



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **ANÁLISIS DE POSIBLES CAMBIOS A TRAVÉS DEL TIEMPO EN LA OCURRENCIA, INTENSIDAD Y MAGNITUD DE LA PRECIPITACIÓN PARA TORMENTAS EXTREMAS SOBRE LA CIUDAD DE BOGOTÁ**

**Jonathan Mauricio Losada Moncada**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia  
2015

# **ANÁLISIS DE POSIBLES CAMBIOS A TRAVÉS DEL TIEMPO EN LA OCURRENCIA, INTENSIDAD Y MAGNITUD DE LA PRECIPITACIÓN PARA TORMENTAS EXTREMAS SOBRE LA CIUDAD DE BOGOTÁ**

**Jonathan Mauricio Losada Moncada**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA - RECURSOS HIDRÁULICOS  
Perfil de Profundización

Director:

**Ing. Civil. MSc. PhD. Erasmo Alfredo Rodríguez Sandoval**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia  
2015

*(Dedicatoria o lema)*

*A mi Madre, quien siempre ha antepuesto la felicidad de sus hijos a la de ella, y ha trabajado muy duro para ayudarme a cumplir mis sueños.*

*A Natalia Ramírez y Tatiana Ferreira, quienes siempre me impulsaron a trabajar para sacar adelante este trabajo.*

*A Dios que siempre me ha tendido la mano para guiarme y ayudarme a seguir mis sueños.*

*“La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico.”*

*Albert Einstein*



## **Agradecimientos**

*A mi Director de proyecto de grado, Ing. Erasmo Rodríguez Sandoval, quien me apoyó y orientó en la selección del mejor tema de grado acorde con mis intereses, por su confianza y valiosas orientaciones e incondicional apoyo para el logro de los objetivos propuestos.*

*Al Ingeniero Pedro Avellaneda, por su oportuna colaboración y orientación en el desarrollo de este trabajo.*

*Al Ing. Carlos Cubillos, por su diligencia y colaboración en la gestión para la solicitud de la información en el IDEAM.*

*Al Ing. Germán Monsalve Sáenz, por su comprensión y apoyo durante toda la maestría y colaboración con la elaboración del trabajo de grado.*

*A los directivos de la Empresa Contelac Ltda. (Ing. Jaime Quintero e Ing. Germán Torres), en la cual trabajo, por su apoyo y tiempo brindado para poder adelantar mis estudios de maestría, a la par con mis actividades profesionales.*

*Al Ing. Jorge Luis Sánchez, por su eficiente colaboración.*

*A Mi hermano, Carlos Felipe Losada Moncada, por su amable colaboración y paciencia para ayudarme a corregir la redacción del documento.*

*Al Ing. Gustavo Herrán Sandoval, subdirección de hidrología de la EAAB, por su colaboración con el proyecto por medio del suministro de la información meteorológica.*

*Al Ing. Edwin Giovanni García Másmela, subdirector de administración de los recursos naturales y áreas protegidas de la CAR, por su colaboración con el proyecto por medio del suministro de la información meteorológica.*

*Al Señor Nelson Castro, Coordinador en el IDEAM del Convenio 085/2004, por su colaboración con el proyecto por medio del suministro de la información meteorológica.*

*A la Señora Amparo Murcia Suárez, Grupo de Archivo Técnico – IDEAM, por su eficiencia y celeridad en la entrega de la información meteorológica.*

*Al Doctor Yang Feng de la División de Investigación del Clima y el Medio Ambiente de Canadá (Climate Research Division, Environment Canada), por su colaboración y celeridad en sus respuestas acerca del Manejo y Funcionamiento del Programa RClimDex.*

*A la Ing. Nadir Johana García, por su entusiasmo, asesoría y colaboración.*

## Resumen

Se analizaron varios índices de precipitaciones extremas basados en los datos de precipitaciones observadas en 21 estaciones meteorológicas operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP) sobre la ciudad de Bogotá, entre los años de 1982 y 2013. Se trabajaron 13 índices de precipitación extrema propuestos por la Junta CCI/CLIVAR/CMOMM ETCCDI. En el análisis se evaluaron las tendencias de estos índices a lo largo del periodo de estudio por 4 métodos (2 paramétricos y 2 no paramétricos). Adicionalmente, se examinaron las frecuencias de las precipitaciones para el periodo de análisis, empleando varias distribuciones probabilísticas, de las cuales las que mejor se ajustaron fueron la distribución Gumbel y la Log-Pearson. El resultado más importante del análisis del estudio es que se evidencia una clara tendencia en el crecimiento de las tormentas extremas sobre la ciudad de Bogotá, con una mayor relevancia en las precipitaciones que se encuentran en el rango de 20 a 30 mm/día.

**Palabras clave:** Precipitación, Tendencias, Series de Tiempo, Tormentas Extremos.

## Abstract

The project here reported has analyzed extreme precipitation values based on rainfall data observed in 21 meteorological stations operated by the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), the Regional Autonomous Corporation of Cundinamarca (CAR) and the Bogota Water Utility Company (EAAB-ESP) during the period 1982 to 2013. This study has focused on the analysis of 13 extreme precipitation indices proposed by the meeting CCI / CLIVAR / CMOMM ETCCDI. Also trends on these indices were assessed during this period through the implementation of 4 methods (2

parametric and 2 non-parametric). Furthermore, precipitation frequencies were examined during the selected analysis period using several probability distributions, from which the ones with the best performance were the Gumbel and the Log- Pearson distributions. The more important result, there is an evident increase in the extreme precipitations tendency over the Bogotá city, with larger relevance on the events in the range of 20 to 30 mm / day.

**Keywords:** Precipitation, Trends, Time Series, Extreme Rainfall.



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>VII</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Estado del Arte .....</b>	<b>6</b>
2.1. Estudios a Nivel Mundial .....	6
2.2. Estudios Locales .....	10
2.3. Análisis de Series de Tiempo.....	12
2.4. Análisis de Frecuencias .....	15
<b>3. Metodología.....</b>	<b>17</b>
3.1. Área de Estudio .....	17
3.2. Conjunto de Datos Empleados .....	21
3.3. Análisis de Consistencia y Homogeneidad de la Información Recolectada ....	24
3.3.1. Identificación del Periodo Concurrente .....	24
3.3.2. Identificación de Estaciones Homogéneas.....	26
3.3.3. Identificación de Datos Anómalos.....	31
3.4. Caracterización y Clasificación de los Eventos de Precipitación .....	31
3.5. Análisis de Tendencias de Series de Tiempo de Índices de Precipitaciones ..	35
3.6. Análisis de Frecuencias de las Series Anuales de Precipitación .....	36
<b>4. Resultados y Análisis .....</b>	<b>38</b>
4.1. Resultados Análisis de Consistencia y Homogeneidad de la Información Recolectada.....	38
4.1.1. Resultados Análisis de Homogeneidad .....	38
4.1.2. Resultados Análisis de Datos Anómalos .....	40
4.2. Resultados Caracterización y Clasificación de los Eventos de Precipitación ..	44
4.2.1 Definición de los Umbrales de Estudio .....	45
4.2.2 Análisis de los índices de Precipitaciones .....	49
4.2.3 Análisis Decadal de las Precipitaciones .....	113
4.2.4 Análisis de tendencias de los índices por el Método de Mann Kendall	119
4.2.5 Análisis de tendencias de los índices por el Método de ARMA .....	120
4.2.6 Análisis de tendencia de los índices por el Método Spearman.....	120
4.3. Análisis de Frecuencia de la Precipitación en Bogotá.....	121
<b>5. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>129</b>

X      Análisis de Posibles Cambios a Través del Tiempo en la Ocurrencia, Intensidad  
y Magnitud de la Precipitación para Tormentas Extremas sobre la Ciudad de  
Bogotá

---

A.	Anexo: Información Original .....	135
B.	Anexo: Análisis de Dobles Masas .....	136
C.	Anexo: Datos Anómalos .....	137
D.	Anexo: Series Históricas sin Anómalos .....	138
E.	Anexo: Histogramas y Gráficas QQ .....	139
F.	Anexo: Resultados de los Índices en Tablas .....	140
G.	Anexo: Resultados de los Índices En Gráficas .....	141
H.	Anexo: Resultados Man Kendall .....	142
I.	Anexo: Resultados Método ARMA .....	143
J.	Anexo: Resultados Método Spearman .....	144
K.	Anexo: Resultados Análisis de Frecuencias .....	145
6.	Bibliografía .....	146

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura No. 3-1. Mapa de Isoyetas de Precipitación Total Anual Media Multianual de la Ciudad de Bogotá, (IDEAM, 2009) .....	20
Figura No. 3-2. Localización General de la Estaciones seleccionadas Operadas por la CAR, la EAAB-ESP e IDEAM. Sistema de Coordenadas Proyectadas, Planas Cartesianas (MAGNA-SIRGAS-Colombia-Bogotá). .....	23
Figura No. 3-3. Períodos de Registro de Precipitación en las Estaciones Climáticas Seleccionadas en el Presente Estudio .....	25
Figura No. 3-4. Histogramas de Precipitación Media Mensual a Nivel Multianual de las estaciones de Precipitación seleccionadas.....	28
Figura No. 3-5. Agrupación de Estaciones para Análisis de Homogeneidad de los Registros Pluviométricos. ....	30
Figura No. 3-6. Agua Precipitable en una Columna de Aire, para cualquier Altura en Función del Punto de Rocío. ....	33
Figura No. 4-1. Ejemplo de Análisis de Dobles Masas. Estación Cerro de Suba y Estación Salitre. ....	40
Figura No. 4-2. Ejemplo resultados del Análisis de Box-Plot, para las estaciones Aeropuerto El Dorado, Aeropuerto Guaymaral, Ay. San Francisco y Camavieja. ....	41
Figura No. 4-3. Ejemplo Serie Histórica de Precipitación en la Estación Aeropuerto El Dorado. En rojo se presentan los datos faltantes dentro de la serie que corresponden al 5% de los datos para el período 1980-2012. (prcp=precipitación) .....	44
Figura No. 4-4. Izquierda: Histograma de Densidades. Derecha: Gráfico Q-Q. Ejemplo Estación Aeropuerto El Dorado para precipitaciones mayores a 1 mm .....	45
Figura No. 4-5. Función Empírica de Excesos Medios.....	46
Figura No. 4-6. Agua Precipitable en la Ciudad de Bogotá.....	47
Figura No. 4-7. Ejemplo de los resultados para el índice PATDH.....	51
Figura No. 4-8. Distribución Espacial Promedio del Índice PATDH. ....	53
Figura No. 4-9. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice PATDH.....	54
Figura No. 4-10. Variación Coeficiente de Variación para el Índice PATDH. ....	55
Figura No. 4-11. Ejemplo de los resultados para el índice DS.....	57
Figura No. 4-12. Distribución Espacial Promedio del Índice DS. ....	58
Figura No. 4-13. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice DS .....	59
Figura No. 4-14. Variación Coeficiente de Variación para el Índice DS.....	60
Figura No. 4-15. Ejemplo de los resultados para el índice DHC.....	62
Figura No. 4-16. Distribución Espacial Promedio del Índice DHC.....	63
Figura No. 4-17. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice DHC. ....	64

Figura No. 4-18. Variación Coeficiente de Variación para el Índice DHC.....	65
Figura No. 4-19. Ejemplo de los resultados para el índice MMPD.....	67
Figura No. 4-20. Distribución Espacial Promedio del Índice MMPD. ....	68
Figura No. 4-21. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice MMPD.....	69
Figura No. 4-22. Variación Coeficiente de Variación para el Índice MMPD.....	70
Figura No. 4-23. Ejemplo de los resultados para el índice MMP5D.....	72
Figura No. 4-24. Distribución Espacial Promedio del Índice MMP5D. ....	73
Figura No. 4-25. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice MMP5D.....	74
Figura No. 4-26. Variación Coeficiente de Variación para el Índice MMP5D.....	75
Figura No. 4-27. Ejemplo de los resultados para el índice DMH.....	77
Figura No. 4-28. Distribución Espacial Promedio del Índice DMH. ....	78
Figura No. 4-29. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice DMH.....	79
Figura No. 4-30. Coeficiente de Variación para el Índice DMH.....	80
Figura No. 4-31. Ejemplo de los resultados para el índice DEH. ....	82
Figura No. 4-32. Distribución Espacial Promedio del Índice DEH.....	83
Figura No. 4-33. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice DEH. ....	84
Figura No. 4-34. Coeficiente de Variación para el Índice DEH. ....	85
Figura No. 4-35. Ejemplo de los resultados para el índice NPSI. ....	87
Figura No. 4-36. Distribución Espacial Promedio del Índice NSPI.....	88
Figura No. 4-37. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice NSPI.....	89
Figura No. 4-38. Coeficiente de Variación para el Índice NSPI.....	90
Figura No. 4-39. Ejemplo de los resultados para el índice NPSMI. ....	92
Figura No. 4-40. Distribución Espacial Promedio del Índice NSPMI.....	93
Figura No. 4-41. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice NSPMI. ....	94
Figura No. 4-42. Coeficiente de Variación para el Índice NSPMI.....	95
Figura No. 4-43. Ejemplo de los resultados para el índice NPMM (30). ....	97
Figura No. 4-44. Distribución Espacial Promedio del Índice NSMM 30. ....	98
Figura No. 4-45. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice NSMM 30.....	99
Figura No. 4-46. Ejemplo de los resultados para el índice NSMM (40). ....	101
Figura No. 4-47. Distribución Espacial Promedio del Índice NSPMM 40.....	102
Figura No. 4-48. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice NSMM 40.....	103
Figura No. 4-49. Ejemplo de los resultados para el índice NPMM (44.6). ....	105
Figura No. 4-50. Distribución Espacial Promedio del Índice NSMM 44.6. ....	106
Figura No. 4-51. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice NSMM 44.6.....	107
Figura No. 4-52. Ejemplo de los resultados para el índice ISI. ....	109
Figura No. 4-53. Distribución Espacial Promedio del Índice ISI.....	111
Figura No. 4-54. Coeficiente de Variación para el Índice ISI.....	112
Figura No. 4-55. Análisis decadal de la Función de Densidad de Probabilidad para el índice DMH. ....	115
Figura No. 4-56. Análisis decadal de la Función de Densidad de Probabilidad para el índice DEH.....	116

---

Figura No. 4-57. Funciones de Densidad Para los índices NPSI y NPSMI, e Histogramas de Frecuencia para Índices NSMM (30), NSMM (40) y NSMM (44.6). .....	117
Figura No. 4-58. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (1982-1991).....	122
Figura No. 4-59. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (1991-2001).....	123
Figura No. 4-60. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (2001-2011).....	124
Figura No. 4-61. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (1982-2011).....	125

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla No. 3-1. Características de las Estaciones Meteorológicas seleccionadas en este estudio.....	22
Tabla No. 3-2. Histograma de Precipitación Media Mensual Multianual.....	27
Tabla No. 3-3. Agrupación de Estaciones.....	29
Tabla No. 3-4. Definición y Unidades de los Índices Empleados en el Estudio.....	35
Tabla No. 4-1. Estadísticos Básicos de las Series Diarias de Precipitación en las 21 estaciones seleccionadas.....	45
Tabla No. 4-2. Clasificación de las Tormentas en la Ciudad de Bogotá.....	49
Tabla No. 4-3. Resultados de Ajuste Lineal Análisis de Tendencias.....	50
Tabla No. 4-4. Promedio y Mediana para cada Índice investigado por Década.....	113
Tabla No. 4-5. Resumen de Parámetros Análisis de Tendencias en los índices seleccionados a escala decadal por el Método Mann Kendall.....	119
Tabla No. 4-6. Resumen de R <sup>2</sup> Calculado por el Método ARMA.....	120
Tabla No. 4-7. Resumen de Parámetros por el Método Spearman.....	121
Tabla No. 4-8. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (1982-1991).....	122
Tabla No. 4-9. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (1991-2001).....	123
Tabla No. 4-10. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (2001-2011).....	124
Tabla No. 4-11. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (1982-2011).....	125
Tabla No. 4-12. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Promedio Estaciones, (1982-1991).....	126
Tabla No. 4-13. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Promedio Estaciones, (1991-2001).....	127
Tabla No. 4-14. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Promedio Estaciones, (2001-2011).....	127
Tabla No. 4-15. Mejores Distribuciones Probabilísticas para cada Una de las Estaciones.....	128
Tabla No. 4-16. . Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Promedio Estaciones, (1982-2011).....	128

# 1. Introducción

Los procesos sociales, económicos y culturales, propios de las actividades de las comunidades que se desarrollan en un determinado territorio, están estrechamente ligados a los patrones temporales y espaciales del medio ambiente. Los recursos hídricos son requeridos para diferentes propósitos y están altamente relacionados con el clima. En diferentes lapsos de tiempo, los patrones establecidos para una determinada región se modifican, presentándose por ejemplo, en cuanto a precipitación, épocas más húmedas o más secas de lo normal, y más cálidas o frías en cuanto a temperatura.

