodo.	pf80	Ninguno	Magnitud	39	43	52	48	61
24	Relación entre la sumatoria de precipitación por encima de pq90 y la precipitación total del periodo.	pf90	Ninguno	Magnitud	32	44	38	40	51
25	Relación entre la sumatoria de precipitación por encima de pq95 y la precipitación total del periodo.	pf95	Ninguno	Magnitud	29	31	37	39	42
26	Máximo de precipitación para 3 días consecutivos.	px3d	mm/año	Magnitud	33	40	44	44	46
27	Máximo de precipitación para 5 días consecutivos.	px5d	mm/año	Magnitud	37	35	48	48	47
28	Máximo de precipitación para 10 días consecutivos.	px10d	mm/año	Magnitud	41	37	60	50	46
29	Promedio de precipitación para días húmedos.	pint	mm/año	Magnitud	44	50	61	66	78
30	Eventos de precipitación extrema (% de eventos en donde precipitación diaria > Percentil 90 de días húmedos).	pnl90	Eventos/año	Frecuencia	32	33	50	49	55
31	Proporción de precipitaciones extremas	pf90	Ninguno	Magnitud	39	35	51	54	57
32	Percentil 90 de la Duración de ondas de calor para 10 días de Tx.	txhw90	Días/año	Frecuencia	20	25	29	29	27
33	Percentil 10 de la Duración de ondas frías para 10 días de Tn.	tnw10	Días/año	Frecuencia	17	24	26	25	22
34	Fracción de días donde Tx < Percentil 10	txf10	Fracción días/año	Frecuencia	21	19	22	27	30
35	Fracción de días donde Tx > Percentil 90	txf90	Fracción días/año	Frecuencia	22	25	26	29	31
36	Fracción de días donde Tn < Percentil 10	tnf10	Fracción días/año	Frecuencia	26	28	29	24	30
37	Fracción de días donde Tn > Percentil 90	tnf90	Fracción días/año	Frecuencia	17	21	26	25	27
38	No.de días donde precip >=10mm	pn10mm	días/año	Frecuencia	38	48	67	55	66
39	Máximo de días consecutivos secos.	pxcdd	días/año	Frecuencia	24	67	53	36	37
40	Máximo de días consecutivos húmedos.	pxc wd	días/año	Frecuencia	47	48	59	51	59
41	Promedio de los periodos de días húmedos.	pwsav	días/año	Frecuencia	42	46	59	52	71
42	Mediana (percentil 50) de los periodos de días húmedos.	pwsmed	días/año	Frecuencia	43	55	62	48	60
43	Desviación estandar de los periodos de días húmedos.	pwsdv	días/año	Frecuencia	37	48	53	49	59
44	Promedio de los periodos de días secos.	pdsav	días/año	Frecuencia	19	63	54	33	56
45	Mediana (percentil 50) de los periodos de días secos.	pdsmed	días/año	Frecuencia	33	39	50	37	50
46	Desviación estandar de los periodos de días secos.	pdsdv	días/año	Frecuencia	24	64	45	33	46
47	Persistencia de días húmedos.	ppww	Ninguno	Persistencia	42	46	58	54	69
48	Persistencia de días secos.	ppdd	Ninguno	Persistencia	16	61	50	29	53
49	Correlación entre "ppww" y "ppdd".	ppcr	Ninguno	Persistencia	33	54	49	37	55

TABLA 4.2: PERIODOS ANALIZADOS POR STARDEX

PERIODO STARDEX	DEFINICIÓN	DÍAS PERIODO
DEF	<i>Periodo: Diciembre-Enero-Febrero</i>	90
MAM	<i>Periodo: Marzo-Abril-Mayo</i>	92
JJA	<i>Periodo: Junio-Julio-Agosto</i>	92
SON	<i>Periodo: Septiembre-October-Noviembre</i>	91
ANN	<i>Periodo: Anual</i>	365

3.2 ÍNDICES SELECCIONADOS

Para la selección de los índices de extremos climáticos que permitan analizar posibles señales de cambio climático en la región Bogotá-Cundinamarca, se han tenido en cuenta las siguientes condiciones:

1. Considerar los 10 índices de extremos climáticos reportados como «centrales»⁹ y los 3 índices promedios principales en STARDEX [Stardex,2013],[Stardex,2004]. Estos índices son base en la detección de señales de cambio climático. Además, han sido la base en el proyecto STARDEX para la modelación en downscaling [CRU,2005],[Stardex,2005].
2. Considerar la magnitud y la frecuencia de los eventos extremos para las variables analizadas: temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación diaria. La magnitud analiza la intensidad para cada variable, mientras que la frecuencia permitir observar el aumento o la disminución en el número de eventos extremos.
3. Hacer el análisis respectivo en magnitud y frecuencia para cada índice, que permitan apreciar posibles señales de cambio climático.

La tabla 4.3, presenta los índices seleccionados por variable, nombre, descripción, unidades, tipo, grupo y la cantidad de estaciones que reportan el índice hasta un 0,2 de p-value. La columna descrita como «Clase» corresponde a la clasificación dada por STARDEX para los índices tipo «Core» y «Mean» y para el caso de este documento se ha generado un subgrupo llamado «Severo», el cual es identificado con alta severidad para el análisis de extremos climáticos en la región Bogotá- Cundinamarca.

9 El término usado en STARDEX es Core

TABLA 4.3: ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS SELECCIONADOS

No.	Variable	Nombre	Descripción	Unidades	Tipo	Clase	Cantidad de estaciones				
							DJF	MAM	JJA	SON	ANN
1	Temp. Máxima	txav	Temperatura Máxima (Tx) promedio	°C/año	Magnitud	Mean	29	24	28	32	28
2		txq90	Percentil 90 de la Temperatura Máxima	°C/año	Magnitud	Core	26	24	27	36	29
3		txhw90	Percentil 90 de la Duración de ondas de calor para 10 días de Tx.	Días/año	Frecuencia	Core	20	25	29	29	27
4		txf90	Fracción de días donde Tx > Percentil 90	Fracción días/año	Frecuencia	Severo	22	25	26	29	31
5	Temp. Mínima	tnav	Temperatura Mínima (Tn) promedio	°C/año	Magnitud	Mean	24	30	27	25	29
6		tnq10	Percentil 10 de la Temperatura Mínima	°C/año	Magnitud	Core	23	28	24	25	31
7		tnw10	Percentil 10 de la Duración de ondas frías para 10 días de Tn.	Días/año	Frecuencia	Severo	17	24	26	25	22
8		tnf10	Fracción de días donde Tn < Percentil 10	Fracción días/año	Frecuencia	Severo	26	28	29	24	30
9	precipitación	pav	Promedio de precipitación	mm/año	Magnitud	Mean	32	53	61	48	67
10		pint	Promedio de precipitación para días húmedos.	mm/año	Magnitud	Core	44	50	61	66	78
11		pq90	Percentil 90 de días húmedos.	mm/año	Magnitud	Core	51	36	46	56	69
12		px5d	Máximo de precipitación para 5 días consecutivos.	mm/año	Magnitud	Core	37	35	48	48	47
13		pf90	Proporción de precipitaciones extremas	Ninguno	Magnitud	Core	39	35	51	54	57
14		pn10mm	No.de días donde precip >=10mm	días/año	Frecuencia	Severo	38	48	67	55	66
15		pxcdd	Máximo de días consecutivos secos.	días/año	Frecuencia	Core	24	67	53	36	37
16		pxc wd	Máximo de días consecutivos húmedos.	días/año	Frecuencia	Severo	47	48	59	51	59
17	pn90	Eventos de precipitación extrema (% de eventos en donde precipitación diaria > Percentil 90 de días húmedos).	Eventos/año	Frecuencia	Core	32	33	50	49	55	

3.2.1 Temperatura máxima

Índices asociados a la **magnitud**:

1. Temperatura máxima promedio (txav): Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria del día i , periodo j . Si el periodo j tienen un número de días K , entonces el promedio de temperatura de la variable Temperatura Máxima es:

$$PI T_{xij}$$

$$txav = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K T_{xij}$$

2. Percentil 90 de la Temperatura Máxima (txq90): Percentil 90 de txav. Se obtiene el promedio txav para cada periodo en análisis, luego se organizan los datos de menor a mayor.

El percentil 90 corresponde al dato cuya ubicación este en el 90 % de la serie organizada. Índices asociados a la **frecuencia**:

1. Ondas de calor (txhw90): Percentil 90 de la Duración de ondas de calor para 10 días de Tx. Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria en el día i del periodo j . Y sea $T_{xq90inorm}$, el calculo del percentil 90 de cada 10 días seguidos durante el periodo. Luego, se cuenta el número máximo de días consecutivos por periodo en donde: $T_{xij} > T_{xq90inorm}$

2. Fracción de días con Temperatura extremas máximas (txf90): Fracción de días por encima del rango muy alto (percentil 90) de la Temperatura máxima. Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria en el día i del periodo j y sea T_{xin90} , el calculo del percentil 90 en el periodo j . Se determina la fracción de veces en donde:

$$T_{xij} > T_{xin90}$$

3.2.2 Temperatura mínima

Índices asociados a la **magnitud**:

1. Temperatura mínima promedio (tnav): Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria del día i , periodo j . Si el periodo j tienen un número de días K , entonces el promedio de temperatura de la variable Temperatura Mínima es:

$$P(T_{nij})$$

$$tnav_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K T_{nij}$$

2. Percentil 10 de la Temperatura mínima (tnq10): Percentil 10 de tnav. Los índices asociados a la **frecuencia**:

1. Ondas de frío (tncw10): Percentil 10 de la Duración de ondas frías para 10 días de T_n . Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria en el día i del periodo j . Y sea $T_{nq10inorm}$, el calculo del percentil 10 de cada 10 días seguidos durante el periodo, es decir el valor del primer día con T_n más grande. Cuente el número máximo de días consecutivos en cada periodo, donde:

$$T_{nij} < T_{nq10inorm}$$

2. Fracción de días con Temperaturas extremas mínimas (tnf10): Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria en el día i del periodo j y sea T_{nin10} , el calculo del percentil 10 en el periodo j . Se determina la fracción de veces en donde:

$$T_{nij} < T_{nin10}$$

3.2.3 Precipitación

Índices asociados a la **magnitud**:

1. Promedio de precipitación (pav): Sea R_{wj} la cantidad de precipitación diaria para el día w del periodo j . El promedio de precipitación en el periodo es:

$$P(W) = \sum_{w=1}^K R_{wj}$$

$$pav_j = \frac{1}{K} \sum_{w=1}^K R_{wj}$$

2. Promedio de precipitación para los días húmedos (pint): Sea R_{wj} la cantidad de precipitación diaria para días húmedos ($prcp > 1\text{mm}$) en el día w del periodo j . El promedio de precipitación en el periodo es:

$$P(W) = \sum_{w=1}^K R_{wj}$$

$$pint_j = \frac{1}{K} \sum_{w=1}^K R_{wj}$$

3. Precipitaciones extremas en los días húmedos ó percentil 90 de los días húmedos (pq90): Valor de precipitación al que corresponde el 90 % de los días húmedos (rango muy alto).

4. Máximo de precipitación para 5 días consecutivos (px5d): Se suman las precipitaciones de los conjuntos de 5 días consecutivos en el periodo de interés. px5d equivale al valor máximo de este conjunto de datos.