La ocurrencia de anomalías, alrededor de las condiciones normales de las variables climáticas, conocida como variabilidad climática, afecta las actividades de las sociedades que se asientan en las diferentes regiones. Sumado a este efecto de variabilidad climática está el efecto del cambio climático, causado por el aumento de los gases de efecto invernadero, que ocasiona incrementos en la temperatura superficial y de la atmósfera baja y variaciones en la precipitación y temperatura, con características muy locales.

En Colombia, el desarrollo socioeconómico está enmarcado en los diversos pisos térmicos y en el régimen hidrológico de una forma muy clara; tanto así, que en los climas cálidos se tiende a la producción de carne, mientras que en los climas fríos a la producción de leche y en ambos casos a la programación de las actividades socioculturales de acuerdo con el régimen de precipitación de cada zona.

“Ahora bien, en la Sabana de Bogotá, el clima define en diversas formas y grados la producción agropecuaria, la disponibilidad del recurso hídrico, los patrones de distribución de contaminantes sobre la ciudad, el patrón de fenómenos extremos (lluvias intensas, granizadas, vendavales, heladas)” (Pabón, 2010).

Enmarcados en el contexto de variabilidad climática y cambio climático, resulta muy importante entender las variaciones de los patrones de fenómenos extremos, como las lluvias intensas, las cuales son parcialmente responsables de la falla del sistema pluvial de una ciudad como Bogotá y que generan problemas de inundación, colapso del tráfico y pérdidas de infraestructura.

Conocer el comportamiento y las variaciones que han tenido las magnitudes e intensidades de los eventos extremos de precipitación sobre Bogotá, a lo largo de los últimos 30 años, ayudaría a entender y comprender por qué el sistema pluvial de la ciudad falla en algunas circunstancias y de esta manera mejorar los diseños que se realicen a futuro. Lo anterior, teniendo en cuenta los periodos de retorno de diseño de las estructuras de drenaje de la ciudad; Así, los resultados obtenidos en el presente estudio contribuirán a considerar nuevos umbrales de riesgo, que sean más aceptables por la sociedad y podrán aportar a la modificación de las normas técnicas vigentes (RAS, 2012).

El entendimiento del cambio de estos eventos extremos, que están relacionados principalmente con la ocurrencia de inundaciones, y estos a su vez con la pérdida de vidas humanas y bienes materiales, contribuirá al diseño, la implementación y/o mejoramiento de las medidas de mitigación aplicadas para este tipo de riesgos.

En particular, las condiciones climáticas extremas deben recibir mucha atención, porque las tendencias de los eventos extremos son más sensibles al cambio climático y por lo tanto tienen un impacto más intenso en los sistemas naturales y humanos (Aguilar et al., 2009; Easterling et al., 1997; Katz & Brown, 1992; New et al., 2006).

Ahora bien, en el presente estudio se pretenden identificar y estudiar los eventos de precipitaciones intensas en la ciudad de Bogotá.

El estudio aquí reportado se realizó en el casco urbano de la ciudad de Bogotá, la cual se encuentra ubicada en la región andina en el altiplano cundiboyacense sobre la cordillera oriental, a una altura promedio de 2630 msnm. La ciudad tiene una longitud de 33 km de



sur a norte y 16 km de oriente a occidente y un área total de 1776 km<sup>2</sup>, de los cuales 307 km<sup>2</sup> corresponden al área urbana.

El sistema de drenaje de la ciudad está ligado a su principal río, el río Bogotá, el cual drena de norte a sur, naciendo en el páramo de Guacheneque, hasta entregar sus aguas al río Magdalena en el municipio de Girardot.

La ciudad de Bogotá presenta un clima frío debido a su altura y por su baja latitud presenta una baja oscilación de la temperatura del aire a lo largo del año. Por otra parte, la precipitación total anual presenta un comportamiento bimodal, con épocas de invierno en los periodos de abril a mayo y de octubre a noviembre y con precipitaciones por debajo de la media los demás meses del año (IDEAM, 2009). El comportamiento espacial de las precipitaciones se caracteriza por tener las menores precipitaciones en el occidente y aumentos a medida que se acercan a los cerros orientales. Por otro lado, desde el sur occidente hacia el nororiente las precipitaciones aumentan, hasta obtener su máximo en el sector conocido como Torca.

El estudio se ha realizado a partir de la información de las estaciones pluviográficas, pluviométricas, climatológicas y agrometeorológicas seleccionadas de las bases de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR, y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP.

De toda la información existente en estas entidades, y por razones de disponibilidad y extensión de la información, el estudio se concentró en 5 estaciones de la CAR, 23 estaciones de la EAAB y 7 estaciones del IDEAM, para un total de 35 estaciones. Sin embargo, y después de realizada una primer revisión de la información disponible de estas estaciones, se terminó seleccionando solamente 21 estaciones, las cuales presentan un registro concurrente igual a 30 años y una buena consistencia de datos a nivel mensual, anual y multianual.

En el análisis de consistencia, se realizó un examen de datos anómalos (Outliers), empleando métodos de diagramas de cajas y patillas (Box-Plot) y por medio del control de calidad y homogeneidad del software RClmDex. Adicionalmente, se realizó un

análisis de homogeneidad de los datos, a través del empleo de la curva de doble masa (Anderson, 1955; Chang & Lee, 1974).

Posteriormente, se realizó una caracterización y clasificación de los eventos de tormentas intensas, para poder determinar umbrales de estudio, a fin de filtrar todos los eventos de lluvia (Groisman, Knight, & Karl, 2011).

En el estudio se seleccionaron los índices de precipitaciones extremas de acuerdo con lo recomendado por CCI-CLIVARJCOMM ETCCDI (<http://etccdi.pacificclimate.org>). Los índices seleccionados fueron calculados usando el software RClimDex. Estos índices son ampliamente usados para evaluar los cambios en la precipitación extrema diaria (Klein Tank et al., 2006; Song et al., 2015; Wang, Zhang, Wang, Sun, & Li, 2013; Zhao, Zou, Cao, & Xu, 2014).

Una vez definidos estos umbrales, se procedió a seleccionar solo los días con eventos de precipitación intensa. Se ordenaron y agruparon de acuerdo con los rangos establecidos, se determinaron los valores extremos de precipitación, la precipitación máxima de 1 día, precipitación máxima de 5 días, precipitación del día más húmedo, las precipitaciones en días húmedos, el índice de intensidad diaria simple, y los días secos consecutivos, días húmedos consecutivos, número de días con precipitaciones intensas, y número de días con precipitaciones muy intensas (en total se analizaron 13 índices).

Se realizó un análisis de las tendencias de estos índices con el fin de evidenciar posibles señales de variabilidad y cambio climático en el área de estudio, por medio de pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas de identificación y estimación de tendencias, detección de correlación serial, así como de detección de cambios y diferencias en la media.

Por último, se analizó la frecuencia de los eventos intensos con el objetivo de poder relacionar la frecuencia de ocurrencia con la magnitud de los eventos, ajustando para ello

distribuciones de probabilidad Normal, Gumbel, Pearson Tipo III, Log – Pearson Tipo III, Log – Normal y EV3.

En cuanto a la organización de este documento, en el capítulo dos (2) se presenta el estado del arte, donde se describen los principales estudios tenidos en cuenta para la elaboración del presente documento. En el capítulo tres (3) se discute la metodología empleada para el desarrollo del estudio; los resultados y análisis de estos, se presentan en el capítulo cuatro (4); en este capítulo cuatro (4) se realiza la discusión de los resultados y la evaluación de los mismos. Finalmente, en el capítulo cinco (5), se presentan las principales conclusiones, limitaciones y recomendaciones del estudio realizado.

## **2. Estado del Arte**

A continuación se presenta el estado del arte de investigaciones realizadas sobre las precipitaciones extremas, su magnitud, su frecuencia, su intensidad y su variación espacial. Asimismo, se presentan algunos estudios relacionados con variabilidad climática y cambio climático. Es importante reiterar que el objetivo principal del presente estudio es el análisis de las posibles variaciones de las precipitaciones extremas en la ciudad de Bogotá. Por esta razón, en este capítulo se presenta una contextualización de los estudios que se vienen realizando en el tema, a nivel internacional y en Colombia, el análisis de tendencias de series y el análisis de frecuencia de series hidrológicas.

### **2.1. Estudios a Nivel Mundial**

Enmarcados en el contexto de variabilidad climática y cambio climático, resulta muy importante entender las variaciones de los patrones de fenómenos extremos, como las lluvias intensas, las cuales son parcialmente responsables de la falla del sistema pluvial de una ciudad como Bogotá y que generan problemas de inundación, colapso del tráfico y pérdidas de infraestructura.

Desde mediados de los años 70s, se han venido desarrollando estudios para evaluar los diferentes escenarios del cambio climático a nivel global, regional y local (Pabón, 2010; Poveda, 2004; Rodríguez, Pabón, Martínez, & Bernal, 2010) (Universidad Nacional, 2010); sin embargo, el estudio de las variaciones en los patrones de las lluvias intensas ha sido relativamente limitado, aunque es importante tener en cuenta que casi siempre se ha afirmado que la ocurrencia de eventos extremos, como las tormentas extremas, será más frecuente y más intensa, y estará asociada al efecto del cambio climático (Estrada Porrúa, 2001).

En 2005, un grupo de investigadores, liderado por Groisman (Groisman et al., 2005), realizaron el estudio “Trends in Intense Precipitation in the Climate Record”, en donde observaron cambios en las precipitaciones intensas en más de la mitad de la superficie del planeta, y los relacionaron con tres simulaciones de modelos climáticos, encontrando que una atmósfera con muchos gases de efecto invernadero favorece la ocurrencia de precipitaciones intensas para muchas regiones tropicales.

En Asia se han realizado estudios con el objetivo de identificar las tendencias de la precipitación. Un ejemplo de ello fue el trabajo adelantado por Nobuhiko Endo, Jun Matsumoto y Tun Lwin (Endo, Matsumoto, & Lwin, 2009), en el cual analizaron la precipitación diaria del sur este asiático entre los años 1950 y 2000, encontrando que existía una tendencia a incrementarse las precipitaciones intensas en Vietnam, Myanmar, Visayas y en Filipinas.

Thomas R. Karl and Richard W. Knight, (Karl & Knight, 2010) realizaron un estudio de la tendencia en el siglo XX de la precipitación en los Estados Unidos, encontrando un aumento del 10% en el número de los eventos de precipitaciones diarias intensas. Estos cambios se presentaron debido a varias razones: la primera de ellas es el aumento de días con precipitación para la categoría seleccionada, o podría haber aumentado sin ningún aumento en la frecuencia de la precipitación, pero sí un incremento en la intensidad de las precipitaciones.

El estudio realizado por (Groisman et al., 2011). “Changes in Intense Precipitation over the Central United States”, se concentra en el análisis de los eventos intensos, definidos como eventos con precipitaciones diarias mayores a 12.7 mm/día, definiendo cuatro umbrales de lluvias a considerar: lluvias moderadamente intensas con precipitaciones entre 12.7 mm/día y 25.4 mm/día, lluvias intensas con precipitaciones entre 25.4 mm/día y 76.2 mm/día, lluvias muy intensas entre 76.2 y 154.9 mm/día y lluvias extremas con precipitaciones mayores a 154.9 mm/día. Como resultado de este estudio se encontró que en los últimos 25 años y sobre la parte Central de los Estados Unidos ha habido un incremento del 40% en la ocurrencia de los eventos de lluvias extremas.

Por otro lado, se puede citar el estudio realizado en España por los investigadores (Beguería et al., 2011). “Assessing trends in extreme precipitation events intensity and

magnitude using non-stationary peaks-over-threshold analysis: a case study in northeast Spain from 1930 to 2006”, en donde se encontró una disminución significativa en la intensidad de la precipitación extrema en invierno, mientras que en primavera se encontró un aumento.

En Sudáfrica, los investigadores Shouraseni Sen Roy, Mathieu Rouault, (Sen Roy & Rouault, 2013) desarrollaron un estudio de la precipitación horaria en 102 estaciones desde 1998 al 2007, con el fin de analizar las tendencias de las precipitaciones extremas por hora a escala temporal y espacial. Los resultados de este análisis mostraron una tendencia de aumento de estos eventos en el verano.

En 2013, Wenli Liu, Mingjun Zhang, Shengjie Wang, Baolong Wang, Fei Li, Yanjun Che (W. Liu et al., 2013) adelantaron estudios sobre los cambios en las precipitaciones extremas en la provincia de Shaanxi, en el noroccidente de China, durante el periodo de registro de 1960 a 2011 en 19 estaciones. En este proyecto se estudiaron 10 índices de precipitaciones extremas. La precipitación máxima de 1 día, precipitación máxima de 5 días, precipitación del día muy húmedo, las precipitaciones en días húmedos, índice de intensidad diaria simple, los días secos consecutivos, días húmedos consecutivos, número de días con precipitaciones intensas (Precipitación diaria >10 mm), y número de días con precipitaciones muy intensas (Precipitación diaria >20 mm). El estudio encontró tendencias decrecientes de la precipitación máxima de 5 días, días húmedos, número de días con precipitaciones intensas y días húmedos consecutivos. Adicionalmente, se encontró que existían ciclos de crecimiento y decrecimiento en los días húmedos, para el periodo de registro.

A principios del 2014, en el Journal of Hydrology se publicó el estudio realizado por (B. Liu et al. 2013), en el cual se buscaba analizar la incertidumbre a la hora de determinar los umbrales de la precipitaciones extremas. En este estudio se analizaron tres metodologías ampliamente empleadas, la primera es el análisis no paramétrico, la segunda es el análisis paramétrico y la tercera es el método de análisis de las fluctuaciones sin tendencia, DFA (por sus ciclas en inglés Detrended Fluctuation Analysis). En el estudio se encontró que el método DFA presenta una coherencia entre la

distribución espacial y la precipitación media anual, el coeficiente de variancia y el coeficiente de asimetría, de acuerdo con el caso de estudio en la cuenca Río de las Perlas.

Adicionalmente a nivel internacional el reciente trabajo realizado por Nancy Pérez en México, (Pérez Morga et al., 2013), sobre eventos extremos de humedad y de sequía y precipitaciones diarias mayores al percentil P95 sobre la región de Oaxaca en México, en el cual se analizaron datos de 47 estaciones con un periodo de registro de 30 años, entre 1961 y 1990, sin encontrar una tendencia clara. Sin embargo, se pudo obtener que el número de años con valores de precipitación anual por encima del promedio anual aumentó durante la fase fría de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO).

En Argentina se han realizado principalmente dos estudios relacionados con las precipitaciones extremas. El primero de ellos se realizó en el año 2012, (Scian & Pierini, 2013) en el que se estudió la variabilidad de la precipitación en los valores medios y extremos, para diferentes regiones en Argentina. En este estudio se buscaba analizar la distribución de la lluvia, la tendencia estacional, los cambios en la variancia y los valores extremos, definidos estos últimos para niveles mayores a los percentiles 0.80, 0.90 y 0.95; encontrando que las lluvias extremas en verano se incrementaron para todas las regiones. El segundo estudio, realizado en el año 2014 en el norte de Argentina, en la hoya del río de la Plata, (Lovino, García, & Baethgen, 2014) donde se buscaba analizar el comportamiento espacio-temporal de los eventos de precipitación extrema a través del análisis de componentes principales, encontró cambios en las condiciones húmedas que generaban los eventos extremos, y que estos a su vez generaban una gran vulnerabilidad para la agricultura y en los procesos socioeconómicos de este sector, ya que los eventos extremos eran cada vez más frecuentes.

Es importante tener en cuenta que la ocurrencia de estos cambios, son atribuidos a cambio climático en algunos casos (Tabari, AghaKouchak, & Willems, 2014; Zhao et al., 2014, pp. 1960–2012) y a variabilidad climática en otros (Fernández-Montes et al., 2014).

## 2.2. Estudios Locales

Para el caso de Colombia y más a nivel de caracterización, la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, con el apoyo del Centro Nacional de Investigaciones del Café, CENICAFE, realizó el estudio “Caracterización del Ciclo Diurno de la Precipitación en los Andes Tropicales de Colombia” (Poveda et al., 2002), en el cual se estudió el ciclo diurno de precipitación en once estaciones de los andes tropicales colombianos, discretizando entre los años normales, años Niño y Niña, así como el efecto de huracanes que ocurren en el Atlántico tropical Norte y Pacífico Oriental y el posible efecto de las fases de la luna. En dicho estudio se encontró que en los andes tropicales la precipitación presenta un comportamiento bimodal debido a los factores de macro-escala como la ZCIT, el ENSO, el Chorro de Chocó, distinguiendo tres tipos de comportamiento diurno de la lluvia, i) unimodalidad o multimodalidad, dependiendo del mes, ii) bimodal y iii) bimodalidad y unimodalidad alternantes dependiendo del mes del año considerado.

En el tema del cambio climático el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, ha contratado varios estudios con la Universidad Nacional de Colombia. Uno de ellos, desarrollado en el 2010, fue la “Elaboración del escenarios de cambio climático para la segunda mitad del siglo XXI en diferentes regiones del territorio colombiano” (Universidad Nacional, 2010) y un informe de evaluación del cambio climático en Colombia incluyendo, entre otros, las tendencias actuales y futuras y los posibles impactos del cambio climático en los sectores socioeconómicos y regiones del país”. En este estudio el país se subdividió en 25 regiones y se analizaron los escenarios A2 y B2 del IPCC para las variables temperatura del aire y precipitación. Los principales resultados de este estudio sugieren que para la segunda mitad del siglo XXI en Colombia la temperatura del aire para las diferentes regiones tendrá aumentos entre 0.1° hasta 4°, mientras que para la región en donde se encuentra la ciudad de Bogotá se anticipa un aumento de la temperatura del aire ente 2 a 4°. Por otro lado, los cambios en las precipitaciones a lo largo del país varían de acuerdo con cada región, encontrando regiones en donde la precipitación total será menor a la actual y regiones en donde su valor será mayor. De acuerdo con los resultados de este estudio, en Bogotá se espera que la precipitación total sea menor a la actual, para los dos escenarios estudiados.



En este mismo sentido, en mayo del 2010, el IDEAM, en cabeza del MSc. José Franklyn Ruiz Murcia, realizó el estudio de “Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (Panorama 2011-2100)”, (Ruiz Murcia, 2010), encontrando que la temperatura promedio del aire en Colombia ha aumentado en promedio en  $0.13^{\circ}\text{C}/\text{década}$ , la precipitación ha presentado aumentos “en algunos sectores de las regiones Caribe y Andina; particularmente hacia Antioquia, Valle y Eje Cafetero, mientras que reducciones hacia Boyacá, Cundinamarca, Tolima y el Huila.”. Finalmente, la humedad relativa ha tenido una tasa de cambio de  $\pm 0.1\%/año$ .

En el tema de caracterización de tormentas para el caso puntual de Bogotá, el autor de este trabajo sólo conoce cinco (5) estudios, el primero de ellos es el realizado por la firma IRH Ltda., en 1995 para la EAAB, de “Análisis y Caracterización de tormentas en la Sabana de Bogotá”, (Ingeniería de Recursos Hídricos, 1995), donde se definieron las curvas de Intensidad – Duración- Frecuencia (IDF), para diferentes puntos de la ciudad, y al mismo tiempo las isolíneas de intensidades. Adicionalmente, se estableció, a partir de las tormentas analizadas, que la duración promedio de las mismas es de 3.1 horas. Posteriormente, en el año 2004, la EAAB realizó una actualización del estudio de IRH a través de la firma colombiana INGETEC S.A, mediante el proyecto denominado: “Estudio y revisión de las curvas IDF y del análisis espacial de las tormentas para la Sabana de Bogotá”, (INGETEC, 2004), incorporando la información pluviométrica disponible hasta diciembre de 2002, para el diagnóstico, dimensionamiento de refuerzos y diseño de la expansión y rehabilitación del sistema de alcantarillado de la ciudad de Bogotá”. En este trabajo se realizó la actualización de la base de datos de tormentas y se determinaron las relaciones (curvas y ecuaciones) I-D-F para las estaciones estudiadas; adicionalmente, analizaron la variación espacial y temporal de las tormentas mediante la variación de la relación I-D-F en el área estudiada y el análisis de precipitaciones máximas para áreas extensas.

Otro estudio es el realizado por el IDEAM, “Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo” (IDEAM, 2009), en el cual se evaluaron varios parámetros climáticos, entre ellos la precipitación total, la precipitación máxima en 24 horas. Sin embargo, en este estudio no se realizó un análisis de los cambios de las

precipitaciones intensas, las cuales son en últimas el objeto principal de estudio de este trabajo.

A nivel académico, otro estudio que merece ser mencionado es el trabajo realizado en la Universidad Nacional de Colombia por Cepeda y Rodríguez, (Cepeda Arias, 2010), en donde se estudió en detalle la ocurrencia y características de las granizadas sobre la ciudad durante los últimos años; es importante mencionar que este trabajo es el que motiva el desarrollo del presente estudio, ya que se encontró una redistribución en la ocurrencia espacial de granizadas con diferentes magnitudes e intensidades.

Otro estudio corresponde a la tesis de maestría del MSc. Víctor Peñaranda, “Estudio de Representación Geométrica de Registros de Precipitación Puntual en Bogotá, con El Modelo Fractal – Multifractal.” (Peñaralda & Obregón, 2012). En este estudio la precipitación se considera como un proceso geofísico de alta complejidad, que exhibe una estructura multifractal. En este trabajo se identificaron patrones multifractales en registros pluviográficos de Bogotá, que sugieren la estimación de atributos estadísticos no lineales concebidos para tal efecto, como son los espectros multifractales.

### **2.3. Análisis de Series de Tiempo**

Las series de tiempo constituyen la secuencia de observaciones medidas en determinados espacios o intervalos de tiempo uniformes, ordenados cronológicamente. En el presente estudio se han analizado las series de tiempo de precipitaciones mediante el empleo de 13 índices, previamente escogidos, y aceptados internacionalmente y que fueron empleados en varios estudios (Boccolari & Malmusi, 2013; de Lima et al., 2013; Song et al., 2015; Wang et al., 2013; You et al., 2010), en todo el mundo.

Para este trabajo se analizaron las series de tiempo por métodos paramétricos y no paramétricos. Algunas de las pruebas de detección de tendencias que se encuentran dentro de la bibliografía son la prueba de regresión para tendencia lineal (paramétrica), pruebas ARMA (paramétrica), prueba de Mann-Kendall (no paramétrica) y prueba de Spearman (no paramétrica).

En el mundo, en los últimos años, se han venido realizando muchos estudios evaluando las tendencias de variables climáticas e hidrometeorológicas, como son la precipitación, la temperatura, entre otras, con el fin de detectar señales del calentamiento del globo y por ende cambios climáticos, que están estrechamente ligados con estas variables (Hanel & Buishand, 2010; Kyselý et al., 2012; Trambly et al., 2012).

Uno de los métodos más empleados para detectar tendencias monotónicas de posibles disminuciones o incrementos en series de tiempo es el método no paramétrico de Mann-Kendall (Mann, H.B., 1945; M.G. Kendall, 1975). Este método es usualmente utilizado de forma complementaria con el método de estimación de pendiente (T-S, Thiel-Sen), desarrollado por (Akritas, Murphy, & Lavalley, 1995).

Mann y Kendall encontraron por primera vez tendencias en series de tiempo proponiendo un método estable, simple, no paramétrico y basado en rangos para la correlación de dos variables, que en este caso son series de tiempo de precipitaciones y de los índices a analizar (C. Muñoz, 2008) y (Dostal, 2006).

La Prueba de Mann-Kendall (Gilbert, R.O., 1987; Mann, H.B., 1945; M.G. Kendall, 1975) tiene como objetivo evaluar estadísticamente si una serie de datos presenta una tendencia creciente o decreciente. Esta prueba tiene como premisa, que los datos son independientes e idénticamente distribuidos; adicionalmente, que las observaciones son representativas de las condiciones reales. Este método tiene como ventaja que no se ve muy afectado por la presencia de puntos anómalos, ya que cuando se evidencia una tendencia lineal y se emplean métodos para calcular la verdadera pendiente, como en el caso del cálculo con el método de mínimos cuadrados o por métodos de regresión lineal, estos análisis sí son considerablemente afectados por los puntos anómalos.

Por otro lado, el modelo de auto regresión y de medias móviles (ARMA) es un método paramétrico que representa de buena manera la tendencia, la aleatoriedad y la estacionalidad de las series, sin embargo, es importante tener en cuenta que los modelos ARMA implican estructuras de comportamiento muy sencillas que no siempre se ajustan a la compleja evolución de las series reales.

En Estados Unidos de América, (Nickerson & Madsen, 2005) realizaron un estudio sobre las precipitaciones en el estado de Florida con el fin de determinar los cambios que se presentan en las concentraciones de varias sustancias químicas en la lluvia; para ello utilizaron el modelo de tendencia lineal Box-Jenkins (ARIMA) y lo compararon con el modelo de regresión lineal, encontrando que el modelo ARIMA es considerablemente mejor, ya que tiene en cuenta la estacionalidad de las series.

En el artículo “Tendencias de las lluvias en el siglo XX sobre Kerala, India”, (Krishnakumar et al., 2009) analizaron la variación mensual, estacional y anual de las lluvias para el período 1871-2005 mediante la prueba de rangos de Mann-Kendall y tendencia lineal. Los análisis revelaron disminuciones significativas de las lluvias monzónicas del sur occidente, mientras que otros sectores presentaban considerable aumento en la estación post-monzón. Durante las estaciones de invierno y verano el incremento de la tendencia fue insignificante. (Pal & Al-Tabbaa, 2009), en el artículo “Tendencias en la precipitación extrema estacional, un indicador del cambio climático en Kerala, India”, examinaron los posibles cambios de tendencia en las lluvias extremas para el período 1954-2003, por medio de la técnica no-paramétrica de Mann-Kendall, aplicada a series de datos diarios. Los resultados mostraron que hay grandes diferencias intra-regionales en las tendencias en diferentes estaciones del año, siendo este un indicador de cambio climático local en las últimas cinco décadas.

En Colombia se pueden encontrar trabajos realizados con el fin de detectar tendencias de varios factores climáticos, como es el caso de (C. Muñoz, 2008) quien desarrolló un “Análisis de la Variabilidad en Series Hidrometeorológicas en una cuenca de Cabecera del Río Segura: Cuenca del Río Mundo”, empleando el método de Mann-Kendall para determinar las tendencias en las precipitaciones. Dentro de este trabajo, se encontró una tendencia significativa de forma ascendente en las series de precipitaciones en los últimos años.

Adicionalmente, se encuentra a (Smith, R.A. et al., 1996) quienes realizaron un estudio llamado “En búsqueda de señales de cambio climático en Colombia”, en el cual se utilizan varios métodos para la detección de tendencias como son Mann-Kendall, prueba

de tendencia lineal, prueba de Hotelling-Pabst, prueba de Sen, prueba de homogeneidad estacional y prueba de Kendall-Mann-Sneyers. Encontraron que casi todas las series de precipitación que analizaron mostraron tendencia decreciente o disminución en la media, con excepción de la serie de precipitación de la estación Sibundoy (Putumayo); sin embargo, hubo otras series que mostraron disminución en la varianza.

## 2.4. Análisis de Frecuencias

El estudio de las frecuencias de eventos en hidrología, es bastante importante. Los eventos en hidrología pueden referirse a sequías, inundaciones, etc. El análisis de frecuencias se realiza con el fin de determinar la periodicidad con la que en promedio ocurre un determinado evento. Es importante tener en cuenta que la magnitud de los eventos es inversamente proporcional a la frecuencia con la que ocurre el evento, esto quiere decir que cuan mayor sea la magnitud de un evento con menos frecuencia se presenta el mismo.

Ahora bien, el objetivo de los análisis de frecuencias es relacionar la magnitud de los eventos extremos con la frecuencia de ocurrencia, utilizando distribuciones de probabilidad. Para ello, se supone que los eventos presentan independencia y están idénticamente distribuidos, y el sistema que lo produce se considera estocástico, independiente del espacio donde se produce y del tiempo.