5. Tendencia al aumento o disminución en las precipitaciones extremas (pfl90): Sea R_j la suma de la precipitación diaria en el periodo j y sea R_{wj} la precipitación diaria para los días húmedos (mayor a 1mm) en el mismo periodo j . Sea R_{wn90} el percentil 90 de la precipitación para los días húmedos en el mismo periodo específico. pfl90 corresponde a:

$$P_w = \sum_{w=1}^K R_{wj} > R_{wn90}$$

$$pfl90_j = \sum_{w=1}^K R_{wj}, \text{ donde}$$

$$R_j$$

Se puede decir que pf_{90} equivale a la proporción de precipitaciones extremas. Los índices asociados a la frecuencia que fueron seleccionados son:

1. Máximo de días consecutivos secos (pxcdd): El número máximo de días consecutivos en el periodo de interés, donde la precipitación es menor a 1mm.
2. Máximo de días consecutivos húmedos (pxc wd): El número máximo de días consecutivos en el periodo de interés, donde la precipitación es mayor a 1mm.
3. Número de días con precipitación mayor ó igual a 10mm (pn10mm): Número de días en el periodo donde el valor de precipitación es mayor a 10mm.
4. Eventos de precipitación extrema (pnl90): Sea R_{wj} la cantidad precipitación diaria en el periodo j y sea R_{wn90} el percentil 90 de la precipitación en días húmedos (mayor a 1mm) para todo el periodo analizado, que para este caso es 1980-2010. Se determina el número de veces en donde se cumpla:

$R_{wj} > R_{wn90}$

3.3 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Luego de seleccionados los 17 índices que se han mencionado en 4.2, se obtienen las tendencias para cada índice con las siguientes condiciones:

1. Obtener el promedio aritmético para todo el mapa¹⁰.
2. Seleccionar las estaciones que se encuentran al interior de Cundinamarca. Obtener el promedio aritmético.
3. Seleccionar las estaciones que presentan aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca.
4. Hacer un control de calidad sobre las tendencias obtenidas para los aumentos y las disminuciones. Para esto, se ha calculado el coeficiente de variación para cada serie de datos de estaciones y se han determinado los datos dentro de la serie que al ser eliminados, ayudan a mejorar el coeficiente de variación de manera significativa. Normalmente resultan datos de un orden de magnitud mayor en comparación a estaciones vecinas.
5. Los datos obtenidos deben encontrarse dentro del rango: promedio + (Desviación Estándar x4) y promedio - (Desviación Estándar x 4¹¹). Los datos que se encuentren fuera de este rango son eliminados.
6. Reportar las tendencias promedio al interior de Cundinamarca, con su respectiva cantidad de estaciones y la tendencia máxima y mínima.

¹⁰ Se obtiene el promedio aritmético para las estaciones reportadas, es decir todas las que tienen $p\text{-value} < 0,2$.

¹¹ Se esta asumiendo una distribución normal, la cual resulta típica para el control de calidad de información climática. Se ha usado 4 veces la desviación estándar, lo cual presume un cubrimiento del 99,993 % de los datos.

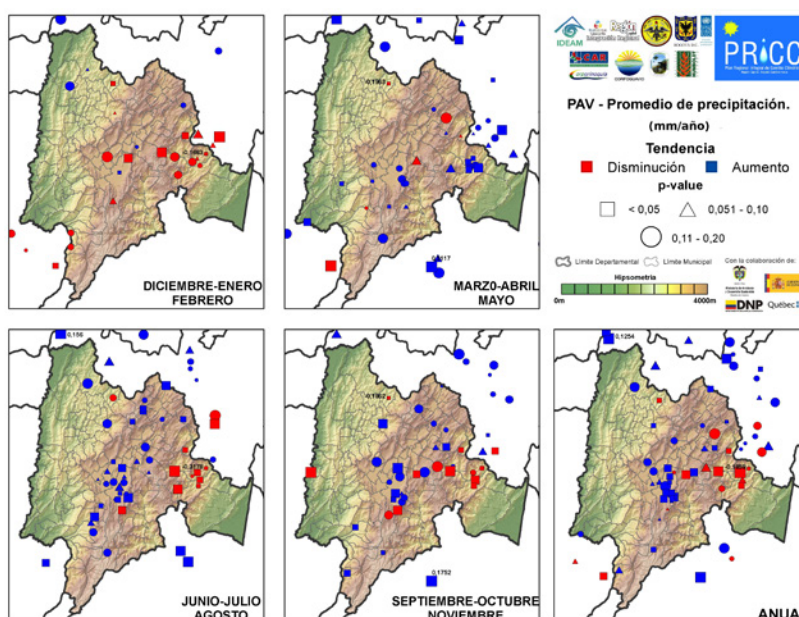
4. RESULTADOS

Los siguientes resultados se encuentran divididos entre índices que miden la Magnitud del evento (que permite apreciar la intensidad) y la Frecuencia, la cual nos ayuda a entender el aumento o la disminución en el número de eventos extremos.

4.1 INTERPRETACIÓN DE MAPAS Y TABLAS

Los resultados que se presentan para cada uno de los índices seleccionados se encuentran acompañados de su respectivo mapa y tabla de resultados de aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca. Un ejemplo de mapa se presenta en la Fig. 5.1.1 y deben tenerse en cuenta los siguientes criterios para su lectura:

FIGURA 5.1.1: EJEMPLO DE INTERPRETACIÓN PARA MAPAS STARDEX.



1. El título de cada mapa se encuentra en la parte superior derecha, debajo de los logos. Para mejor entendimiento la definición numerica de cada índice se puede encontrar en el capítulo 4.2.
2. Se presentan para cada índice los periodos **DEF** (Diciembre-Enero-Febrero), **MAM** (Marzo- Abril-Mayo), **JJA** (Junio-Julio-Agosto), **SON** (Septiembre-Octubre-Noviembre) y **Anual**.
3. Si el índice se encuentra asociado a la variable **precipitación**, entonces el **color azul** indica aumento y el **color rojo** disminución en la tendencia¹ del índice. Pero si el índice se encuentra asociado a la variable Temperatura, entonces el **color azul** indica disminución y el **color rojo** aumento en la tendencia.

4. Cada forma de punto (cuadrados, triángulos y círculos) corresponde al valor de la tendencia de una estación meteorológica. Las celdas en blanco en estas tablas, significa que el índice calculado presenta un valor de p-value por encima de 0,2 y se ha retirado el dato.
5. Las formas de los puntos; cuadrados, triángulos y círculos, indican la significancia estadística del punto en cuestión. El cuadrado indica una significancia estadística de por lo menos el 95 % (p-value < 0.05), el triángulo indica una significancia estadística de máximo 95 % y mínima del 90 % y (p-value = 0.05 - 0.10) y el círculo indica una significancia estadística de máximo 89 % y mínima de 80 % (p-value = 0.11 - 0.20).
6. Las formas de los puntos tienen diferentes tamaños, indicando mayor o menor valor de la tendencia. El máximo y mínimo se muestran numéricos en el mapa para referenciar el valor de la tendencia de cada punto.
7. Debajo de la simbología para el p-value se han puesto los límites departamentales y los límites municipales.
8. Por último en la parte inferior derecha de cada mapa, se presenta una referencia a la hipersometría correspondiente.

4.2 TEMPERATURA MÁXIMA

4.2.1 *Temperatura Máxima - Magnitud: txav Temperatura Máxima promedio - txq90 Percentil 90 de la Temperatura Máxima*

La Fig.5.4.2d presenta el mapa para el índice *txav - Temperatura máxima promedio* (definición en Cap. 1). Las unidades de este índice son $^{\circ}\text{C}/\text{año}$. La tabla 5.0a, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones para Cundinamarca. Se puede apreciar una tendencia al aumento en el promedio de las temperaturas máximas diarias para todos los periodos, tanto para el total del mapa, como únicamente al interior de Cundinamarca. Existe mayor cantidad de estaciones que tienden al aumento (entre 9 y 13) en comparación a las que tienden a la disminución, que no resultan ser más de 3 estaciones. Los periodos que se aprecian con promedios más altos son DEF y JJA con $0,05^{\circ}\text{C}/\text{año}$, mientras que los promedios más bajos son MAM y SON con $0,04^{\circ}\text{C}/\text{año}$.

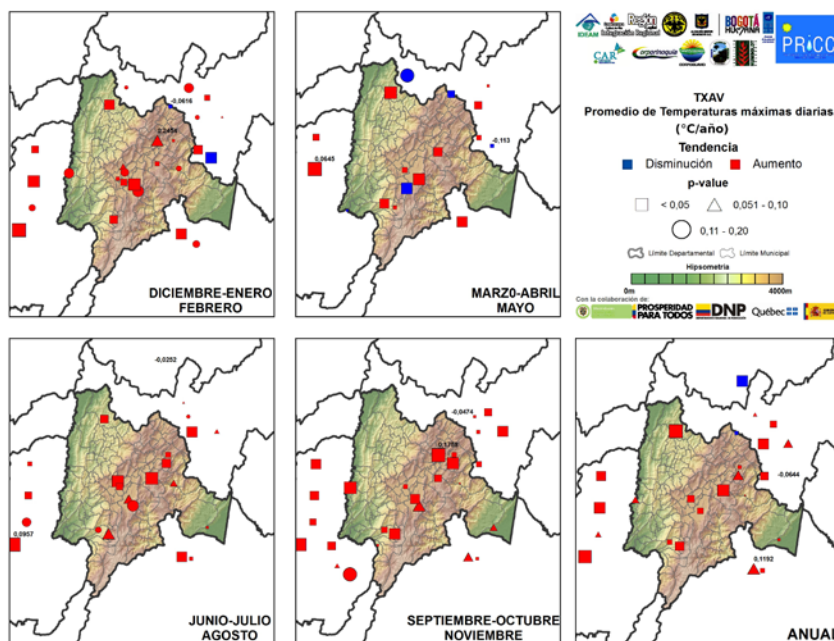
Esto resulta una evidencia en la señal de cambio climático en la región Bogotá-Cundinamarca como un aumento en la magnitud de las temperaturas máximas diarias, es decir que el promedio de la temperatura máxima diaria tienden a ser cada vez más mayor. De continuar esta tendencia, se esperan aumentos en el promedio de la temperatura máxima diaria en el orden de $0,4^{\circ}\text{C}$ por década (tomando como referencia el periodo anual), lo que implica aumentos alrededor de 2°C dentro de 50 años.

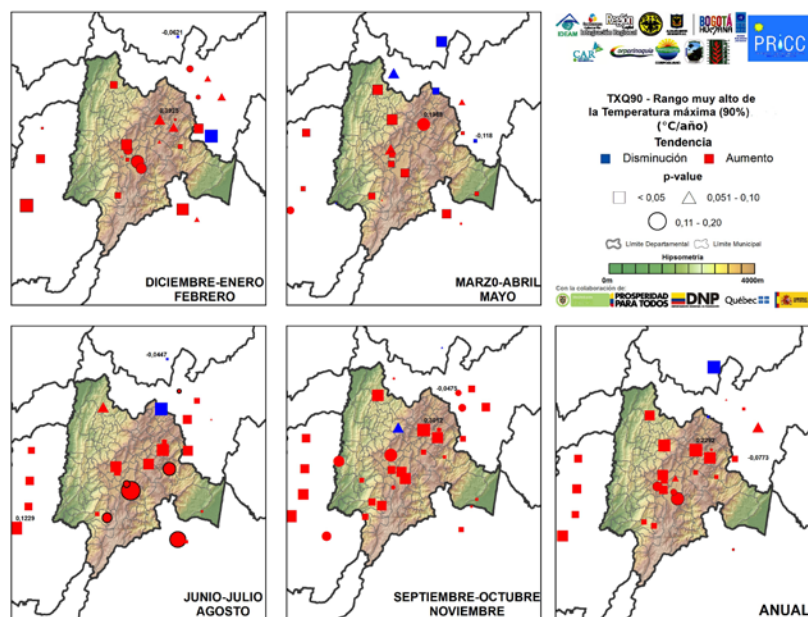
La Fig. 5.2.1b presenta el mapa para el índice *txq90 - percentil 90 de la Temperatura máxima diaria* (definición en Cap. 2). Las unidades de este índice son $^{\circ}\text{C}/\text{año}$. Este índice permite apreciar el percentil 90 de las temperaturas máximas diarias para cada periodo analizado, es decir que tan sólo un 10 % son datos mayores. La tabla 5.0b, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones en Cundinamarca.

La tendencia es al aumento generalizado para todos los periodos, siendo el periodo con valores más altos el DEF, con un promedio al interior de Cundinamarca de $0,06^{\circ}\text{C}/\text{año}$ y los demás periodos con $0,05^{\circ}\text{C}/\text{año}$.

año. Al igual que el índice txav, esto resulta una evidencia en la señal de cambio climático en la región Bogotá-Cundinamarca, lo que significa que la magnitud del percentil 90 de la variable temperatura máxima diaria está tendiendo al aumento en una proporción del orden de $0,5^{\circ}\text{C}$ por decada y, de continuar esta tendencia al aumento, en 50 años tendremos un aumento en este percentil 90 en unos $2,5^{\circ}\text{C}$.