La función de distribución Gumbel es la distribución más ampliamente empleada para el estudio de los eventos extremos anuales, sin embargo, no es la única distribución de probabilidad empleada, ya que existen la distribución Normal, la Exponencial, la Pearson Tipo II, general de Valores Extremos (GVE), Weibull, entre muchas otras.

En general, existen, básicamente, dos métodos para ajustar distribuciones teóricas a distribuciones empíricas. La primera de ellas es el método propuesto por Chow, el cual propone utilizar factores de frecuencia, y el segundo método es el método gráfico, utilizando papel probabilístico.

En hidrología se emplea el concepto de periodo de retorno ( $T_r$ ) de los eventos de cierta magnitud. “El periodo de retorno es definido como el tiempo promedio, en años, en que

un determinado evento, es igualado o superado por lo menos una vez”(Monsalve, G., 1995).

Existen varios paquetes computacionales que sirven para realizar el análisis de frecuencias, algunos forman parte de software estadísticos, y otros como aplicativos hidrológicos específicos, como es el caso del desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia en 1997, conocido como: Distribuciones de Probabilidad Aplicadas a Ingeniería (DISPAH versión 1.1.0), mejorada por (Bustos, 2004) en la versión 2.2.0.

## **3. Metodología**

En el presente capítulo se presenta en detalle la metodología empleada para realizar el análisis de las series de tiempo, con el fin de determinar las tendencias que presentan algunos índices, definidos como representativos, de las precipitaciones extremas en la ciudad de Bogotá. Por esta razón en este capítulo se describe el área de estudio, la información base para la realización del estudio, como también, el fundamento teórico de la investigación desarrollada. Es importante aclarar que los resultados obtenidos mediante el empleo de la metodología propuesta y el análisis de estos se presentan en el Capítulo 4.

### **3.1. Área de Estudio**

El presente estudio se realizó en el casco urbano de la ciudad de Bogotá, la cual se encuentra ubicada en la región andina, en el altiplano cundiboyacense sobre la cordillera oriental, a una altura promedio de 2625 msnm. La ciudad se encuentra limitada en el oriente por los cerros orientales, los cuales tienen cerros tan altos como el cerro de Monserrate, a una altura de 3152 msnm, y el cerro de Guadalupe, a una altura de 3250 msnm (el más alto) y por el occidente por el río Bogotá, principal afluente de la ciudad. La ciudad tiene una longitud de 33 km de sur a norte y 16 km de oriente a occidente, y un área total de 1776 km<sup>2</sup>, de los cuales 307 km<sup>2</sup> corresponden al área urbana. (“Alcaldía Mayor de Bogotá,” 2014)

La ciudad de Bogotá limita al norte con los municipios de Chía, al occidente con los municipios de Cota, Funza, Mosquera, Soacha, Pasca, San Bernardo, Arbeláez, Cabrera y Venecia, al sur con los departamentos del Meta y del Huila y al occidente con los municipios de la Calera, Chipaque, Choachí, Gutiérrez, Ubaque y Une.

La ciudad se encuentra dentro de la zona de convergencia intertropical, caracterizada por dos épocas de lluvias, esto sucede ya que Bogotá se encuentra entre montañas, y estas sirven como barrera natural que restringe el flujo de humedad, influyendo en el régimen de lluvias.

El sistema de drenaje de la ciudad está ligado a su principal río, el río Bogotá, el cual drena de norte a sur, naciendo en el páramo de Guacheneque hasta entregar sus aguas al río Magdalena en el municipio de Girardot. Existen otros ríos de gran importancia en la ciudad como son el río Tunjuelo, el San Francisco, el Fucha y el Juan Amarillo, los cuales entregan sus aguas al río Bogotá. El drenaje de la ciudad de presenta principalmente en sentido oriente occidente, con red de drenaje dendrítica, sin embargo, gran parte de estos ríos ya han sido encauzados y canalizados, porque se encuentran dentro de la ciudad, y hacen parte del sistema de alcantarillado pluvial de la ciudad.

La ciudad de Bogotá se asienta en un territorio donde antiguamente se encontraba un lago, razón por la cual existen numerosos humedales, que son parte importante del sistema de drenaje de la ciudad y del río Bogotá, ayudando a amortiguar las crecientes de los ríos, como también, fundamentales para el ecosistema de la ciudad.

En cuanto al clima, la ciudad de Bogotá presenta un clima frío debido a su altura, y por su baja latitud presenta una baja oscilación de la temperatura del aire a lo largo del año. La temperatura media, en el área urbana de la ciudad, está entre 12 °C y 15 °C, entre alturas de 2500 y 2800 msnm, mientras que en los cerros orientales es de 6 °C. La temperatura máxima es del orden de 25 °C y se presenta en los meses de diciembre, enero y febrero. La temperatura mínima es del orden de los -6.4 °C en el sector de Fontibón y Engativá (Occidente) y se presenta en los meses de diciembre, enero y febrero; esto se debe a que en estos meses se presenta baja nubosidad con la mayor cantidad de horas con sol y baja humedad, lo que genera que se caliente la ciudad en el día y que se presente fuga de radiación en las noches, generando un enfriamiento.



Por otra parte, la precipitación total anual presenta un comportamiento bimodal, con épocas húmedas en los periodos de abril a mayo y de octubre a noviembre, y con precipitaciones por debajo de la media en los demás meses del año (IDEAM, 2009).

Teniendo en cuenta, la ubicación de la ciudad, la cual está entre montañas, en una zona de convergencia intertropical, y en cercanía a los llanos orientales, estos factores crean la influencia del “mar de la Amazonía” (se denomina así al frente de aire húmedo que viene del Amazonas y que choca contra la cordillera oriental generando lluvias a mitad de año en los llanos orientales), y esto genera que la precipitación en el sur de la ciudad presente un comportamiento monomodal.

El comportamiento espacial de las precipitaciones se caracteriza por tener menores precipitaciones en el occidente y aumentos a medida que se acercan a los cerros orientales. Por otro lado, desde el sur occidente hacia el nororiente las precipitaciones aumentan, hasta obtener su máximo en el sector conocido como Torca. De otra forma, el comportamiento espacial de la temperatura, se encuentra caracterizado por la disminución de la temperatura promedio en función de la altura, con un gradiente térmico aproximado de  $6.5^{\circ}\text{C}/700$  metros, esto quiere decir que en el oriente de la ciudad las temperaturas son menores que en el occidente. (IDEAM, 2009)

La humedad presenta un comportamiento bimodal, parecido al comportamiento de las precipitaciones. La humedad varía ente 73% y el 86%, con valores promedio de 79%. Los meses con valores por encima del promedio son abril, mayo, octubre y noviembre, y con valores menores los demás meses del año. Sin embargo, la variación de la humedad es muy pequeña debido a la ubicación geográfica de la ciudad.

La presión atmosférica de la ciudad se caracteriza por tener un máximo en los meses de julio y agosto, con un valor de 752.1 hPa, y mínimo en el mes de diciembre, con un valor igual a 751.1 hPa.

En la Figura No. 3-1 se presenta la caracterización de la precipitación anual en la ciudad de Bogotá por medio del mapa de isoyetas.

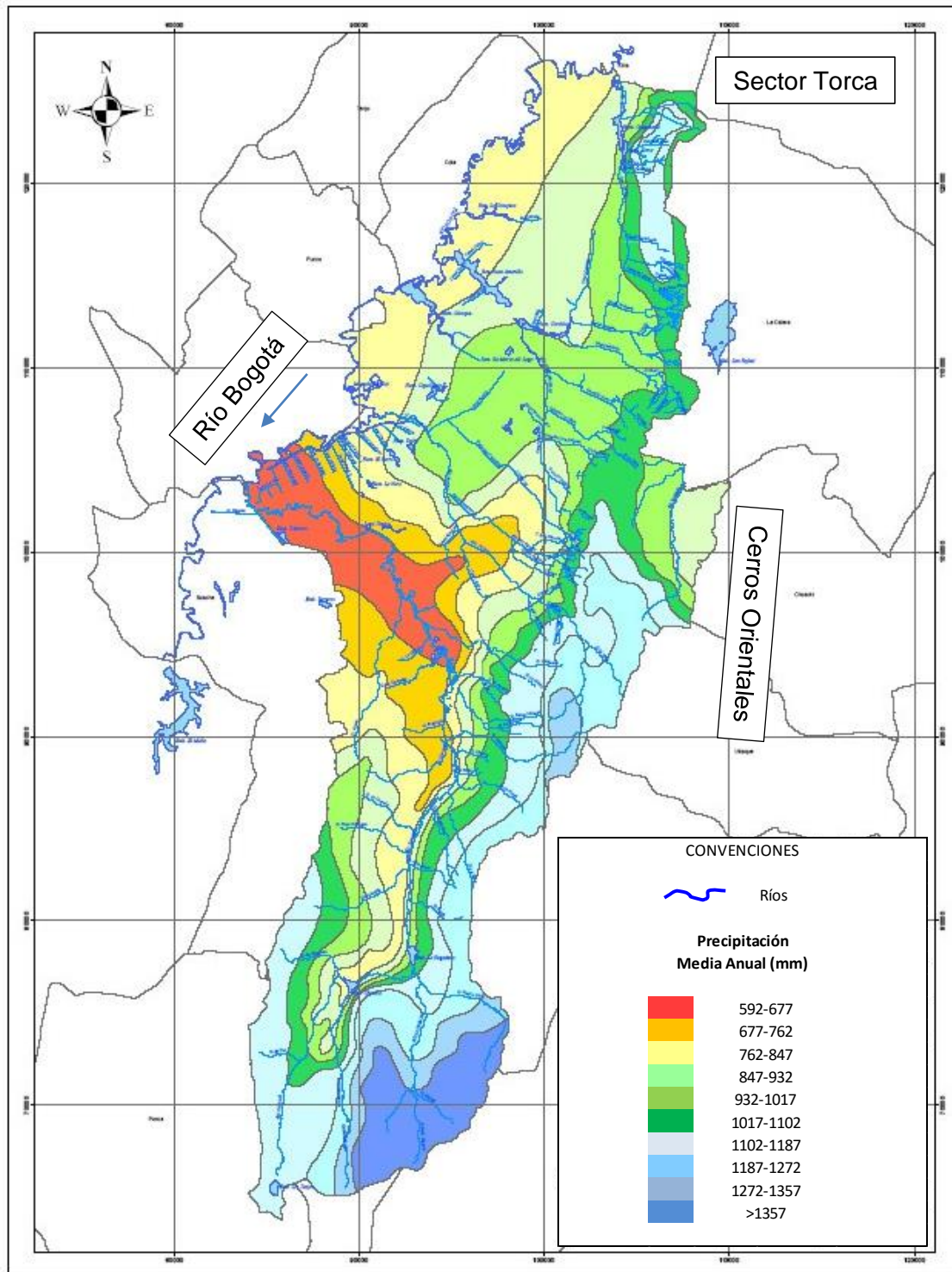


Figura No. 3-1. Mapa de Isoyetas de Precipitación Total Anual Media Multianual de la Ciudad de Bogotá, (IDEAM, 2009)

## 3.2. Conjunto de Datos Empleados

El estudio se realizó a partir de la información de las estaciones pluviográficas, pluviométricas, climatológicas y agrometeorológicas seleccionadas de las bases de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR, y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP.

De todas las estaciones operadas por estas entidades, se seleccionaron inicialmente 40 de acuerdo con los catálogos de las entidades. De estas estaciones se solicitó la información correspondiente de precipitación horaria y diaria. Sin embargo, la información relacionada con la precipitación a nivel horario, no fue entregada por estas entidades. Por esta razón se decidió trabajar únicamente con información de totales de precipitación a nivel diario.

Teniendo presente lo anterior, es importante aclarar que la intensidad de la precipitación es igual a la magnitud de la misma, ya que se están manejando valores diarios, por esta razón dentro del cuerpo del informe, estos dos términos serán empleados de forma indistinta.

Una vez recibida esta información se revisó y se analizó, encontrando que solo veintiún (21) estaciones presentaban un periodo de registro suficientemente largo y concurrente. Es importante aclarar, que existen otras estaciones con un periodo de registro igual o superior a los 30 años, sin embargo, no concurrente con el resto de las estaciones, ya que fueron suspendidas y no cuentan con información de los últimos 5 años o más.

En la Tabla No. 3-1, se presenta el nombre de la entidad, el nombre de la estación, el código, el tipo de estación, las coordenadas, la fecha de inicio de operación de la estación, el tiempo de registro y la altura a la cual está ubicada. En la Figura No. 3-2, se presenta la ubicación espacial de estas estaciones.

**Tabla No. 3-1. Características de las Estaciones Meteorológicas seleccionadas en este estudio**

No.	ENTIDAD	CODIGO	TIPO	NOMBRE ESTACION	CORDENADAS		Fecha Inicio		Fecha Final		TIEMPO DE REGISTRO (años)	ALTURA
					LATITUD	LONGITUD	Mes	Año	Mes	Año		
1	EAAB	2120524	CO	VITELMA	4.57	74.07	6	1941	2	2014	73	3870
2	EAAB	2120024	PM	VERJON EL	4.58	74.02	1	1946	2	2014	68	2800
3	IDEAM	2120558	CO	VENADO ORO VIVERO	4.60	74.06	8	1965	6	2014	49	3200
4	CAR	2120077	PM	TORCA	4.78	74.03	1	1970	12	2013	43	3460
5	IDEAM	2120124	PM	STA MARIA DE USME	4.48	74.13	12	1977	5	2014	37	2691
6	EAAB	2120052	PM	STA LUCIA	4.57	74.12	7	1956	3	2014	58	3125
7	EAAB	2120040	PG	SAN LUIS	4.63	74.03	2	1936	3	2014	78	2592
8	EAAB	2120023	PM	SAN DIEGO	4.62	74.07	1	1946	2	2014	68	2586
9	EAAB	2120196	PG	SALITRE CASA BOMBA*	4.67	74.07	5	1975	1	2014	39	2720
10	IDEAM	2120571	CO	JARDIN BOTANICO	4.67	74.10	9	1974	7	2014	40	2546
11	EAAB	2120032	PM	GRANIZO	4.62	74.05	9	1947	2	2014	67	2890
12	EAAB	2120547	CO	FONTIBON	4.68	74.15	1	1981	2	2014	33	2571
13	IDEAM	2120123	PM	ENMANUEL D ALZON	4.70	74.07	2	1976	1	2014	38	2590
14	EAAB	2120013	PM	DELIRIO	4.55	74.05	5	1933	3	2014	81	2643
15	CAR	2120085	PG	CISACA	4.48	74.08	1	1966	2	2014	48	2647
16	EAAB	2120031	PM	CERRO DE SUBA*	4.75	74.07	4	1946	2	2014	68	2537
17	EAAB	2120197	PM	CASABLANCA*	4.57	74.17	5	1976	2	2014	38	2571
18	EAAB	2120569	CO	CAMAVIEJA*	4.62	74.10	3	1975	3	2014	39	2585
19	EAAB	2120012	PM	AY SAN FRANCISCO	4.58	74.03	5	1933	2	2014	81	3999
20	CAR	2120559	SS	APTO GUAYMARAL	4.82	74.08	8	1965	2	2014	49	3052
21	IDEAM	2120579	SP	APTO EL DORADO	4.71	74.15	1	1972	2	2014	42	3050