FIGURA 5.2.1: MAPAS DE LA TEMPERATURA MÁXIMA (MAGNITUD)





(a) Mapa para txav Temperatura Máxima promedio

(b) Mapa para txq90 Percentil 90 de la Temperatura Máxima

TABLA 5.1: TENDENCIAS PARA LA TEMPERATURA MÁXIMA (MAGNITUD)

(a) Índice txav

Periodo	Promedio Total Mapa (°C/año)	Promedio C/marca (°C/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (°C/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (°C/año)	Promedio Disminución C/marca (°C/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (°C/año)
DEF	0,05	0,04	0,05	11	0,08	-0,04	2	-0,06
MAM	0,01	0,02	0,04	9	0,06	-0,04	3	-0,06
JJA	0,04	0,04	0,05	13	0,08	-0,02	1	-0,02
SON	0,05	0,04	0,04	12	0,08	-0,05	1	-0,05
Anual	0,03	0,03	0,04	12	0,06	-0,06	1	-0,06

(b) Índice txq90

Periodo	Promedio Total Mapa (mm/año)	Promedio C/marca (mm/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (mm/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (mm/año)	Promedio Disminución C/marca (mm/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (mm/año)
DEF	-0,01	-0,01	0,1	10	0,2	-0,1	15	-0,2
MAM	0,01	0,01	0,08	19	0,2	-0,09	14	-0,2
JJA	0,03	0,02	0,08	28	0,2	-0,1	13	-0,2
SON	0,01	0,02	0,08	33	0,2	-0,1	12	-0,2
Anual	-0,0002	0,01	0,05	34	0,1	-0,08	15	-0,2

4.2.2 Temperatura Máxima - Frecuencia: $txhw90$ Percentil 90 de la Duración de ondas de calor para 10 días de Tx - $txf90$ fracción de días por encima del rango muy alto (percentil 90) de la Tx

La Fig. 5.2.2a presenta el mapa para el índice $txhw90$ - Percentil 90 de la duración de ondas de calor para 10 días de Tx (definición en Cap. 1). Las unidades de este índice son *Días/año*. Este índice permite ver la tendencia en la frecuencia de las ondas de calor, como un aumento o disminución de días por año para cada periodo analizado. La tabla 5.1a, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones para Cundinamarca. Se puede apreciar una tendencia al aumento en las ondas de calor para todos los periodos, tanto para el total del mapa, como unicamente al interior de Cundinamarca.

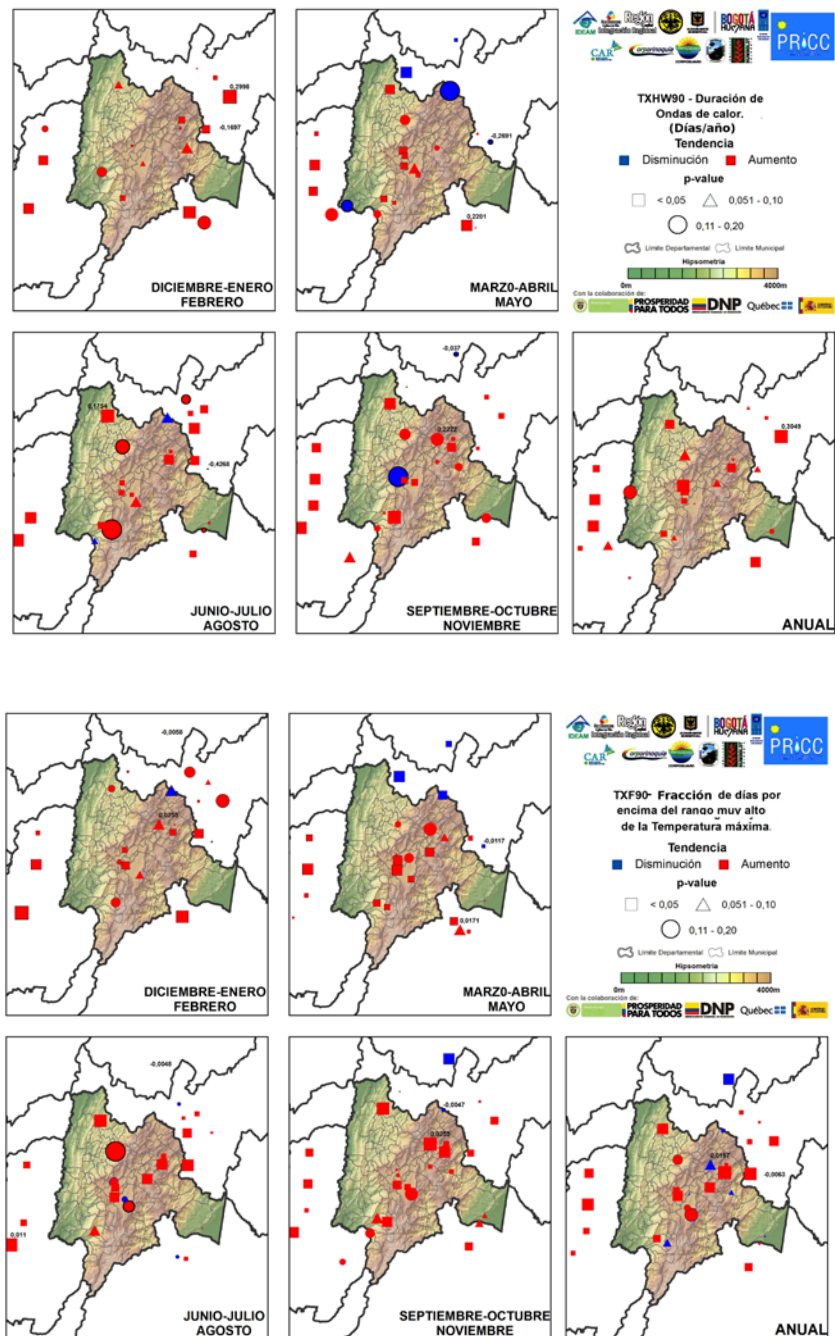
El periodo trimestral que se aprecia con el promedio más alto de ondas de calor es DEF con 0,1 días/año, mientras que el periodo con menor promedio en las ondas de calor es MAM con 0,07 días/año. Por su parte, las tendencias máximas en las ondas de calor llegan a estar entre 0,1 y 0,2 días/año. Esto resulta una evidencia en la señal de cambio climático en la región Bogotá-Cundinamarca como un aumento en la frecuencia de los promedios de las ondas de calor, es decir que la cantidad de veces que se presentan días muy calurosos tiende al aumento. De continuar esta tendencia, se esperan aumentos el promedio de las ondas de calor entre 0,7 a 1 día por cada decada, lo que implica que en 50 años tendremos algunos 3 a 5 días más de ondas de calor, dependiendo el periodo analizado.

La Fig. 5.2.2b presenta el mapa para el índice $txf90$ - Fracción de días por encima del rango muy alto (percentil 90) de la Temperatura máxima (definición en Cap. 2). Este índice corresponde a la relación entre la cantidad de días que sobrepasaron el valor del percentil 90 del periodo analizado y el total de días del periodo. La tabla 5.1b, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones para Cundinamarca. Se puede apreciar una tendencia al aumento en los días en que la temperatura máxima diaria se encuentra por encima del percentil 90 para todos los periodos, en una proporción de 0,01 (equivalente al 1 % por año), para los periodos DEF, JJA y SON.

Esta tendencia muestra una señal de cambio climático en la región Bogotá-Cundinamarca, dada la mayor cantidad de estaciones que presentan la condición de aumento para la cantidad de días que año a año superan el percentil 90. De continuar esta tendencia, se esperan cambios en el orden del 10 % por decada en la cantidad de días que sobrepasan el percentil 90, lo que significa que en 50 años, la condición actual de la cantidad de días que sobrepasan el percentil 90 habrá aumentado en un valor cercano a un 50 % ¹².

¹² Como referencia se reporta la cantidad de días que sobrepasan el percentil 90 para la estación «Aeropuerto ElDorado (21205790)», que es de 11 días en promedio para el periodo MAM (uno de los más bajos) durante los 31 años (1980 a 2010). El cambio proyectado aquí es un aumento del orden de 1 % por cada año, es decir 1 día más por decada y de continuar la tendencia lineal se puede esperar un cambio de 5 días más en 50 años.

FIGURA 5.2.2: MAPAS DE LA TEMPERATURA MÁXIMA (FRECUENCIA)



(a) Mapa para txhw90 Percentil 90 de la Duración de ondas de calor

(b) Mapa para txf90 fracción de días por encima del rango muy alto para 10 días de Tx

(percentil 90) de la Temperatura máxima

TABLA 5.2: TENDENCIAS PARA LA TEMPERATURA MÁXIMA (FRECUENCIA)

(a) Índice txhw90

Periodo	Promedio Total Mapa (Días/año)	Promedio C/marca (Días/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (Días/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (Días/año)	Promedio Disminución C/marca (Días/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (Días/año)
DEF	0,1	0,09	0,1	8	0,19	-0,1	1	-0,1
MAM	0,04	0,05	0,07	11	0,10	-0,04	3	-0,06
JJA	0,05	0,06	0,08	13	0,18	-0,04	2	-0,04
SON	0,08	0,07	0,09	13	0,22	-0,02	2	-0,03
Anual	0,1	0,1	0,1	12	0,22	Sin datos	0	Sin datos

(b) Índice txf90

Periodo	Promedio Total Mapa (fracción/año)	Promedio C/marca (fracción/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (fracción/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (fracción/año)	Promedio Disminución C/marca (fracción/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (fracción/año)
DEF	0,01	0,004	0,01	8	0,01	-0,01	1	-0,01
MAM	0,004	0,004	0,005	12	0,01	-0,01	1	-0,01
JJA	0,005	0,004	0,01	12	0,01	-0,003	2	-0,003
SON	0,01	0,004	0,01	14	0,01	-0,005	1	-0,005
Anual	0,004	0,004	0,004	15	0,01	-0,01	1	-0,01

4.3 TEMPERATURA MÍNIMA

4.3.1 Temperatura Mínima - Magnitud: t_{nav} Temperatura Mínima promedio - $tnq10$ Percentil 10 de la Temperatura Mínima

La fig. 5.3.1a presenta el mapa para el índice t_{nav} - Temperatura mínima promedio (definición en Cap. 1). Las unidades de este índice son $^{\circ}\text{C}/\text{año}$. La tabla 5.2a, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones para Cundinamarca. Se puede apreciar una tendencia al aumento en el promedio de las temperaturas mínimas diarias hacia el centro del departamento y disminuciones hacia el nororiente.

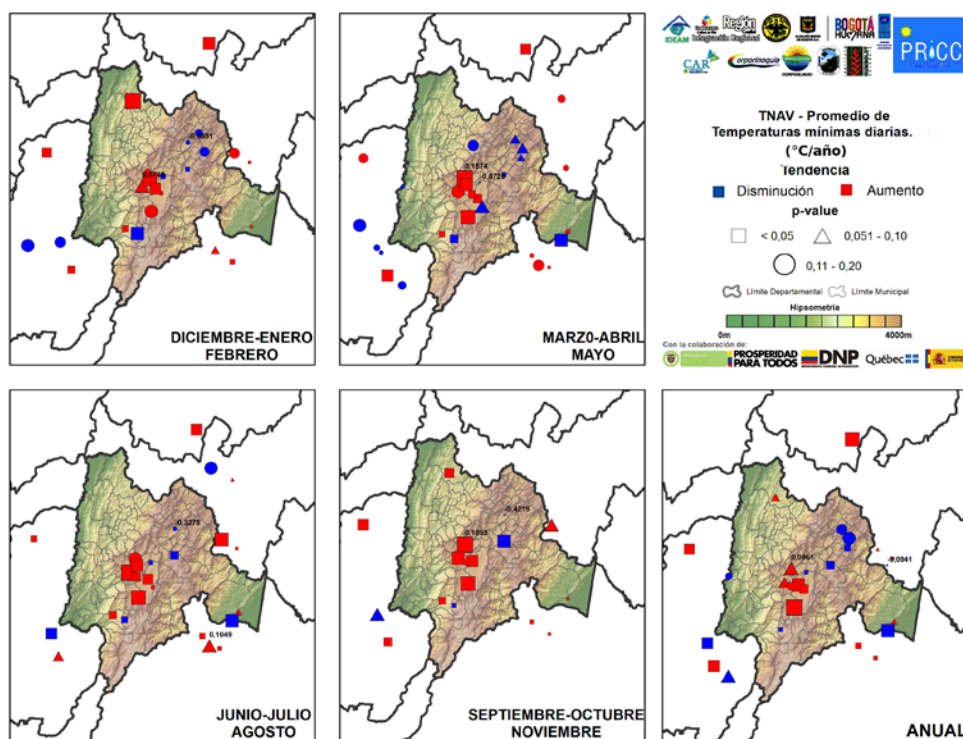
Los aumentos en la variable temperatura mínima están en promedio en valores entre $0,04$ a $0,06^{\circ}\text{C}/\text{año}$, mientras que las disminuciones están entre $-0,04$ y $-0,08^{\circ}\text{C}/\text{año}$. De continuar esta tendencia el promedio en la variable temperatura mínima diaria habrá aumentado hacia el centro del departamento en $0,5^{\circ}\text{C}$ por década (tomando como referencia el periodo anual), lo que significa aproximadamente un aumento dentro de 50 años de $2,5^{\circ}\text{C}$. Por su parte, en los sitios en donde hay tendencia a la disminución la tasa será de $-0,6^{\circ}\text{C}$ por década (tomando como referencia el periodo anual), lo que significa una disminución cercana a las 3°C dentro de 50 años.