Nota: Las estaciones con \*, son estaciones ubicadas a alturas entre 10 y 24 m sobre el terreno

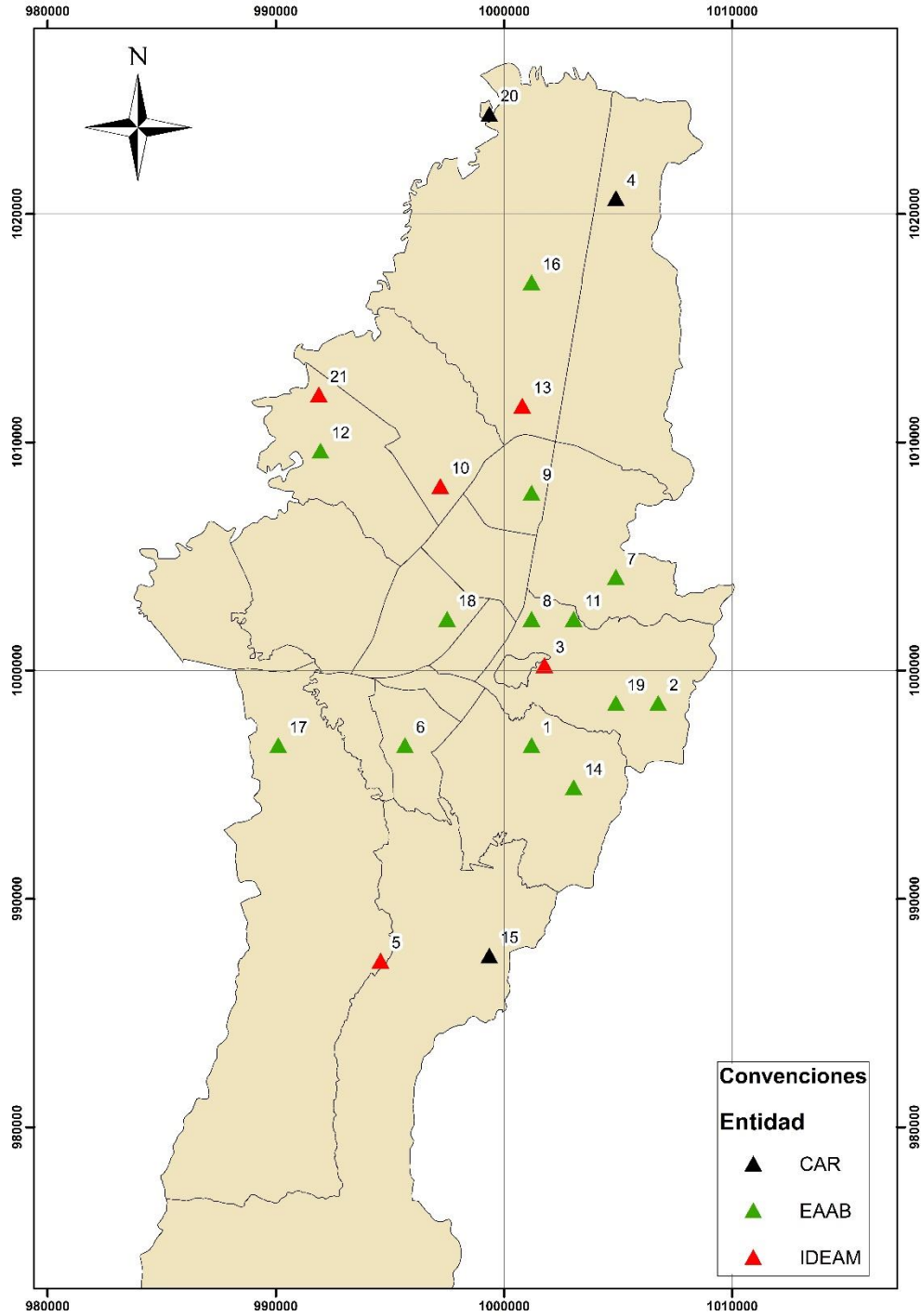


Figura No. 3-2. Localización General de la Estaciones seleccionadas Operadas por la CAR, la EAAB-ESP e IDEAM. Sistema de Coordenadas Projectadas, Planas Cartesianas (MAGNA-SIRGAS-Colombia-Bogotá).

La distribución espacial de las estaciones utilizadas en el presente estudio, dentro del área urbana de la ciudad de Bogotá, presenta distancias entre estaciones vecinas que oscilan en el rango de 1.5 km a 10 km, con una densidad promedio de 1 estaciones/km<sup>2</sup>. Las alturas de ubicación de los aparatos en la zona urbana en su mayoría son de 1.4 m sobre el suelo, excepto algunas ubicadas en las cubiertas de edificios, localizadas entre 10 y 24 m de altura, las cuales son Cerro de Suba, Salitre Casa Bomba, Casablanca y Camavieja.

### **3.3. Análisis de Consistencia y Homogeneidad de la Información Recolectada**

Con el fin de determinar las posibles tendencias en la precipitación extrema en la ciudad, se debe realizar inicialmente un análisis de consistencia de los datos. Una vez realizado este análisis, se procedió a seleccionar las estaciones definitivas para el estudio. Se consideraron estaciones con registros homogéneos de al menos treinta (30) años, y se siguieron las recomendaciones realizadas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), sobre el período mínimo de estudio para análisis climáticos.

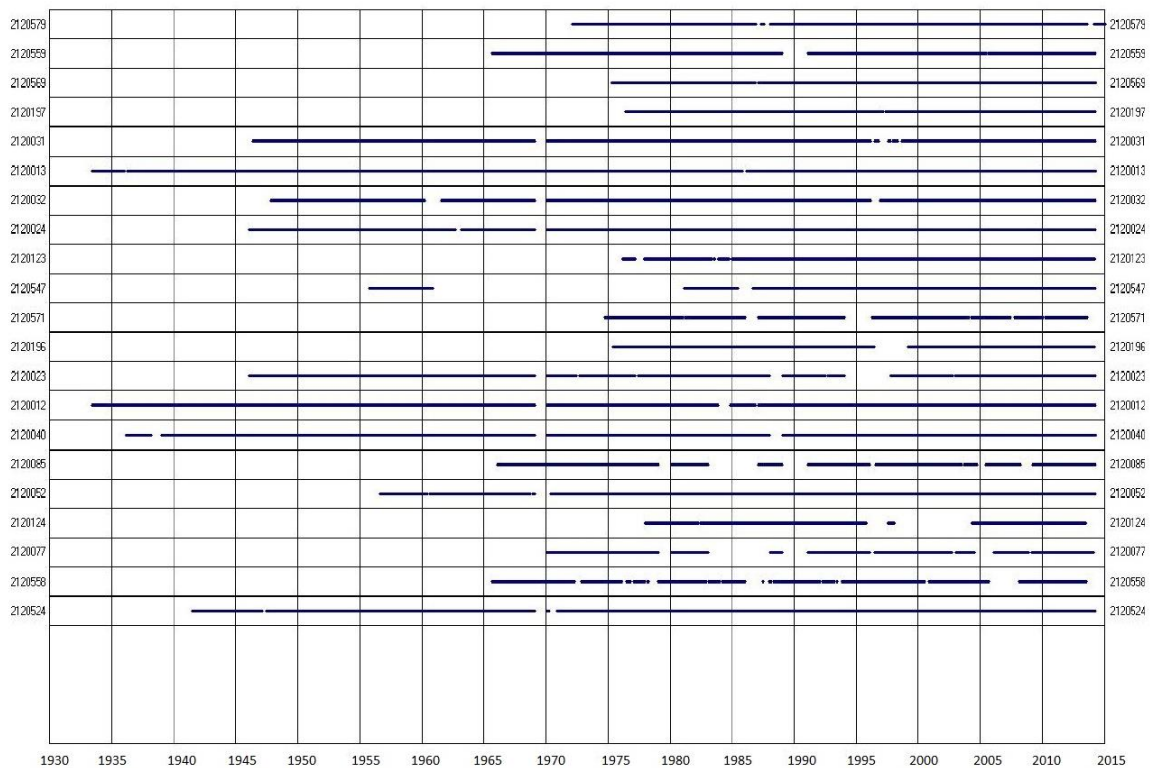
Este análisis exploratorio está compuesto por tres partes, la primera de ellas consiste en la identificación del periodo de registro concurrente de las estaciones, la segunda parte consiste en la identificación de las estaciones homogéneas, de acuerdo con la localización de las estaciones dentro de la ciudad, y la tercera parte, consiste en la identificación de datos anómalos, por medio del empleo de la metodología de diagramas de Cajas y Patillas (Box-Plot) y por una revisión manual de los datos, de acuerdo con el agrupamiento de las estaciones homogéneas.

#### **3.3.1. Identificación del Periodo Concurrente**

Para realizar la identificación del periodo concurrente de registro en las estaciones seleccionadas, se empleó el software computacional CHAC Versión 5.06, el cual es un

programa de distribución gratuita, desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España (CEDEX).

En primera instancia, el análisis de la variable precipitación se ha basado en las estaciones listadas en la Tabla No. 3-1, las cuales tienen un periodo de registro concurrente, tal como se presenta en la Figura No. 3-3, entre 1982 y 2013, para un total de treinta y dos (32) años. Es importante tener en cuenta que dentro de dicho periodo, se presentan lapsos de tiempo dentro de los cuales no se cuenta con información, sin embargo, y de acuerdo con el objetivo del presente estudio, no se han llenado, y se ha trabajado con las series discontinuas. En el Anexo A de este informe se presenta la información original, amablemente suministrada por las tres entidades, para todas las estaciones objeto del presente estudio.



**Figura No. 3-3. Periodos de Registro de Precipitación en las Estaciones Climáticas Seleccionadas en el Presente Estudio**

### **3.3.2. Identificación de Estaciones Homogéneas**

La identificación de estaciones homogéneas se realizó igualmente mediante el empleo del software computacional CHAC Versión 5.06. Inicialmente se hizo una caracterización de la precipitación media mensual a nivel multianual para las estaciones seleccionadas, por medio de histogramas, los cuales se presentan en la Tabla No. 3-2 y la Figura No. 3-4. Se observa que la precipitación mensual promedio es igual a 82.4 mm, con valores mínimo igual a 53.0 mm, que se presentan en los meses de enero y julio, y máximo igual a 104.5 mm, generalmente en los meses de abril y noviembre. La precipitación mínima anual es igual a 41.5 y máxima igual a 129.7 mm. Adicionalmente, se puede observar que la precipitación en términos generales presenta un comportamiento bimodal; los meses por encima del promedio son marzo, abril mayo, octubre y noviembre, y el resto del año se presenta precipitaciones por debajo del promedio, sin embargo, hacia el sur occidente de la ciudad, en las estaciones de Ay. San Francisco, el Verjon, y Cisaca, se observa un comportamiento monomodal, debido a la influencia del “mar de la Amazonía”, con precipitaciones por encima del promedio en los meses de marzo a noviembre; la precipitación máxima se presenta generalmente en el mes de julio y la mínima en el mes de enero. En la Figura No. 3-4 se puede observar que mientras en gran parte de la ciudad a mitad de año se presentan los meses más secos, en el sur occidente de la ciudad, se presenta la mayor precipitación.

Por otro lado, en la Tabla No. 3-2 se observa que la precipitación total anual es en promedio igual a 989 mm; la estación con mayor precipitación total anual es Cisaca con una precipitación igual a 1241 mm, y la estación con menor precipitación total anual es la estación Casablanca con una precipitación anual igual a 636 mm.

Seguidamente para efectuar el análisis de homogeneidad y consistencia de la información se identificaron cuatro grupos de estaciones. Esta agrupación se realizó teniendo en cuenta la ubicación espacial de las mismas y a criterio del tesista. Adicionalmente, se utilizó la herramienta computacional CHAC para realizar el ejercicio de agrupación automática de las estaciones, y el resultado arrojado fue igualmente la identificación de cuatro grupos de estaciones. Sin embargo, el primer grupo estaba conformado únicamente por la estación Cisaca. Finalmente, se tomó la decisión de





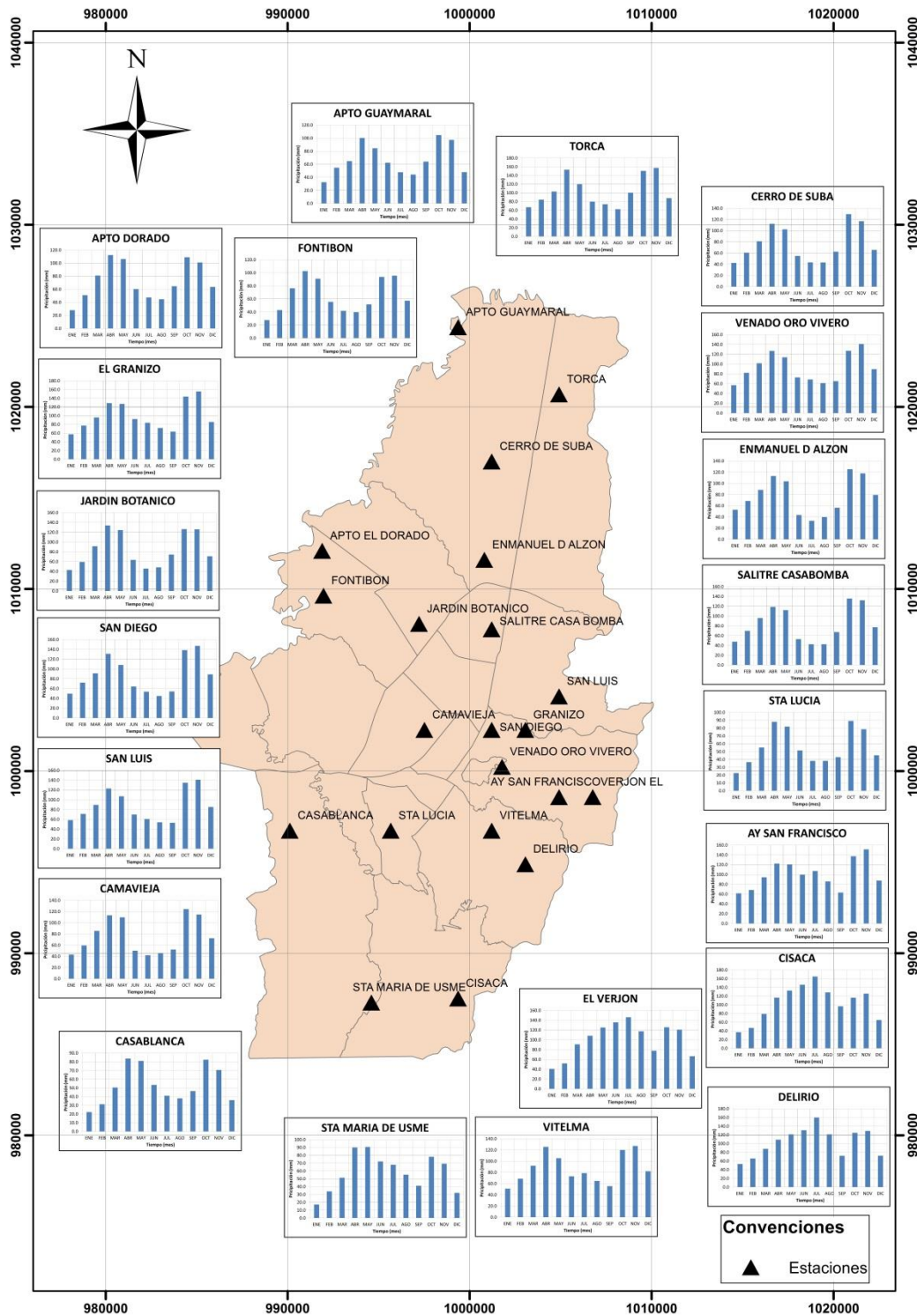


Figura No. 3-4. Histogramas de Precipitación Media Mensual a Nivel Multianual de las estaciones de Precipitación seleccionadas.

Tabla No. 3-3. Agrupación de Estaciones

GRUPO	ESTACIÓN
1	Casa Blanca
1	Sta. Lucia
1	Sta. María de Usme
2	Ay San Francisco
2	Cisaca
2	Delirio
2	El Granizo
2	San Diego
2	San Luis
2	Venado Oro Vivero
2	El Verjon
2	Vitelma
3	Cama vieja
3	Cerro de Suba
3	Emmanuel D Alzon
3	Jardín Botánico
3	Salitre Casa Bomba
3	Torca
4	Apto Dorado
4	Apto Guaymaral
4	Fontibón

Una vez identificados los cuatro grupos de estaciones, se procedió a realizar el análisis de homogeneidad, mediante el empleo de curvas de doble masa, con el objetivo de evaluar la homogeneidad de los registros de las estaciones por grupo y adicionalmente para la identificación posterior de posibles datos anómalos.

El análisis de dobles masas “consiste en construir una curva de doble acumulación, en la cual son relacionados los totales anuales acumulados de precipitación de un determinado lugar y la media acumulada de los totales anuales de todas las estaciones de la región, considerada climatológicamente homogénea y por consiguiente homogénea desde el punto de vista de datos” (Monsalve, G., 1995).

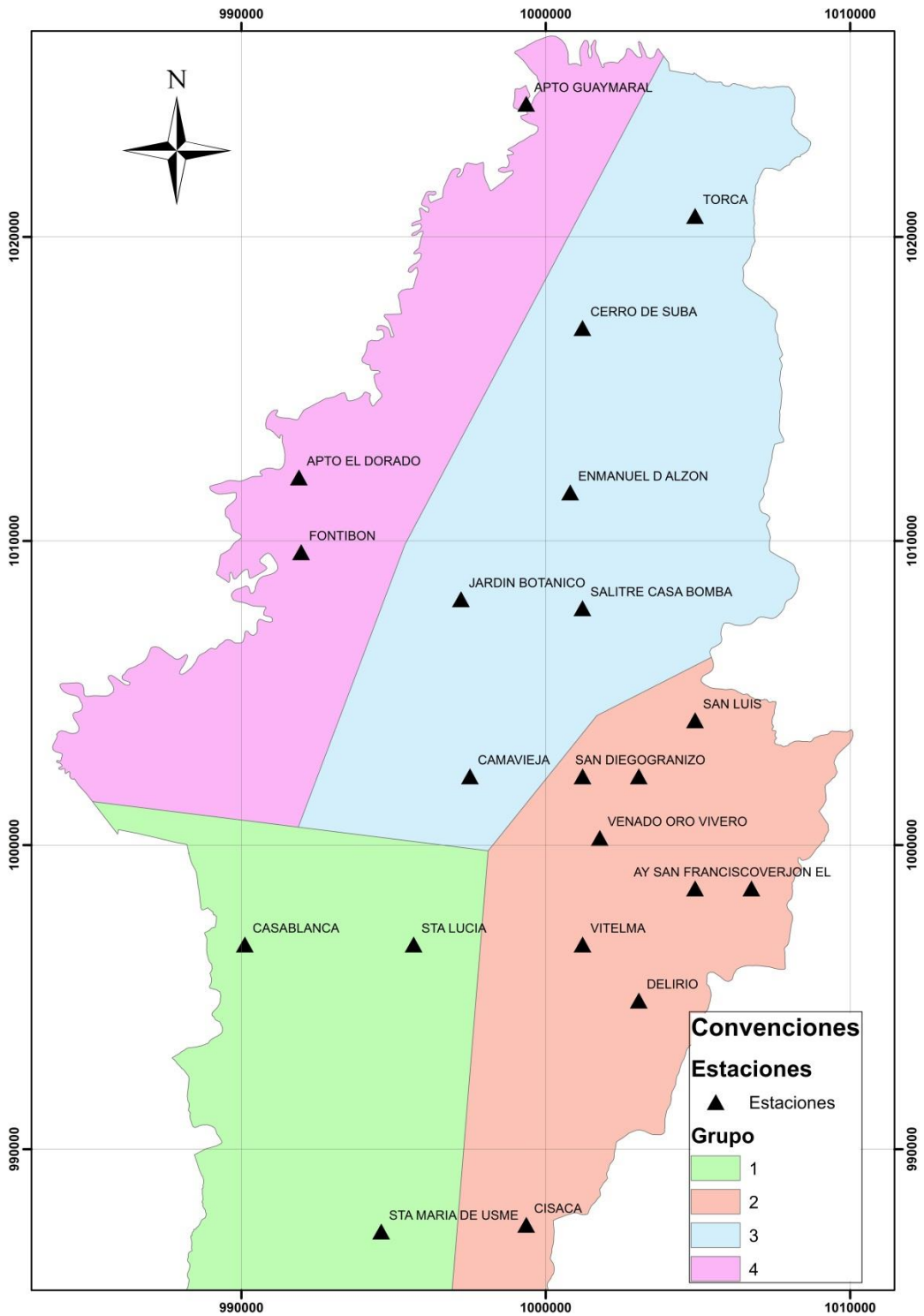


Figura No. 3-5. Agrupación de Estaciones para Análisis de Homogeneidad de los Registros Pluviométricos.

### **3.3.3. Identificación de Datos Anómalos**

La metodología de diagramas de cajas y patillas, consiste en una caja rectangular, en donde los lados más largos muestran el recorrido intercuartílico (Q25 y Q75). El rectángulo está dividido por un segmento vertical que indica donde se posiciona la mediana y por lo tanto su relación con los cuartiles primero y tercero. Adicionalmente, existen dos líneas que sobresalen de la caja denominadas “bigotes”. Estos “bigotes” o patillas tienen un límite de prolongación (que corresponde, normalmente, a 3 veces la desviación estándar), de modo que cualquier dato que no se encuentre dentro de este rango es identificado como un dato posiblemente anómalo.

La identificación de datos anómalos (Outliers) se realizó mediante el empleo de la metodología de diagramas de cajas y patillas (Box-Plot) y se complementó mediante la inspección manual de los datos, teniendo como base los registros en las estaciones homogéneas de cada grupo. De esta forma, se garantiza que todos los datos que se consideraron como posiblemente anómalos, no fueran solo los estadísticamente incorrectos, sino que, efectivamente correspondieran a un dato malo (se compararon los valores que inicialmente se consideraron anómalos (del estudio de Box-Plot) y se revisó que efectivamente fuera anómalo, que no coincidiera con la información de alguna otra estación del grupo. En el Anexo C, se relacionan los outliers identificados por esta metodología para las diferentes estaciones; adicionalmente, se incluye su magnitud, su fecha y la razón por la cual no fue tenido en cuenta.

## **3.4. Caracterización y Clasificación de los Eventos de Precipitación**

La caracterización y clasificación de los eventos de precipitaciones intensas debe realizarse con el fin de determinar umbrales de estudio, a fin de filtrar todos los eventos de lluvia registrados a nivel diario (Groisman, Knight, & Karl, 2011).

Para realizar esta clasificación se emplearon dos métodos, el primero de ellos es la función empírica de excesos medio, la cual se estima mediante la siguiente expresión, y que tiene en cuenta una muestra de los registros, ordenada de forma descendente.

$$\hat{e}_n(\mathbf{u}) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{i,n} - \mathbf{u})}{\sum_{i=1}^n (X_{i,n} > \mathbf{u})} \quad (3-1)$$

En el numerador de la fórmula arriba indicada se encuentra la suma de los excesos ( $X_{i,n}$ ) sobre el umbral ( $u$ ) y en el denominador el número de valores que cumplen con la condición de ser superiores al umbral, determinando así la media aritmética de los valores que exceden  $u$  (Pérez, 2004).

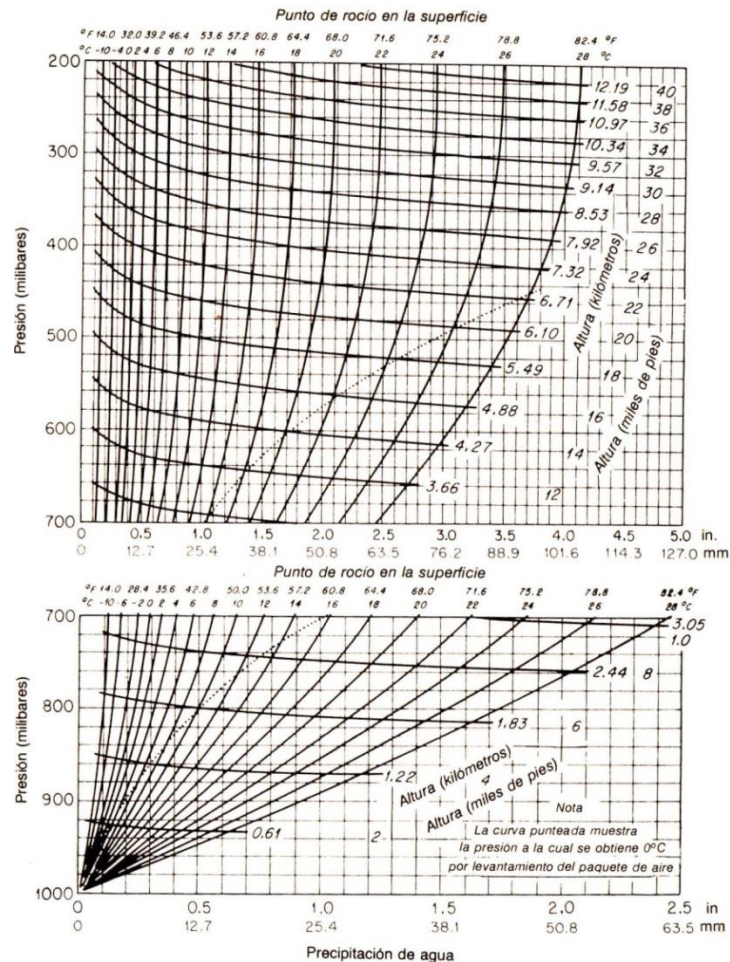
Una vez calculada esta función se procede a graficar en las abscisas los valores de la muestra y en el eje de las ordenadas el valor de la función empírica de excesos medio. La gráfica así construida debe resultar en una curva ascendente. Ahora bien, el valor de la abscisa en donde la curva empieza a ascender se asume como el umbral de la función.

Para el segundo método se utilizó el concepto de agua precipitable, como la cantidad total de vapor de agua en una capa de aire, teniendo en cuenta que en la naturaleza no existe un proceso capaz de precipitar el contenido total de humedad en una capa de aire (Lensley et al., 1997). La cantidad de agua precipitable en una columna de aire, se puede calcular por incrementos de presión o de altura a partir de la superficie, y por observaciones de temperatura, humedad y presión a grandes alturas. Adicionalmente, se puede calcular en milímetros empleando la siguiente ecuación:

$$Wp = \sum 0.01 \bar{q}_h \Delta p_a \quad (3-2)$$

Donde,  $\Delta p_a$  es el cambio de la presión en milibares entre capas,  $\bar{q}_h$  es el promedio de las humedades específicas en los puntos inferiores y superiores de cada capa, en gramos por kilogramo.

Sin embargo y teniendo en cuenta las limitaciones por falta de información se procedió a utilizar el nomograma de la Figura No. 3-6, donde se presenta la profundidad de agua precipitable en una columna de aire saturado con su base a nivel de 1.000 milibares y con su límite superior a cualquier altura hasta los 200 milibares. Los resultados de estos análisis se presentan en el Capítulo 4.



**Figura No. 3-6. Agua Precipitable en una Columna de Aire, para cualquier Altura en Función del Punto de Rocío.<sup>1</sup>**

Una vez clasificados los eventos de precipitación, mediante la metodología arriba descrita, y para el análisis de los mismos, se seleccionaron los 13 índices de

<sup>1</sup> Figura 2-17 de la Referencia bibliográfica (Ray K. Lensley, Jr., Max A. Kholer, & Josehp L.H. Paulus, 1997), se supone un gradiente vertical de temperatura pseudo-adiabático y saturación del aire. (US. National Weather Service.)

precipitación extrema, propuestos por la Junta CCI/CLIVAR/ CMOMM ETCCDI (T. Peterson *et al.*, 2001; T. C. Peterson, 2005). Estos índices se calcularon empleando el paquete RClmDex V1 (Xuebin Zhang & Feng Yang, 2004), el cual corre en el software R, y los resultados fueron verificados mediante un ejercicio manual de cálculo con todas las estaciones seleccionadas.

Estos índices pueden reflejar el cambio de la precipitación extrema en diferentes aspectos, con extremos relativamente débiles, bajo nivel de ruido y significado y han sido muy utilizados en la literatura internacional para evaluar los cambios en las precipitaciones extremas (Klein Tank *et al.*, 2006; Trambly *et al.*, 2012; You *et al.*, 2010). Los índices se agrupan en dos categorías. La primera de ellas se refiere a índices en las precipitaciones (PATDH, DMH, DEH, MMPD, MMP5D, ISI), mientras que la segunda categoría se refiere al índice en el número de días de precipitación (NSPI, NSPMI, NSMM (30), NSMM (40), NSMM (44.6), DS, DHC).

La definición y las unidades de los trece índices seleccionados se presentan en la Tabla No. 3-4.

Los índices se determinaron una vez las series de tiempo originales fueron depuradas y se removieron los datos anómalos. Los índices se calcularon empleando la herramienta computacional R, y el paquete RClmDex V1, obtenido de la página web <http://etccdi.pacificclimate.org/>.