La fig. 5.3.1b presenta el mapa para el índice $tnq10$ - percentil 10 de la Temperatura mínima (definición en Cap. 2). Las unidades de este índice son $^{\circ}\text{C}/\text{año}$. La tabla 5.2b, presenta los datos promedio para las estaciones que presentan aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca. Se aprecian aumentos hacia el centro

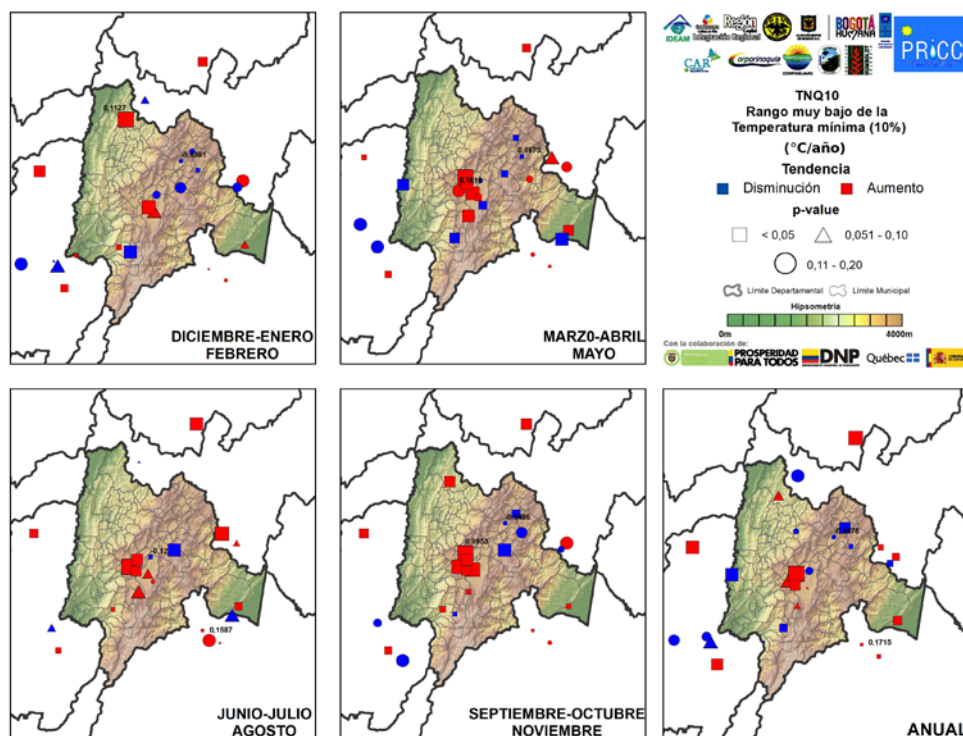
del departamento (al igual que para tnav) y disminuciones hacia el nororiente en el valor del percentil 10 de la temperatura mínima. Los rangos de los aumentos son del orden de 0,04 a 0,06 °C/año, mientras que las disminuciones son del orden de -0,05 a -0,1°C/año.

De continuar esta tendencia, el valor del percentil 10 de la temperatura mínima tendrá una tasa de incremento en la parte central del departamento de 0,4 a 0,6°C por decada, lo que puede implicar aumentos en 50 años por encima de 2°C. Mientras que para las zonas en donde la tendencia es a disminuir, como al nororiente del departamento, la magnitud de la tasa de cambio es aún más pronunciada, siendo del orden de -0,5 a 1°C por decada, lo que puede implicar disminuciones de continuar la misma tendencia del orden de -2,5 a -5°C dentro de 50 años.

FIGURA 5.3.1: MAPAS PARA LA MAGNITUD DE LA TEMPERATURA MÍNIMA



(a) Mapa para tnav Temperatura Mínima promedio



(b) Mapa para tnq10 Percentil 10 de la Temperatura Mínima

TABLA 5.3: TENDENCIAS PARA LA TEMPERATURA MÍNIMA (MAGNITUD)

(a) Índice tn_{av}

Periodo	Promedio Total Mapa (°C/año)	Promedio C/marca (°C/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (°C/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (°C/año)	Promedio Disminución C/marca (°C/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (°C/año)
DEF	-0,01	0,004	0,05	9	0,1	-0,08	5	-0,1
MAM	0,01	-0,001	0,06	6	0,1	-0,04	8	-0,1
JJA	0,01	0,03	0,05	10	0,1	-0,06	3	-0,1
SON	-0,003	0,01	0,04	9	0,1	-0,06	5	-0,1
Anual	0,01	0,01	0,05	10	0,1	-0,06	7	-0,1

(b) Índice tnq10

Periodo	Promedio Total Mapa (°C/año)	Promedio C/marca (°C/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (°C/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (°C/año)	Promedio Disminución C/marca (°C/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (°C/año)
DEF	-0,04	-0,03	0,06	5	0,1	-0,1	6	-0,2
MAM	0,02	0,02	0,08	10	0,2	-0,07	6	-0,1
JJA	0,03	0,03	0,05	8	0,1	-0,05	2	-0,1
SON	-0,01	0,01	0,06	9	0,1	-0,07	6	-0,1
Anual	-0,01	-0,02	0,05	8	0,1	-0,09	8	-0,1

4.3.2 Temperatura mínima - frecuencia

4.3.2.1 **Ondas de Frío: $tnw10$** Percentil 10 de la Duración de ondas frías para 10 días de T_n - **$tnf10$** fracción de días por debajo del rango muy bajo (percentil 10) de la T_n

La Fig. 5.3.2a presenta el mapa para el índice $tnw10$ - Percentil 10 de la duración de ondas frías para 10 días de T_x (definición en Cap. 1). Las unidades de este índice son Días/año. Este índice permite ver la tendencia en la frecuencia de las ondas de frío, como un aumento o disminución de días por año para cada periodo analizado.

La tabla 5.3a, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca. Se puede apreciar en la figura 5.3.2a, una tendencia hacia el centro del departamento hacia la disminución en las ondas de frío y un aumento hacia el nororiente del departamento. Lo anterior contrasta con el aumento en las ondas de calor hacia el centro del departamento y disminución hacia el nororiente (Cap. 5.2.2).

El periodo trimestral que se aprecia con el *aumento en promedio* más alto de ondas de frío es SON con 0,1 días/año, mientras que el periodo con la *disminución* en promedio más baja es DEF con -0,08 días/año. Por su parte, las tendencias en promedio máximas en las ondas de frío llegan a estar entre 0,1 y 0,3 días/año, mientras que las tendencias mínimas en las ondas de frío llegan a estar entre -0,04 y -0,08 días/año. Tomando como referencia el periodo anual, se pueden inferir tendencias (siempre y cuando la linealidad continúe de la misma forma) en aproximadamente 3 días por década para las zonas en donde se incrementan las ondas de frío (nororiente de Cundinamarca) y de 0,7 días por década para las zonas en donde disminuyen las ondas de frío (centro de Cundinamarca).

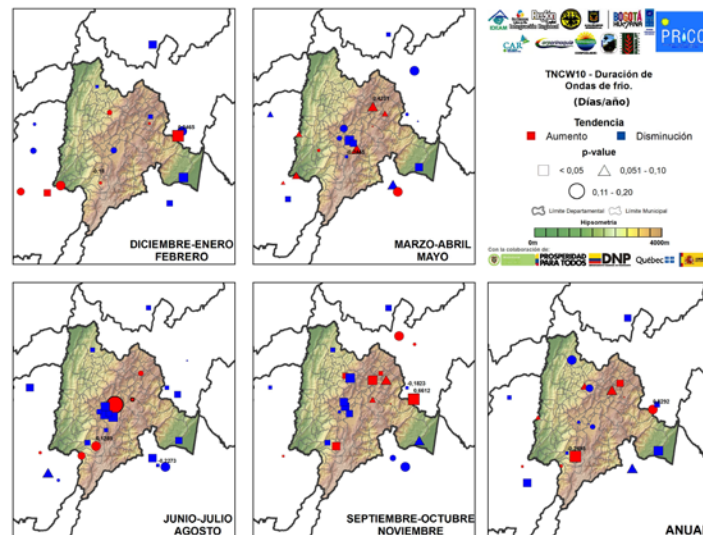
La Fig. 5.3.2b presenta el mapa para el índice $tnf10$ - fracción de días por debajo del percentil 10 de la temperatura mínima (definición en Cap. 2). Este índice corresponde a la relación entre la cantidad de días que están por debajo del percentil 10 para el periodo analizado y el total de días del periodo.

La tabla 5.3b, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca se aprecia una tendencia a la disminución en los días en que la temperatura mínima diaria se encuentra por debajo del percentil 10 hacia el centro y oriente de Cundinamarca y una tendencia al aumento hacia el nororiente del departamento.

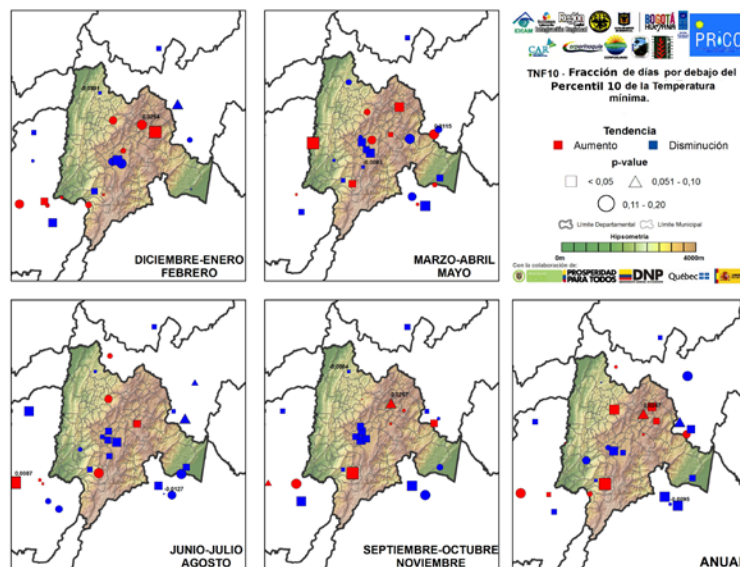
Aunque las tendencias resultan relativamente bajas (disminución entre -0,004 a -0,01 y aumentos entre 0,005 y 0,006 días/año), se puede inferir que de continuar la tendencia lineal, en 50 años tendremos de 0,2 a 0,5 días menos con temperaturas mínimas por debajo del percentil 10 para las zonas en donde disminuye

(centro de Cundinamarca) y para las zonas en donde aumenta (nororiente) tendremos entre 0,2 y 0,3 días adicionales con temperaturas mínimas por debajo del percentil 10¹³.

FIGURA 5.3.2: MAPAS PARA LA FRECUENCIA DE LA TEMPERATURA MÍNIMA.



(a) Mapa para tncw10 Percentil 10 de la Duración de ondas frías para 10



(b) Mapa para tnf10 fracción de días por debajo del percentil 10 de la temperatura mínima

13 Para mayor facilidad en la interpretación, se puede multiplicar por 100 cada una de estas tendencias, obteniendo así un % en la tendencia de aumento o disminución en la cantidad de días que se encuentran por debajo del percentil 10 de la temperatura mínima por cada año.