Tabla No. 3-4. Definición y Unidades de los Índices Empleados en el Estudio

ÍNDICE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
PATDH	Precipitación anual total en los días húmedos (PRCP $\geq 1$ mm)	mm
NSPI	Número de días con precipitación intensa	d
NSPMI	Número de días con precipitación muy intensa	d
NSMM (30)	Número de días sobre 30 mm	d
NSMM (40)	Número de días sobre 40 mm	d
NSMM (44.6)	Número de días sobre 44.6 mm	d
DMH	Precipitación anual total en que PRCP > 95 percentil	mm
DEH	Precipitación anual total en que PRCP > 99 percentil	mm
MMPD	Máximo mensual de precipitación en 1 día	mm
MMP5D	Máximo mensual de precipitación en 5 días consecutivos	mm
DS	Número máximo de días consecutivos con PRCP < 1 mm	d
DHC	Número máximo de días consecutivos con PRCP $\geq 1$ mm	d
ISI	Precipitación anual total dividida para el número de días húmedos (definidos por PRCP $\geq 1.0$ mm) en un año	mm/d

### 3.5. Análisis de Tendencias de Series de Tiempo de Índices de Precipitaciones

El análisis de tendencias se realizó sobre las series de tiempo generadas a partir de los trece (13) índices previamente descritos, con el fin de identificar posibles cambios en los mismos en los últimos años, asociados con cambios a través del tiempo en las precipitaciones extremas sobre la ciudad de Bogotá. Para ello, se analizaron las series totales de tiempo, y en segunda instancia, se efectuaron análisis por decenios de las series.

Se emplearon pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas de identificación de tendencias. La herramienta computacional empleada fue R Versión 3.1.2, desarrollada por la Fundación para la estadística Computacional R (W. N. Venables, D. M. Smith, & the R Core Team, 2015). Este paquete estadístico fue desarrollado con el fin de facilitar todos los procesos estadísticos y cuenta con módulos de trabajo, que agilizan la realización de tareas.

Adicionalmente, y como ya se ha mencionado, para el análisis de tendencias de las series de tiempo de los índices calculados, se empleó la metodología de regresión lineal para analizar el comportamiento de todas las series, complementada con el análisis de tendencia por el método de Mann Kendall; este test ha sido ampliamente aplicado en estudios de identificación de tendencias en series hidrometeorológicas y otras series ambientales. También se emplearon los métodos de ARMA (Box Jenkins) y Spearman. Es importante aclarar, que los tres últimos métodos se emplearon solamente para analizar los principales índices como son el DMH, DEH, NSPI, NSPMI, NSMM (30), NSMM (40) y NSMM (44.6). Estos índices se consideran los principales, ya que están más relacionados con las tormentas extremas.

### **3.6. Análisis de Frecuencias de las Series Anuales de Precipitación**

El análisis de frecuencia es un “procedimiento para estimar la frecuencia de ocurrencia o la probabilidad de ocurrencia de eventos pasados o futuros.”(Monsalve, G., 1995). Los principales supuestos para este tipo de análisis son que los eventos son homogéneos e independientes entre sí, que los procesos son estacionarios a través del tiempo, (la estacionaridad se define como un componente que se repite siempre en intervalos de tiempo similares). Este último supuesto es una gran restricción para realizar análisis de frecuencias de variables aleatorias, dentro del marco del cambio climático. Es importante tener en cuenta que no cumplir con este supuesto (estacionaridad) genera que las extrapolaciones realizadas a partir de los ajustes a distribuciones probabilísticas estén por debajo o por encima (de acuerdo con el tipo de cambio en la estacionaridad de las series) del valor real, y generan gran incertidumbre en la toma de decisiones.

La estacionaridad de la series se tuvo en cuenta ya que se consideró hacer un análisis década, y con esto evitar tener problemas con la estacionalidad de las series.

---

El análisis de frecuencia se realizó con la ayuda de herramientas computacionales como: Distribuciones de Probabilidad Aplicadas a Ingeniería (DISPAH versión 2.2.0), desarrollada en la Universidad Nacional de Colombia (Bustos Molina, 2004), y Statistical Distribution Analysis (SMADA, Distrib 2.13) desarrollado por R. D. Eaglin (Dr. Ron Eaglin & Dr. Marty Wanielista, 2015). Las distribuciones de probabilidad evaluadas, corresponden a aquellas que tienen amplio uso en hidrología como son: Normal, Gumbel, Pearson Tipo III, Log – Pearson Tipo III, Log – Normal y EV3. El periodo de análisis correspondió a 1982 - 2014, para todas las 21 estaciones seleccionadas. Adicionalmente, se obtuvieron los valores de precipitación máxima para eventos correspondientes a diferentes períodos de retorno: 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

## **4. Resultados y Análisis**

En este capítulo se presentan los resultados de todas las fases metodológicas descritas en detalle en el capítulo anterior. Adicionalmente, se presenta el análisis detallado de los resultados y la discusión de los mismos.

Inicialmente se presentan los resultados del análisis de consistencia y homogeneidad de los registros efectuado, realizado para dar confianza en el uso de las series depuradas y para calcular sobre ellas los trece índices seleccionados. Seguidamente, se presentan y discuten los resultados del análisis de tendencias sobre las series de tiempo de los índices, y finalmente se presentan y analizan los resultados del análisis de frecuencias realizado.

### **4.1. Resultados Análisis de Consistencia y Homogeneidad de la Información Recolectada**

#### **4.1.1. Resultados Análisis de Homogeneidad**

Es importante tener presente que en la selección de los grupos para realizar el estudio de homogeneidad se tuvo en cuenta la ubicación espacial de las estaciones, donde se consideró si estas se encuentran en el sur, o en el norte, sobre los cerros orientales o sobre la planicie. Todas las estaciones se encuentran dentro de la cuenca hidrográfica del río Bogotá, y están ubicadas dentro del casco urbano de la ciudad. Por esta razón, inicialmente se descartaron varias estaciones que contaban con periodos de registro suficientemente largos pero que se encontraban ubicadas en la zona rural de Bogotá, por fuera del área de estudio seleccionada. Considerando lo anterior, el primer grupo seleccionado se encuentra ubicado en el sur occidente de la ciudad. El segundo grupo,

se encuentra ubicado en el sur oriente de la ciudad, con una influencia muy alta del comportamiento climático de la región Orinoco del país. El tercer grupo está ubicado en la parte plana de la ciudad, sobre el borde occidental de la misma, y por último, el cuarto grupo, se encuentra ubicado en los cerros orientales y el centro de la ciudad.

Para el análisis de homogeneidad de la información se empleó el método gráfico del análisis de dobles masas, y se dividieron las estaciones en los cuatro (4) grupos arriba especificados. El resultado de este análisis se presenta en el Anexo B.

Las pruebas de homogeneidad de los registros por grupos evidencian que la mayoría de las estaciones presentan homogeneidad con sus respectivos grupos, con excepción de las estaciones Cisaca y Jardín Botánico. A pesar de ello, dentro del presente estudio se consideró importante contar con los registros de estas dos estaciones, por su periodo de registro, y su ubicación, puesto que están distantes de las otras estaciones, factor que quizás puede explicar las razones para la no homogeneidad. En la Figura No. 4-1, se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos mediante el análisis realizado.

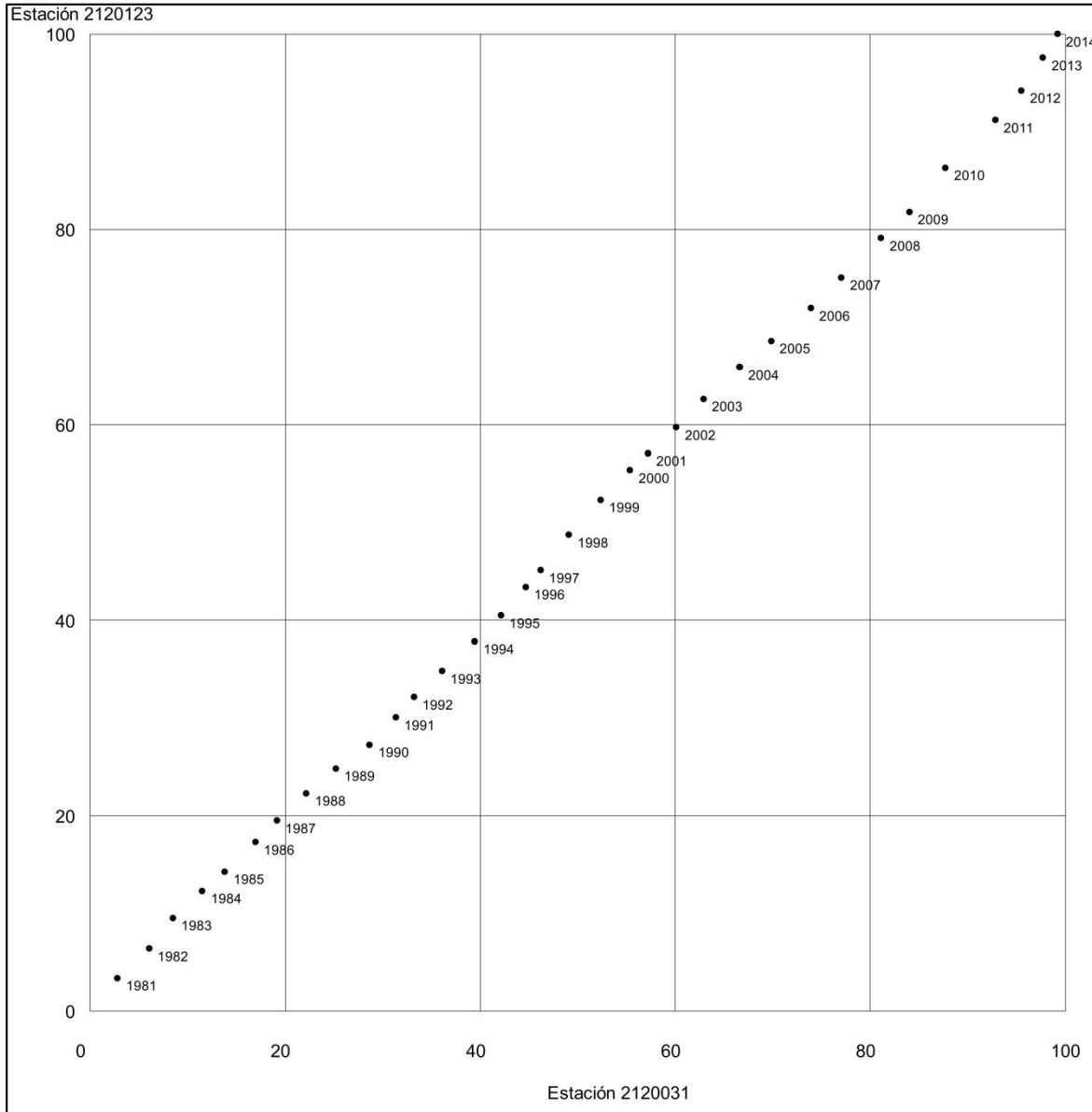


Figura No. 4-1. Ejemplo de Análisis de Dobles Masas. Estación Cerro de Suba y Estación Salitre. (Las etiquetas corresponden al año, Los ejes X y Y están en (%))

#### 4.1.2. Resultados Análisis de Datos Anómalos

El análisis de datos anómalos, como se indicó previamente, se realizó por medio del método del diagrama de cajas y patillas (Box-Plot), y se complementó este análisis



para poder detectar un comportamiento de la precipitación extrema en el sector. Una vez realizado este análisis, se detectaron los datos anómalos, encontrando un total de 40 datos anómalos para las 21 estaciones seleccionadas y que fueron removidos de las series. Como ya se mencionó, el resultado de este análisis se presenta en el Anexo C, en donde se incluye para cada estación el número del dato anómalo detectado por el método de Box-Plot, la fecha del evento, la magnitud del mismo y la confirmación o no del mismo como un dato anómalo.

Una vez detectados los datos anómalos y eliminados de las series históricas, se procedió a calcular para cada una de ellas los estadísticos básicos de las series, los cuales incluyen número de datos de la serie, el error estándar, la desviación estándar, la varianza, la covarianza, el valor mínimo, el primer cuartil, la mediana, el promedio, el tercer cuartil, el valor máximo, el porcentaje de datos faltantes, el coeficiente de asimetría y el coeficiente de curtosis. El resultado de este análisis estadístico se presenta en la Tabla No. 4-1.

Se observa que la precipitación diaria promedio varía entre 2.06 y 3.63 mm, lo cual indica que presenta una gran variabilidad y una desviación estándar considerable. Adicionalmente, los valores en la Tabla No. 4-1, indican a nivel general, una alta variabilidad de los datos de precipitación total diaria sobre la ciudad, aunque el error estándar de la media es del orden del 5%, relativamente bajo. Igualmente, los datos presentan un elevado grado de concentración alrededor de los valores centrales.

Adicionalmente, se presenta en la Figura No. 4-3, un ejemplo de las series de datos depuradas. En este ejemplo se puede observar la secuencia de la serie histórica de los datos de precipitación de la estación Aeropuerto El Dorado. En la Figura No. 4-3 se pueden observar en rojo, los datos faltantes de la serie. Este tipo de gráficas para las series históricas de las demás estaciones se presentan en el Anexo D.



**Tabla No. 4-1. Estadísticos Básicos de las Series Diarias de Precipitación en las 21 estaciones seleccionadas**

ENTIDAD	CODIGO	TIPO	NOMBRE ESTACION	No. Datos	E.E.	$\sigma$	VAR	C.V.	Q1	M.A.	$\bar{X}$	Q3	MAX	%Fal	AS	Cu
IDEAM	2120579	SP	APTO EL DORADO	11156	0.049	5.29	28.03	3.93	0.00	0.10	2.38	2.10	78.50	5	3.93	21.84
CAR	2120559	SS	APTO GUAYMARAL	10328	0.049	5.32	28.34	3.91	0.00	0.00	2.34	2.00	69.40	12	3.91	20.09
EAAB	2120012	PM	AY SAN FRANCISCO	11047	0.055	5.92	35.07	3.91	0.00	0.70	3.63	4.10	124.90	5	3.91	20.02
EAAB	2120569	CO	CAMAVIEJA	11379	0.065	7.01	49.18	4.25	0.00	0.10	2.57	2.00	75.10	3	4.25	30.53
EAAB	2120197	PM	CASABLANCA	11516	0.040	4.35	18.96	4.47	0.00	0.10	1.78	1.30	65.00	1	4.47	27.66
EAAB	2120031	PM	CERRO DE SUBA	11142	0.053	5.76	33.20	3.72	0.00	0.10	2.58	2.20	73.20	5	3.72	18.13
CAR	2120085	PG	CISACA	8500.	0.056	6.01	36.17	7.66	0.00	0.40	2.91	3.40	189.50	22	7.66	148.31
EAAB	2120013	PM	DELIRIO	11473	0.061	6.60	43.58	3.52	0.00	0.70	3.60	4.30	88.30	2	3.52	18.77
IDEAM	2120123	PM	ENMANUEL D ALZON	11382	0.056	6.09	37.05	3.80	0.00	0.00	2.52	1.70	80.30	3	3.80	18.96
EAAB	2120547	CO	FONTIBON	11170	0.045	4.90	24.05	4.45	0.00	0.20	2.13	1.80	73.00	4	4.45	28.63
EAAB	2120032	PM	GRANIZO	11155	0.064	6.93	48.08	4.66	0.00	0.50	3.26	3.20	139.00	5	4.66	35.79
IDEAM	2120571	CO	JARDIN BOTANICO	9156	0.061	6.62	43.77	3.61	0.00	0.30	3.17	3.20	73.40	22	3.61	17.37
EAAB	2120196	PG	SALITRE CASA BOMBA	10452	0.059	6.34	40.18	3.75	0.00	0.10	2.82	2.23	76.50	11	3.75	18.51
EAAB	2120023	PM	SAN DIEGO	9554	0.067	7.27	52.91	4.56	0.00	0.30	3.10	2.50	98.50	18	4.56	29.83
EAAB	2120040	PG	SAN LUIS	11310	0.064	6.90	47.60	4.45	0.00	0.40	3.06	2.50	129.00	3	4.45	31.01
EAAB	2120052	PM	STA LUCIA	11280	0.046	4.97	24.69	4.69	0.00	0.10	2.06	1.60	92.20	3	4.69	34.05
IDEAM	2120124	PM	STA MARIA DE USME	8422	0.039	4.16	17.34	3.84	0.00	0.20	1.98	2.00	65.00	25	3.84	22.22
CAR	2120077	PM	TORCA	8218	0.061	6.56	42.96	4.55	0.00	0.00	2.85	2.98	95.00	24	4.55	32.19
IDEAM	2120558	CO	VENADO ORO VIVERO	8934	0.067	7.20	51.86	3.76	0.00	0.30	3.33	3.00	97.00	24	3.76	18.94
EAAB	2120024	PM	VERJON EL	11626	0.061	6.56	43.04	3.96	0.00	1.00	3.70	4.60	112.00	1	3.96	27.15