TABLA 5.4: TENDENCIAS PARA LA TEMPERATURA MÍNIMA (FRECUENCIA)

(a) Índice tncw10

Periodo	Promedio Total Mapa (Días/año)	Promedio C/marca (Días/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (Días/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (Días/año)	Promedio Disminución C/marca (Días/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (Días/año)
DEF	0,01	0,00	0,09	3	0,1	-0,08	4	-0,1
MAM	-0,01	0,002	0,08	5	0,1	-0,07	5	-0,1
JJA	-0,05	-0,01	0,07	5	0,1	-0,07	8	-0,1
SON	0,03	0,05	0,1	7	0,3	-0,04	6	-0,1
Anual	0,07	0,1	0,3	6	0,5	-0,07	6	-0,1

(b) Índice tnf10

Periodo	Promedio Total Mapa (fracción/año)	Promedio C/marca (fracción/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (fracción/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (fracción/año)	Promedio Disminución C/marca (fracción/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (fracción/año)
DEF	0,002	0,001	0,006	6	0,007	-0,004	6	-0,01
MAM	-0,0004	-0,001	0,005	7	0,007	-0,01	10	-0,01
JJA	-0,002	-0,002	0,005	4	0,008	-0,005	10	-0,009
SON	0,0002	-0,0004	0,006	6	0,01	-0,005	8	-0,008
Anual	0,0003	-0,0003	0,006	7	0,008	-0,005	9	-0,01

4.4 PRECIPITACIÓN

4.4.1 Precipitación - Magnitud: *pav* Promedio de precipitación total - *pint* Promedio de precipitación para días húmedos - **pq90** Percentil 90 de días húmedos - **px5d** Máximo de precipitación en 5 días consecutivos - **pfl90** Promedio para las precipitaciones extremas

La fig. 5.4.1a presenta el mapa para el índice *pav* (definición en Cap. 1). Este índice permite visualizar el promedio de precipitación diaria del periodo. Sus unidades son mm/día.año; es decir muestra la tendencia del cambio promedio en la precipitación diaria cada año ¹⁴.

La tabla 5.4a, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca. Se puede apreciar una tendencia a la disminución hacia la zona oriental de cundinamarca para casi todos los periodos a excepción de MAM que tiende al aumento. Estas disminuciones son en promedio (para estaciones al interior de cundinamarca) del orden de -0,04 a -0,1 mm/año y se destaca que el periodo DEF tiene una marcada tendencia a la disminución para la zona central y oriental, sin embargo no resultan los promedios en disminución más bajos, los cuales resultan para el periodo JJA con valores del orden de -0,1mm/año y además tiene la tendencia más baja con -0,2mm/año para esta zona oriental del departamento. De continuar esta tendencia, se pueden proyectar disminuciones promedio en la precipitación diaria

¹⁴ Es normal expresar estas unidades como mm/año.

de 0,4 a 1 mm por década, lo que puede implicar que en 50 años caigan entre 2 a 5 mm menos en comparación a lo actual.¹⁵

La Fig. 5.4.1b presenta el mapa para el índice pint (definición en Cap. 2). Este índice permite visualizar el promedio de precipitación para los días húmedos¹⁶ en el periodo. Sus unidades son mm/día.año; es decir la forma como cambia la precipitación solo para los días húmedos en promedio cada año. La tabla 5.4b, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca. Se pueden apreciar tendencias a la disminución desde la región central hacia el oriente de Cundinamarca para todos los periodos con valores en el orden de -0,08 a -0,1 mm/año, pero con tendencias mínimas del orden de -0,2mm/año. De continuar esta tendencia, la tasa de cambio en promedio será del orden de -0,8 a -1 mm por década, lo que puede implicar cambios en 50 años en el orden de 4 a 5 mm menos en comparación al promedio de precipitación para los días húmedos actuales.

Por su parte la región central hacia el occidente de Cundinamarca, se aprecia con tendencia al aumento en el promedio de precipitación para los días húmedos, para casi todos los periodos a excepción de DEF que no resulta tan evidente. Estas tendencias al aumento están en promedio para los periodos trimestrales en el orden de 0,08 a 0,1 mm/año, pero con tendencias máximas en el orden de 0,2 mm/año. De continuar esta tendencia, la tasa de cambio en promedio será del orden de 0,8 a 1 mm por década, lo que puede implicar cambios en 50 años en el orden de 4 a 5 mm más en comparación al promedio de precipitación para los días húmedos actuales¹⁷

La fig. 5.4.1c presenta el mapa para el índice *pq90* (definición en Cap. 3). Este índice permite apreciar el cambio para las precipitaciones extremas, es decir la forma como está cambiando el percentil 90 de los días húmedos. La tabla 5.4c, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca. Se aprecia una tendencia *desde la región central hacia el oriente de Cundinamarca* a la disminución, en especial para los periodos trimestrales DEF, JJA¹⁸ y el periodo Anual. El valor promedio de esta disminución es del orden de -0,2 mm/año (igual todos los periodos), siendo la disminución más baja en el orden de -0,4 mm/año, justo para estos dos periodos trimestrales DEF y JJA. De continuar esta tendencia, la tasa de cambio en promedio será del orden de 2 mm menos por década, lo que puede implicar cambios en 50 años en el orden de 10 mm menos en comparación al percentil 90 que se tiene hoy día.

Por su parte la *región central de Cundinamarca*, se aprecia con tendencia al aumento en el percentil 90 de los días húmedos, lo que significa tendencia a fuertes lluvias. Estas tendencias son del orden de 0,1 a 0,2

15 Como referencia se reporta el dato promedio de la estación «Aeropuerto El Dorado (21205790)», el cual es de 0,4mm diarios (este promedio tiene en cuenta los días en donde no llueve) para el periodo JJA durante los 31 años (1980 a 2010). El cambio proyectando es un aumento del orden de 0,03mm por año.

Un día húmedo se define como precipitación mayor a 1mm.

16 Un día húmedo se define como precipitación mayor a 1mm.

17 Como referencia se reporta el promedio de precipitación para los días húmedos en la estación «Aeropuerto El Dorado (21205790)», para el periodo MAM durante los 31 años de análisis 1980-2010, el cual es de 7,7mm. La tasa de cambio encontrada aquí es en promedio del orden de 0,08 a 0,1mm cada año.

18 Los periodos trimestrales DEF y JJA típicamente pertenecen al régimen de lluvias bajas sobre la región Andina.

mm/año, con tendencias máximas de 0,4 mm/año. De continuar esta tendencia, la tasa de cambio en promedio será del orden de 1 a 2 mm más por década, lo que puede implicar cambios en 50 años en el orden de 5 a 10 mm más en comparación al percentil 90 que se tiene hoy día¹⁹. Esto significa que sobre esta región central de Cundinamarca se deben esperar más lluvias extremas.

La Fig. 5.4.1d presenta el mapa para el índice *px5d* - Máximo de precipitación en 5 días consecutivos (definición en Cap. 4). La tabla 5.4d, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca. Se aprecia una tendencia desde la *región central hacia el oriente de Cundinamarca* a la disminución, en especial para los periodos trimes- trales DEF, JJA y el periodo Anual. El valor promedio de esta disminución es del orden de -0,8 a -1,3 mm/año, siendo la disminución más baja en el orden de -3 mm/año para el periodo JJA. De continuar esta tendencia, la tasa de cambio en promedio será del orden de 8 a 13 mm *menos* por década, lo que puede implicar cambios en 50 años en el orden de 40 a 65 mm *menos* en comparación al volumen de precipitación que cae en 5 días seguidos hoy día.

Por su parte la *región central de Cundinamarca*, se aprecia con tendencia al aumento en el volumen de precipitación que cae en 5 días seguidos, lo que indica mayor tendencia a lluvias más fuertes. Estas tendencias son del orden de 0,6 a 0,9 mm/año, con tendencias máximas de 1,6 mm/año. De continuar esta tendencia, la tasa de cambio en promedio será del orden de 6 a 9 mm más por década, lo que puede implicar cambios en 50 años en el orden de 30 a 45 mm más en comparación al volumen de lluvia que cae hoy día en 5 días seguidos²⁰. Esto significa que sobre esta *región central de Cundinamarca* se deben esperar más lluvias extremas.

La Fig. 5.4.1e presenta el mapa para el índice *pfl90* (definición en Cap. 5). Este índice se puede entender como la tendencia promedio al aumento o disminución de las precipitaciones extremas para los días húmedos, donde «extremo» corresponde a precipitaciones por encima del percentil 90. Aunque este índice no tiene unidades (pues se trata de una relación entre mismas variables), su interpretación resulta más fácil, sí se tiene en cuenta que es la sumatoria de **mm** de precipitación extrema (sólo para los días húmedos) dividido entre los **mm** de precipitación total por año²¹.

La tabla 5.4e, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca. Se aprecia una tendencia a la disminución hacia la zona oriental de Cundinamarca para todos los periodos, pero resulta muy marcado para el periodo JJA, con tendencias promedio al interior de Cundinamarca en el orden de -0,004 a -0,01 (-0,4 a -1 % por año), pero con valores mínimos de -0,02 (-2 % por año). De continuar estas tendencias se pueden esperar disminuciones del orden de -4 a -10 % por década en las precipitaciones extremas, lo que significa que en 50 años se pueden tener entre -20 a -50 % menos de precipitaciones extremas en comparación a lo actual.

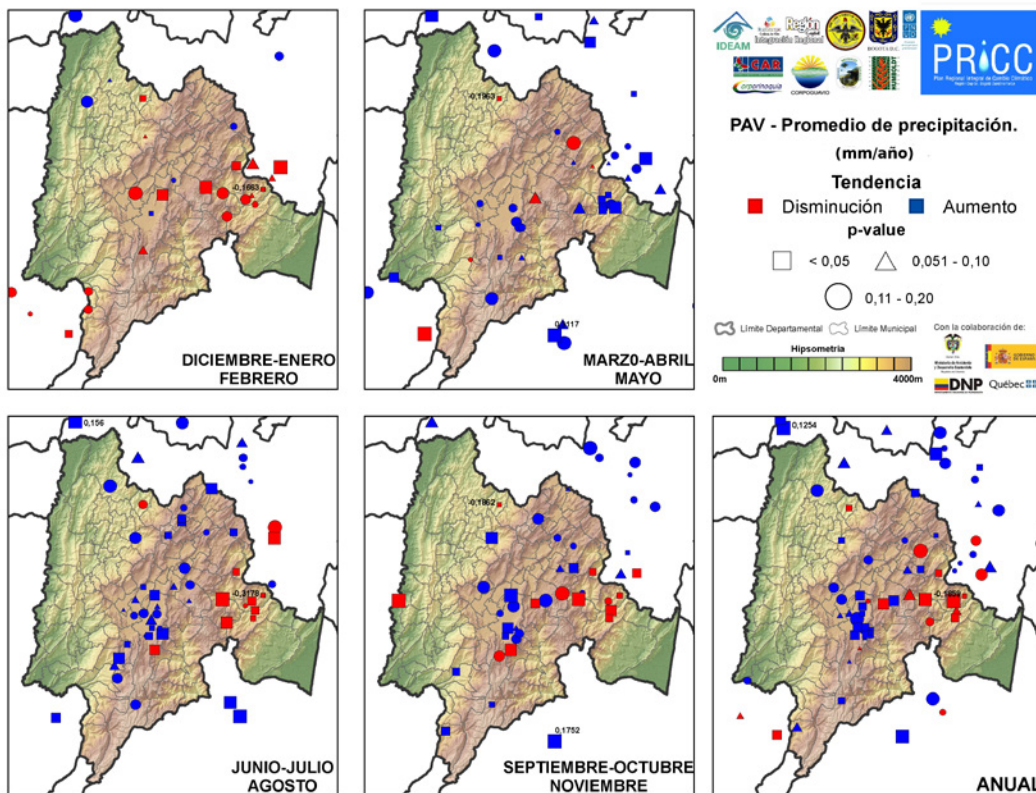
19 Como referencia se reporta el percentil 90 de precipitación para los días húmedos en la estación «Aeropuerto El Dorado (21205790)», para el periodo MAM durante los 31 años de análisis 1980-2010, el cual es de 22 mm. La tasa de cambio encontrada aquí para el percentil 90 es en promedio en el orden de 0,1 a 0,2 mm por cada año.

20 Como referencia se reporta el promedio del volumen de precipitación para 5 días seguidos de la estación «Aeropuerto El Dorado (21205790)», para el periodo JJA durante los 31 años de análisis 1980-2010, el cual es de 34 mm (aunque el máximo es de 75 mm). La tasa de cambio promedio encontrada aquí para el volumen de lluvia que cae en 5 días consecutivos es de 0,6 a 0,9 mm por cada año.

21 Se puede multiplicar por 100 y obtener un porcentaje de incremento o disminución de precipitaciones extremas

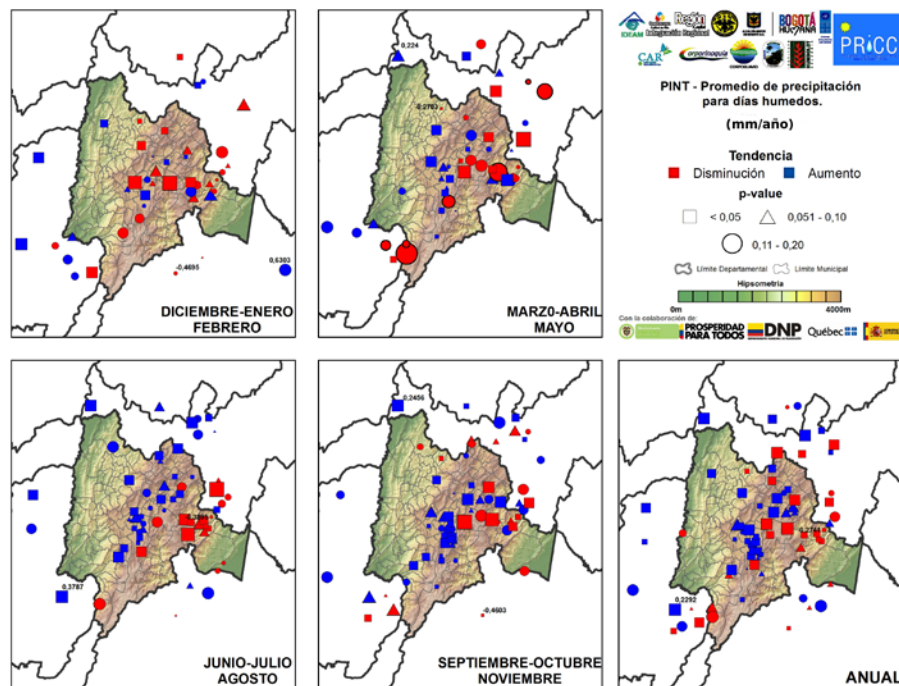
Por su parte las tendencias positivas, que resultan más importantes en términos de inundaciones y riesgos agroclimáticos, se aprecian hacia el centro de Cundinamarca para todos los periodos, con tendencias en el orden de 0,006 a 0,009 (0,6 a 0,9 % por año) para los periodos trimestrales, pero con tendencias máximas de 0,01 (1 % por año). De continuar estas tendencias se pueden esperar aumentos promedio hacia el centro de Cundinamarca en el orden de 6 a 9 % por década en las precipitaciones extremas, lo que significa que en 50 años se pueden tener entre 30 a 40 % más de precipitaciones extremas en comparación a lo actual²².

FIGURA 5.4.1: MAPAS PARA LA MAGNITUD DE LA PRECIPITACIÓN

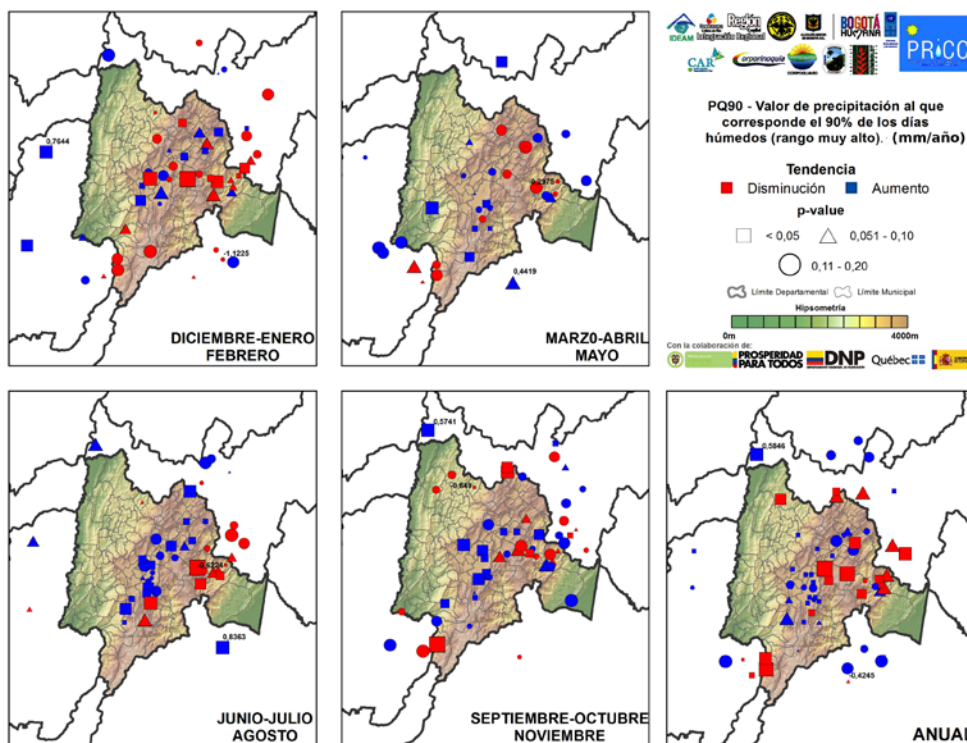


(a) Mapa para pav Promedio de precipitación

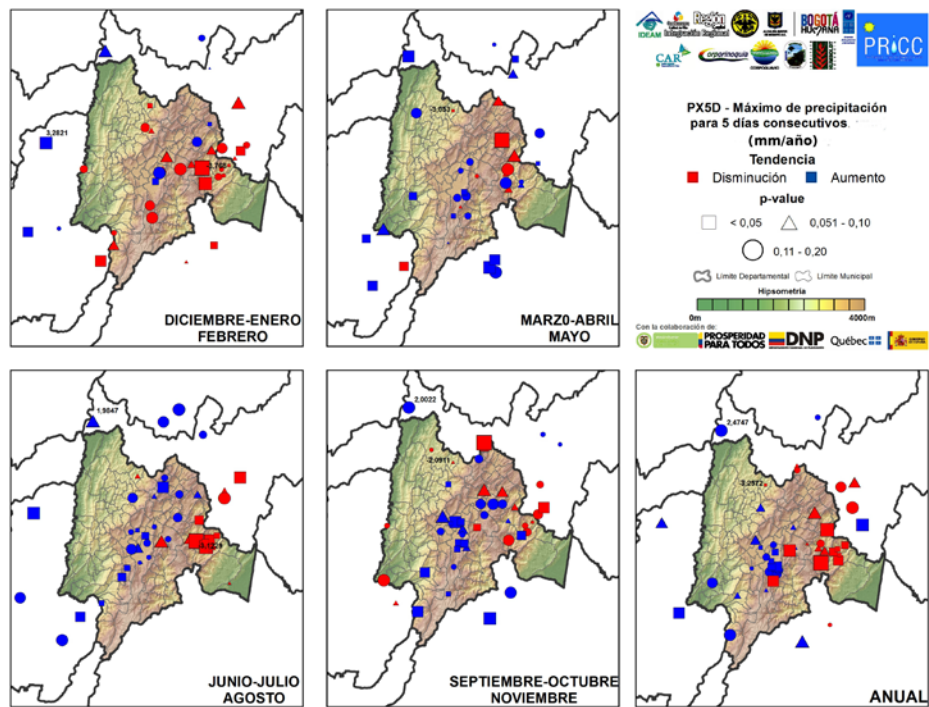
22 Como referencia se reporta el promedio de las precipitaciones extremas diarias, es decir el promedio de los datos de las precipitaciones que se encuentran por encima del percentil 90, para la estación «Aeropuerto El Dorado (21205790)», para el periodo JJA durante los 31 años de análisis 1980-2010, es de 16 mm (aunque el máximo es de 35 mm). La tasa de cambio promedio encontrada aquí para el aumento de las precipitaciones extremas es de 0,6 a 0,9 % por cada año.



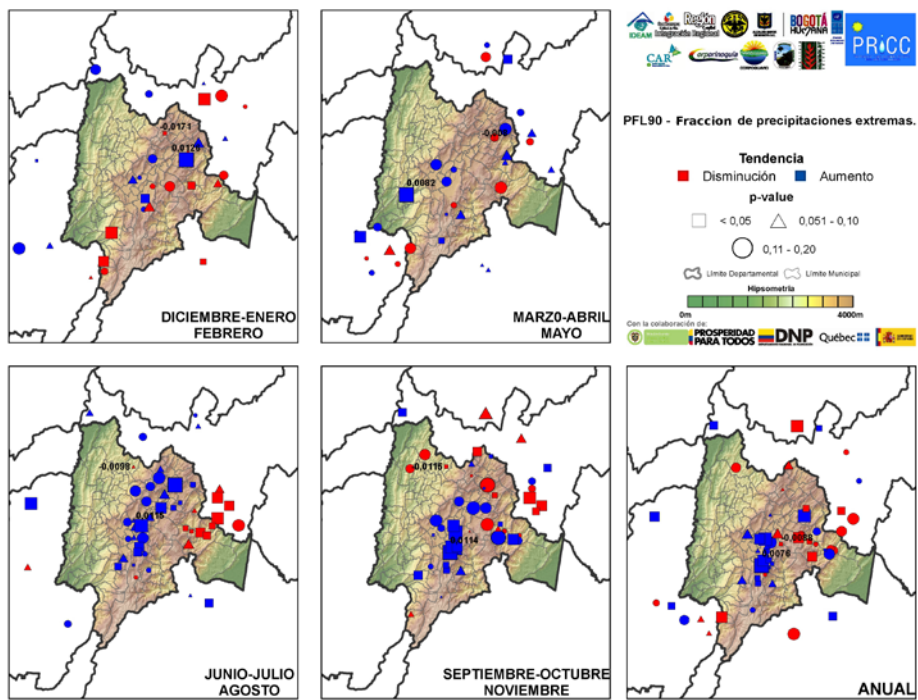
(b) Mapa para pint Promedio de precipitación para días húmedos



(c) Mapa para pq90 Percentil 90 de días húmedos



(d) Mapa para px5d Máximo de precipitación en 5 días consecutivos



(e) Mapa para pfl90

4.4.2 Precipitación - Frecuencia: *pxcdd* Máximo de días consecutivos secos - *pxcwd* Máximo de días consecutivos húmedos - *pn10mm* No. de días donde precip \geq 10mm - *pnl90* Eventos de precipitación extrema en el largo plazo

La Fig. 5.4.2a presenta el mapa para el índice *pxcdd* - Máximo de días consecutivos secos (definición en Cap. 1) y Fig. 5.4.2b presenta el mapa para el índice *pxcwd* - Máximo de días consecutivos húmedos (definición en Cap. 2). Se puede apreciar que estos dos mapas son complementarios; en donde los días secos aumentan, los días húmedos disminuyen, como lo presentado para el periodo DEF. Por el contrario en donde los días secos disminuyen, los días húmedos tienden a aumentar, como para los periodos trimestrales MAM, JJA y SON.

Las tablas 5.5a y 5.5b, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca. Mientras el promedio en los aumentos de los *días consecutivos secos* son del orden de 0,1 a 0,4 días/año, el promedio en los aumentos para los *días consecutivos húmedos* tienen una tasa un poco menor con valores en el orden de 0,1 a 0,2 días/año. Esto significa un poco más de tendencia a tener días más secos, en comparación a la cantidad de *días consecutivos húmedos*. De continuar estas tendencias se pueden esperar aumentos en el número de días secos de 1 a 4 días por decada y de 1 a 2 días por decada en el número de días húmedos consecutivos ²³.

La Fig. 5.4.2c presenta el mapa para el índice *pn10mm* (definición en Cap. 3). Este índice, nos permite ver la forma como estan cambiando los días con precipitaciones por encima de 10mm. Sus unidades son días/año. La tabla 5.5c, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca. Se puede apreciar que hacia la *zona oriental de Cundinamarca* la tendencia es a la disminución, para los periodos trimestrales DEF, JJA y SON.

Estas tendencias a la disminución son en promedio para los periodos trimestrales de -0,1 a -0,4 días/año para estaciones al interior de Cundinamarca, pero con mínimos hasta de -0,8 días/año. Por su parte en la *zona central de Cundinamarca* se aprecian aumentos del orden de 0,1 a 0,2 días/año, pero con máximos hasta de 0,4 días/año para los periodos trimestrales. De continuar estas tendencias, se puede esperar una tasa de cambio de 1 a 2 días por decada, lo cual significa que en 50 años se puede llegar a tener alrededor de 5 a 10 días más con precipitaciones por encima de 10mm²⁴.

La Fig. 5.4.2d presenta el mapa para el índice *pnl90* (definición en Cap. 4). Este índice *pnl90* equivale al número de eventos con precipitaciones extremas en el largo plazo (todo el periodo analizado:1980 - 2010),

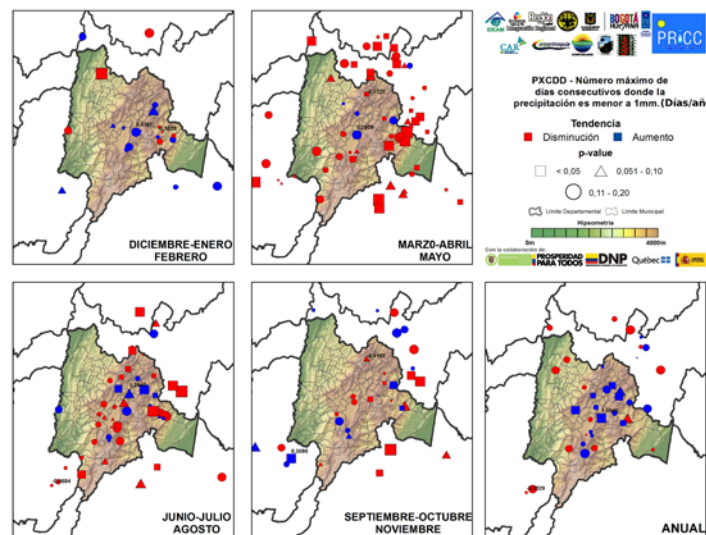
23 Como referencia se reporta el promedio del máximo número de días consecutivos secos, para la estación «Aeropuerto El Dorado (21205790)», para el periodo MAM durante los 31 años de análisis 1980-2010, el cual es de 11 días, aunque el valor máximo llega a estar en 28. La tasa de cambio promedio encontrada aquí para el aumento en el número de días consecutivos secos es de 0,1 a 0,4 días por año. Por otro lado, el promedio en el número máximo de días consecutivos húmedos es de 6 días y la tasa de aumento encontrando aquí es de 0,1 a 0,2 días por año.

24 Como referencia se reporta el promedio del número de días con precipitaciones por encima de 10mm, para la estación «Aeropuerto El Dorado (21205790)», durante los 31 años de análisis 1980-2010, con 3,4 días para el periodo JJA y de 8,6 para el periodo MAM. La tasa de cambio promedio encontrada aquí para la cantidad de días con precipitaciones por encima de 10mm para los periodos trimestrales son del orden de 0,1 a 0,2 días por cada año.

donde extremo corresponde a los valores por encima del percentil 90 para los días húmedos. Las unidades de este índice son Eventos/año.

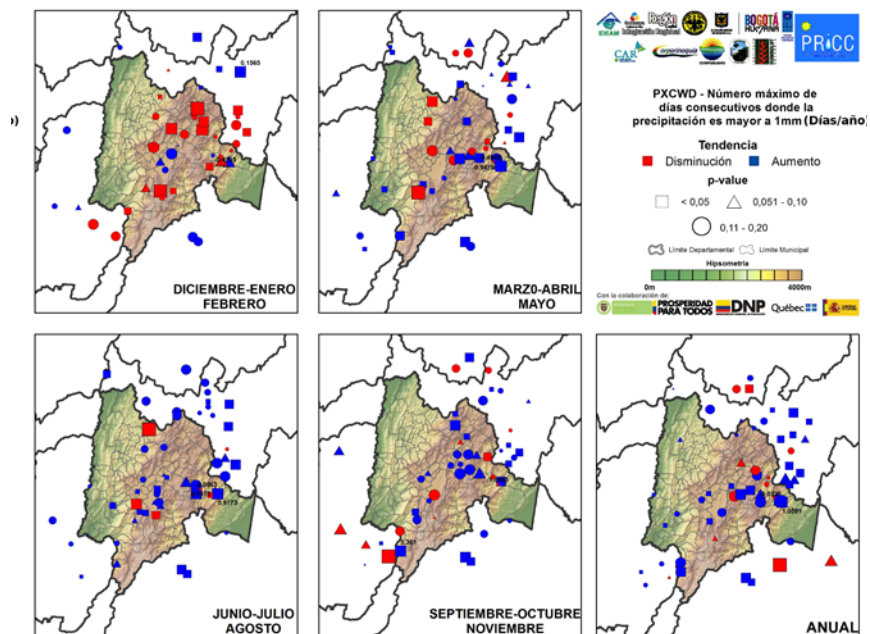
La tabla 5.5d, presenta los datos promedio de las estaciones que presentan aumentos y disminuciones al interior de Cundinamarca. Se aprecia una tendencia a la disminución hacia el oriente de Cundinamarca, con tendencias del orden de -0,1 a -0,2 eventos/año para todos los periodos trimestrales analizados. Por su parte, se aprecian tendencias al aumento hacia el centro del Cundinamarca de 0,05 a 0,1 eventos/año para los periodos trimestrales. De continuar estas tendencias al aumento, se puede esperar una tasa de cambio de 0,5 a 1 evento por década, lo que implica que en 50 años se puede esperar entre 2 a 5 eventos más de lo actual²⁵.

FIGURA 5.4.2: MAPAS PARA LA FRECUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN.

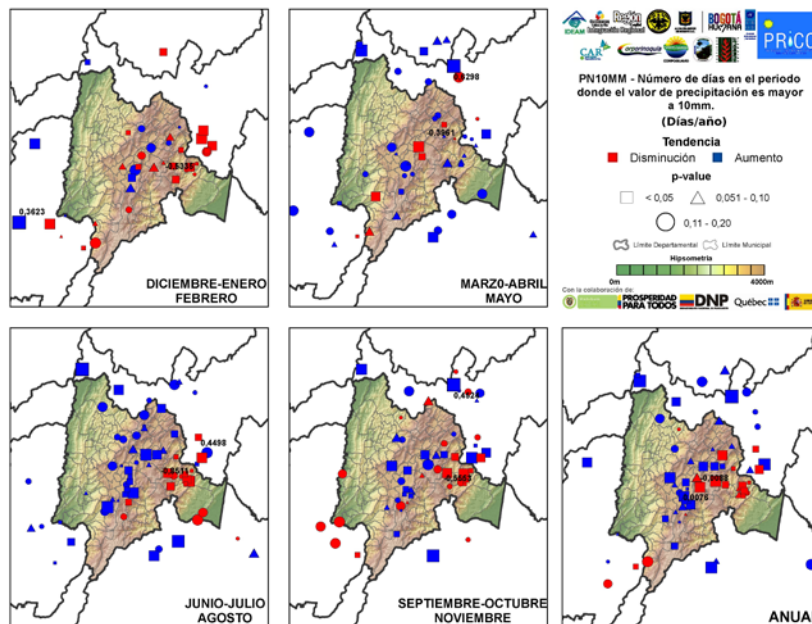


(a) Mapa para pxccd Máximo de días consecutivos secos

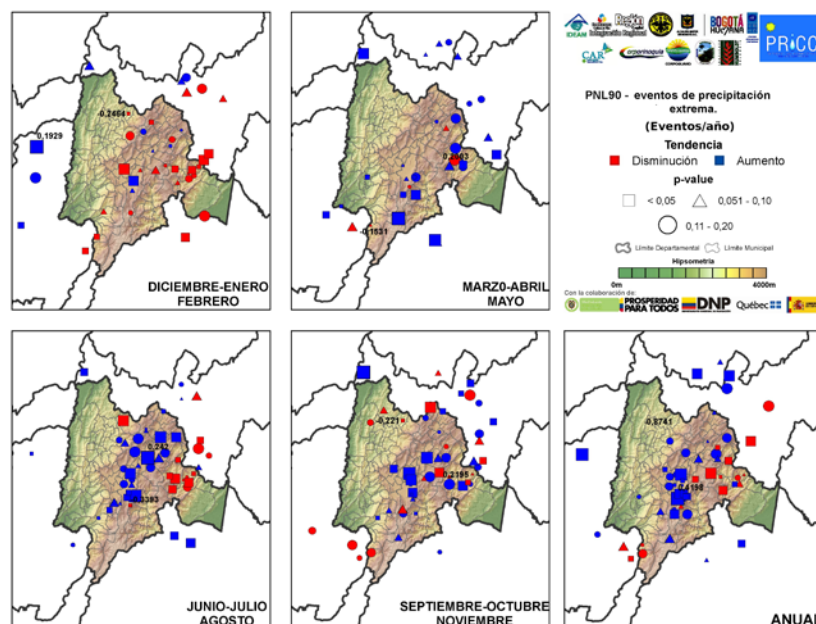
25 Como referencia se reporta el promedio de eventos con precipitaciones fuertes, para la estación «Aeropuerto ElDorado (21205790)», durante los 31 años de análisis 1980-2010, con 1,8 para el trimestre DEF (el más bajo de los 4 trimestres) y con 3,6 para el trimestre MAM (el más alto de los 4 trimestres). La tasa de cambio promedio encontrada aquí para los eventos con precipitaciones fuertes es de 0,05 a 0,1 eventos por año.



(b) Mapa para pxcwd Máximo de días consecutivos húmedos



(c) Mapa para índice pn10mm No. de días donde precip \geq 10mm



(d) Mapa para pnl90

TABLA 5.5: TENDENCIAS PARA LA PRECIPITACIÓN (MAGNITUD)

Periodo	Promedio Total Mapa (mm/año)	Promedio C/marca (mm/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (mm/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (mm/año)	Promedio Disminución C/marca (mm/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (mm/año)
DEF	-0,02	-0,03	0,02	4	0,03	-0,04	13	-0,07
MAM	0,05	0,02	0,04	19	0,07	-0,06	4	-0,07
JJA	0,01	0,003	0,03	34	0,08	-0,10	9	-0,2
SON	0,01	0,01	0,04	22	0,06	-0,05	10	-0,1
Anual	0,01	0,006	0,02	27	0,05	-0,04	11	-0,09

(a) Índice pav

Periodo	Promedio Total Mapa (mm/año)	Promedio C/marca (mm/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (mm/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (mm/año)	Promedio Disminución C/marca (mm/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (mm/año)
DEF	-0,01	-0,01	0,1	10	0,2	-0,1	15	-0,2
MAM	0,01	0,01	0,08	19	0,2	-0,09	14	-0,2
JJA	0,03	0,02	0,08	28	0,2	-0,1	13	-0,2
SON	0,01	0,02	0,08	33	0,2	-0,1	12	-0,2
Anual	-0,0002	0,01	0,05	34	0,1	-0,08	15	-0,2

(b) Índice pint

Periodo	Promedio Total Mapa (mm/año)	Promedio C/marca (mm/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (mm/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (mm/año)	Promedio Disminución C/marca (mm/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (mm/año)
DEF	-0,06	-0,05	0,2	11	0,4	-0,2	18	-0,4
MAM	0,04	0,01	0,2	13	0,2	-0,2	11	-0,3
JJA	0,04	0,02	0,1	21	0,2	-0,2	10	-0,4
SON	0,02	0,08	0,2	26	0,4	-0,2	13	-0,3
Anual	0,01	0,01	0,1	27	0,3	-0,2	17	-0,4

(c) Índice pq90

Periodo	Promedio Total Mapa (mm/año)	Promedio C/marca (mm/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (mm/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (mm/año)	Promedio Disminución C/marca (mm/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (mm/año)
DEF	-0,6	-0,7	0,7	3	0,7	-1,0	16	-1,9
MAM	0,6	0,3	0,9	14	1,6	-0,8	8	-1,2
JJA	0,0	-0,3	0,6	22	1,1	-1,6	14	-3,1
SON	0,2	0,3	0,9	24	1,6	-1,1	11	-2,1
Anual	0,1	-0,08	0,8	19	1,3	-1,2	15	-2,0

(d) Índice px5d

Periodo	Promedio Total Mapa	Promedio C/marca	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca	Promedio Disminución C/marca	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca
DEF	-0,001	-0,002	0,009	7	0,01	-0,01	12	-0,02
MAM	0,001	0,001	0,006	10	0,008	-0,01	6	-0,01
JJA	0,003	0,004	0,007	27	0,01	-0,006	9	-0,01
SON	0,002	0,002	0,006	27	0,01	-0,006	13	-0,01
Anual	0,0002	0,0005	0,004	22	0,008	-0,004	16	-0,01

(e) Índice pfl90

TABLA 5.6: TENDENCIAS PARA LA PRECIPITACIÓN (FRECUENCIA)

Periodo	Promedio Total Mapa (mm/año)	Promedio C/marca (mm/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (mm/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (mm/año)	Promedio Disminución C/marca (mm/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (mm/año)
DEF	-0,6	-0,7	0,7	3	0,7	-1,0	16	-1,9
MAM	0,6	0,3	0,9	14	1,6	-0,8	8	-1,2
JJA	0,0	-0,3	0,6	22	1,1	-1,6	14	-3,1
SON	0,2	0,3	0,9	24	1,6	-1,1	11	-2,1
Anual	0,1	-0,08	0,8	19	1,3	-1,2	15	-2,0

(a) Índice pxccd

Periodo	Promedio Total Mapa (Días/año)	Promedio C/marca (Días/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (Días/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (Días/año)	Promedio Disminución C/marca (Días/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (Días/año)
DEF	-0,04	-0,05	0,07	7	0,1	-0,09	21	-0,2
MAM	0,05	0,01	0,2	12	0,3	-0,2	9	-0,4
JJA	0,05	-0,02	0,1	19	0,3	-0,3	9	-0,5
SON	0,03	-0,02	0,1	18	0,3	-0,3	8	-1,0
Anual	0,07	0,1	0,2	20	0,5	-0,3	7	-0,5

(b) Índice pxcwd

Periodo	Promedio Total Mapa (Días/año)	Promedio C/marca (Días/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (Días/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (Días/año)	Promedio Disminución C/marca (Días/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (Días/año)
DEF	-0,06	-0,08	0,08	6	0,1	-0,1	16	-0,25
MAM	0,1	0,07	0,1	17	0,3	-0,2	5	-0,25
JJA	0,01	-0,04	0,1	30	0,3	-0,4	13	-0,85
SON	0,01	0,02	0,2	19	0,4	-0,2	13	-0,39
Anual	0,1	0,06	0,4	28	0,8	-0,6	14	-1,2

(c) Índice pn10mm

Periodo	Promedio Total Mapa (Eventos/año)	Promedio C/marca (Eventos/año)	Estaciones en Aumento			Estaciones en Disminución		
			Promedio Aumentos C/marca (Eventos/año)	Cantidad Estaciones Aumentos C/marca	Tendencia Máxima C/marca (Eventos/año)	Promedio Disminución C/marca (Eventos/año)	Cantidad Estaciones Disminución	Tendencia Mínima C/marca (Eventos/año)
DEF	-0,03	-0,05	0,05	6	0,07	-0,08	17	-0,2
MAM	0,05	0,04	0,09	14	0,2	-0,1	4	-0,1
JJA	0,02	0,02	0,1	28	0,2	-0,2	11	-0,3
SON	0,03	0,03	0,1	26	0,2	-0,1	12	-0,2
Anual	0,05	0,04	0,2	31	0,4	-0,3	12	-0,7

(d) Índice pni90S

CONCLUSIONES

1. La magnitud de la variable temperatura máxima diaria en Cundinamarca esta aumentando, con una tasa de cambio promedio alrededor de $0,05^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ó $0,5^{\circ}\text{C}$ por decada.

2. La magnitud del percentil 90 de la variable temperatura máxima diaria esta aumentando en Cundinamarca, con una tasa de cambio en el orden de $0,05^{\circ}\text{C}/\text{año}$, lo que significa que cada vez las temperaturas máximas diarias son cada vez más extremas. Por su parte la frecuencia con que ocurren estos eventos también aumenta, a una tasa de 1 % por año, es decir que los días en que se sobrepasa el percentil 90 tienen un incremento de 10 % por decada.

3. La frecuencia de eventos en donde la variable temperatura máxima aumenta, representado como ondas de calor, presenta tendencia al aumento con una tasa de cambio alrededor de 0,1 días/año, es decir 1 día más de ondas de calor por decada.

4. La magnitud de la variable temperatura mínima tiende a aumentar hacia el centro y a disminuir hacia el nororiente de Cundinamarca, con tasas de cambio de $0,05^{\circ}\text{C}/\text{año}$ y $-0,06^{\circ}\text{C}/\text{año}$, respectivamente.

5. La magnitud del percentil 10 de la variable temperatura mínima diaria esta aumentando hacia el centro de Cundinamarca y disminuyendo hacia el nororiente con tasas en el orden de $0,05^{\circ}\text{C}/\text{año}$ y $-0,07^{\circ}\text{C}/\text{año}$, respectivamente. Por su parte, se aprecia una disminución en los días (es decir en la frecuencia), en donde el percentil 10 aumenta, es decir hacia la zona central de Cundinamarca, con una tasa del orden de -0,7 %, lo que puede implicar (de continuar la tendencia de la misma forma) que en 50 años tengamos 0,4 días menos por debajo del percentil 10; mientras que en las zonas en donde el percentil 10 disminuye, es decir hacia el nororiente de Cundinamarca, la cantidad de días que sobrepasan el percentil 10, aumentan con una tasa del orden de 0,5 %, lo que puede implicar (de continuar la tendencia de la misma forma) que en 50 años tengamos 0,3 días más por debajo del percentil 10.

6. El rango de las temperaturas extremas diarias tiende a aumentar hacia el nororiente de Cundinamarca (mayor temperatura máxima diaria y menor temperatura mínima diaria), es decir que hacia esta zona existen cada vez mayores extremos en las temperaturas diarias.

7. La precipitación promedio tiende a disminuir hacia la zona oriental de Cundinamarca para los periodos trimestrales DEF, JJA, SON y Anual, con una tasa en el orden de $-0,05\text{ mm}/\text{año}$, lo que significa que de continuar esta tendencia, se esperan disminuciones promedio en la precipitación diaria del orden de 0,5mm por decada. Por su parte hacia la zona central de Cundinamarca se aprecian tendencias al aumento para los

periodos trimestrales MAM, JJA y SON, con una tasa en el orden de 0,03mm/año en promedio, lo que significa que de continuar esta tendencia se esperan 0,3mm de incremento por decada.

8. La precipitación promedio para los días húmedos (precipitación > 1mm) tiende a disminuir en la región central y oriental de Cundinamarca para todos los periodos trimestrales con una tasa de cambio de -0,08 mm/año, lo que puede implicar disminuciones en el orden de -0,8 mm por decada. Por su parte en región central y occidental de Cundinamarca se aprecian aumentos en el promedio de precipitación para los días húmedos para los periodos trimestrales MAM, JJA y SON, con una tasa en el orden de 0,08 mm/año, lo que puede implicar aumentos del orden de 1mm más por decada en comparación al promedio actual.

9. Las precipitaciones extremas, determinadas por el percentil 90 para días húmedos, se encuentran en disminución hacia el oriente de Cundinamarca, con una tasa en el orden de -0,2 mm/año para los periodos trimestrales DEF y JJA (periodos típicos de lluvias bajas), lo que implica que de continuar esta tendencia se tendrán 2mm menos por decada en comparación al percentil 90 actual. Esto también queda evidenciado con la relación entre sumatoria de precipitaciones extremas (mayor a percentil 90) y el total de precipitación de cada periodo analizado para los días húmedos, el cual presenta un cambio en el orden de -0,4 a -1,0 % por año, lo que puede implicar disminuciones en las precipitaciones extremas en el orden de -4 a -10 % por decada en comparación a lo actual.

10. Las precipitaciones extremas, determinadas por el percentil 90 para días húmedos, se encuentran en aumento hacia el región central de Cundinamarca, con una tasa de cambio en el orden de 0,1 a 0,2 mm/año, lo que puede implicar cambios de continuar esta tendencia, de 1 a 2 mm más por decada.

11. Esto también queda evidenciado con la relación entre sumatoria de precipitaciones extremas (mayor a percentil 90) y el total de precipitación de cada periodo analizado para los días húmedos, el cual presenta un cambio en el orden de 0,6 a 0,9 % por año, lo que puede implicar aumentos promedio en las precipitaciones extremas en el orden de 6 a 9 % por decada en comparación a lo actual. Esto significa que sobre la región central de Cundinamarca se deben esperar más lluvias extremas.

12. El máximo de precipitación en 5 días consecutivos presenta una tendencia a la disminución hacia el oriente de Cundinamarca en especial para los periodos trimestrales DEF y JJA, con una tasa de cambio del orden de -1,0mm/año. Por su parte en la región central de Cundinamarca, la tendencia es al aumento en el volumen de precipitación que cae en 5 días seguidos, en una tasa del orden de 0,6 a 0,9 mm/año, lo que puede implicar aumentos promedios de 6 a 9 mm más por decada, siempre y cuando se continúe con esta tendencia. Esto significa que sobre esta región central de Cundinamarca se esperan lluvias más extremas.

13. El máximo de días secos consecutivos tiende a disminuir en el orden de 0,1 a 0,4 días/año y el máximo de días húmedos consecutivos tienden a aumentar en el orden de 0,1 a 0,2 días/año al interior de Cundinamarca. Esta información es complementaria, es decir en donde disminuyen los días secos consecutivos, aumentan los días húmedos consecutivos.

El periodo trimestral DEF tiende a la disminución de días húmedos consecutivos (mayor cantidad de días secos consecutivos); mientras que los otros periodos trimestrales (MAM, JJA y SON) tienden a aumentar los días húmedos consecutivos (menor cantidad de días secos consecutivos).

14. Los días en donde la precipitación es mayor a 10mm, se encuentran en disminución hacia la zona oriental de Cundinamarca para los periodos trimestrales DEF, JJA y SON con una tasa del orden de -0,1 a -0,4

días/año; mientras que para la zona central de Cundinamarca se aprecian aumentos del orden de 0,1 a 0,2 días/año, lo que puede implicar una tasa de 1 a 2 días más por década de precipitaciones por encima de 10mm en comparación a los días actuales.

15. Los eventos de precipitaciones extremas tienden a disminuir hacia el oriente de Cundinamarca con tasas del orden de -0,1 a -0,2 eventos por año. Por su parte, los aumentos se presentan hacia el centro de Cundinamarca con tasas del orden de 0,05 a 0,1 eventos por año, para todos los periodos trimestrales analizados.

BIBLIOGRAFÍA

[Grajales F., 2013] Grajales F., 2013. Análisis de índices de Extremos Climáticos mediante RCLimdex y Stardex. Proyecto PRICC, región Capital Bogotá-Cundinamarca. Enero de 2013.

[CRU,2005] Goodess C.M., Anagnostopoulou C., Bárdossy A., Frei C., Harpham C., Haylock M.R., Hurrell J., Maheras P., Ribalaygua J., Schmidli J., Schmith T., Tolika K., Tomozeiu R. and Wilby R.L. An intercomparison of statistical downscaling methods for Europe and European regions – assessing their performance with respect to extreme temperature and precipitation events. Climatic Research Unit School of Environmental Sciences University of East Anglia. Chapter 2.3. 2012.

[Stardex,2013] <http://www.uea.ac.uk/projects/stardex>

[Stardex,2005] Clare Goodess. STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions. STARDEX. Chapter 6.3. Climatic Research Unit, University of East Anglia. 2005.

[Stardex,2004] Malcolm Haylock. Stardex Core indices. 2004.

[Goodess, 2005] Goodess Clare,2005. Diagnostic_tool.pdf. Extraído de: <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/> en Octubre 2012.

[Rodríguez, 2010] Rodríguez Roa A. (2010), Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para la generación de escenarios de cambio climático con el clima presente en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, Subdirección de meteorología, Bogotá, D. C.

[IPCC, 2011] IPCC, (2011). Definition of Terms Used Within the Data Distribution Centre -DDC- Pages. Tomado en Noviembre 2012: http://www.ipcc-data.org/ddc_definitions.html.

[STARDEX, 2005] STARDEX, downscaling climate extremes. Final Report. Can these changes in extremes be related to changes in circulation and other aspects of the atmosphere?. Climatic Research Unit School of Environmental Sciences University of East Anglia. United Kingdom.