Nota: E.E. = Error Estándar en la Media,  $\sigma$  = Desviación Estándar, VAR = Varianza, C.V. Covarianza, Q1= Primer Cuartil, M.A.= Mediana,  $\bar{X}$  = Media, Q3=Tercer Cuartil,

MAX= Valor Máximo, %Fal = Porcentaje de Datos Faltantes < 30%, AS = Asimetría, Cu = Curtosis

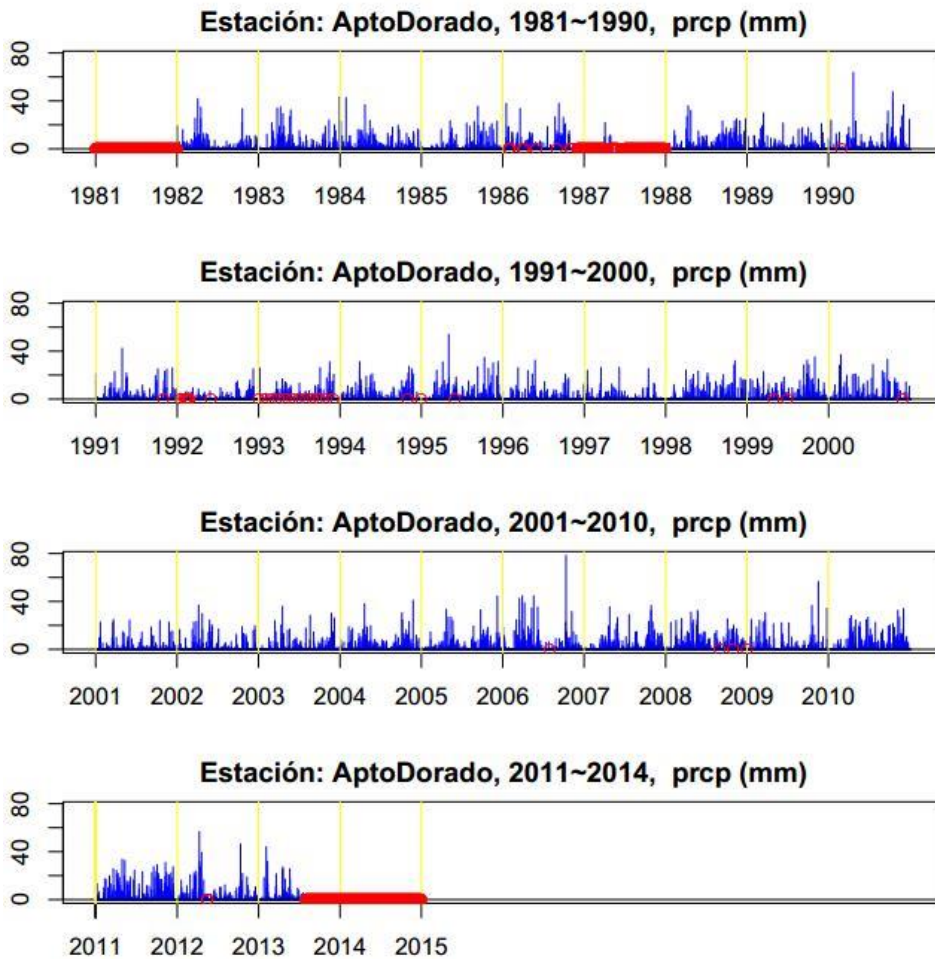


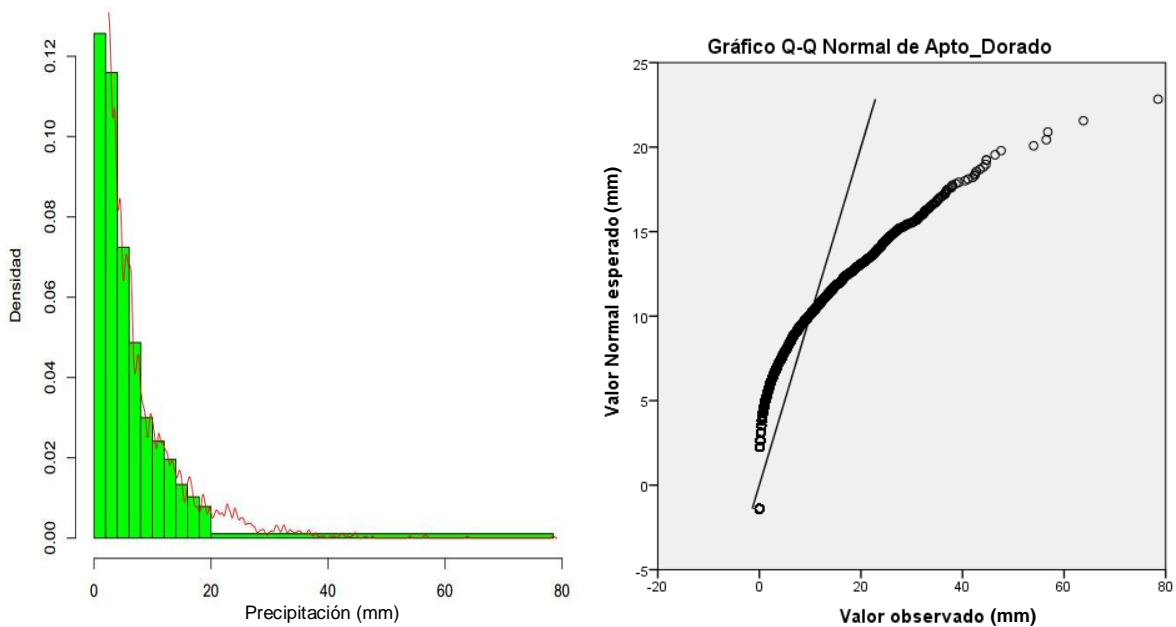
Figura No. 4-3. Ejemplo Serie Histórica de Precipitación en la Estación Aeropuerto El Dorado. En rojo se presentan los datos faltantes dentro de la serie que corresponden al 5% de los datos para el período 1980-2012. (prcp=precipitación)

## 4.2. Resultados Caracterización y Clasificación de los Eventos de Precipitación

Tal como se mencionó anteriormente, a partir de las series de precipitación diaria depuradas, se procedió a calcular la función empírica de excesos medio, para poder determinar el umbral de estudio, como insumo para definir los rangos de precipitación. Es importante mencionar que para el cálculo de los índices no se tuvieron en cuenta los años para los cuales faltaban más del 30% de los datos.

### 4.2.1 Definición de los Umbrales de Estudio

Es importante tener en cuenta que para calcular la función empírica de excesos medios, se deben descartar todos los valores de precipitación con magnitud inferior a 1 mm, el cual es un valor recomendado por la literatura (T. C. Peterson, 2005) y utilizado en múltiples estudios (Boccolari & Malmusi, 2013; W. Liu et al., 2013; Päädam & Post, 2011; Zhao et al., 2014) . A partir de la serie de datos de precipitación se construyó el histograma de densidades y el gráfico Q-Q para las precipitaciones mayores a este valor. En la Figura No. 4-4, se presenta un ejemplo de los histogramas construidos.



**Figura No. 4-4. Izquierda: Histograma de Densidades. Derecha: Gráfico Q-Q. Ejemplo Estación Aeropuerto El Dorado para precipitaciones mayores a 1 mm**

A partir de los resultados mostrados en la Figura No. 4-4 es posible afirmar que la serie de datos histórica de precipitaciones, tal como se esperaba, no se ajusta muy bien a la distribución normal. Adicionalmente, se observa que la mayor densidad de los datos se encuentra para precipitaciones por debajo de 20 mm, por lo cual se podría afirmar que a partir de este rango las precipitaciones se pueden catalogar como extremas. Esta tendencia en la densidad de las precipitaciones se repite en todas las estaciones. En el Anexo E se presentan los histogramas y Gráficas QQ para todas las estaciones analizadas.

En la Figura No. 4-5 se puede observar la función de excesos medios, con su típica forma ascendente, a partir de la cual se puede determinar el umbral de precipitación extrema máxima. Este valor se lee en la abscisa, en el punto en donde la función empieza a crecer de forma brusca. Este punto corresponde aproximadamente al valor de 44.6 mm.

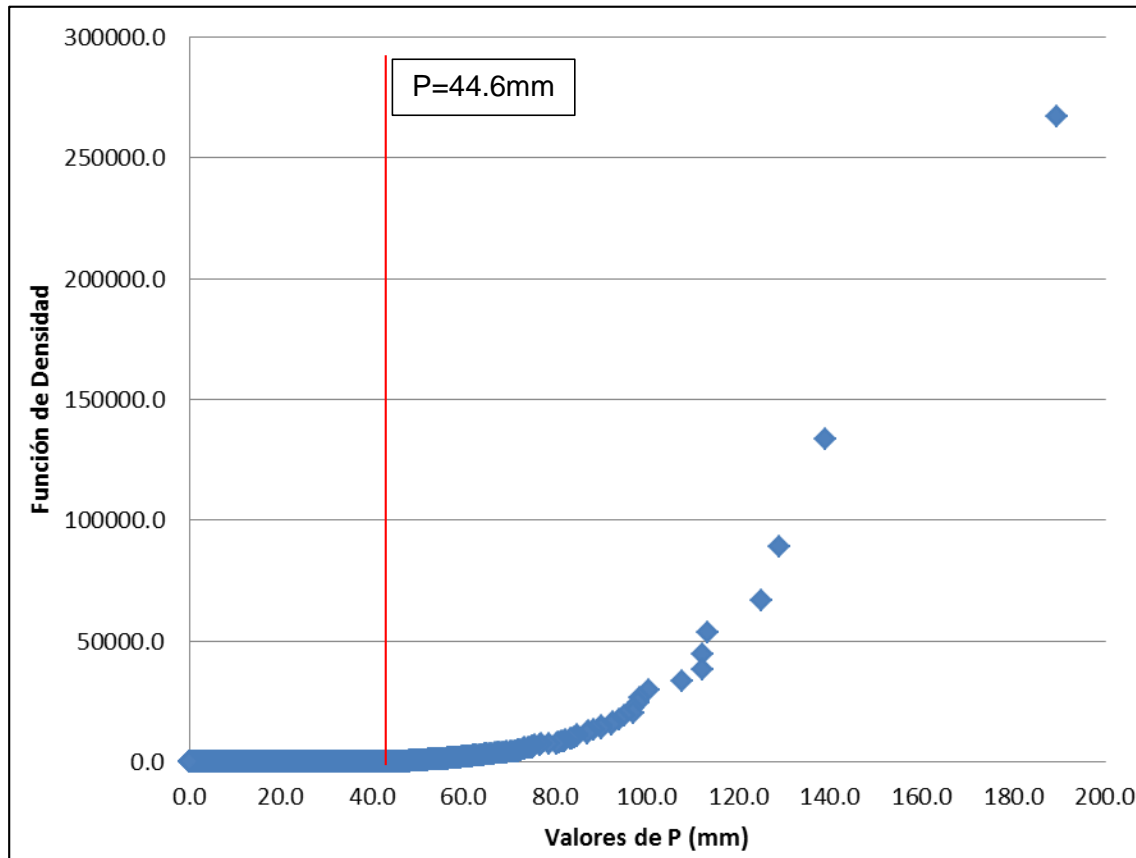


Figura No. 4-5. Función Empírica de Excesos Medios.

Por otro lado, y de acuerdo con el concepto de agua precipitable y el método descrito en el Capítulo 3.4, se buscó calcular este valor. De acuerdo con la Figura No. 4-6 y partiendo de la temperatura máxima en la ciudad es del orden de 25°C, con una presión atmosférica de 751.6 milibares, se encontró que el agua precipitable es igual a 44.45 mm.

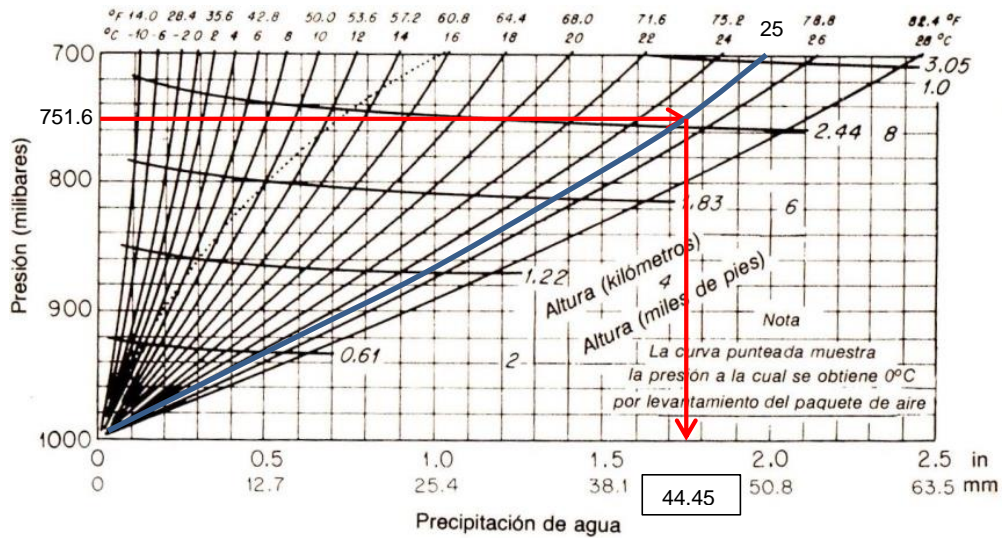


Figura No. 4-6. Agua Precipitable en la Ciudad de Bogotá.

El valor de umbral obtenido por medio de la función de excesos medios es igual a 44.6 mm, mientras que el valor encontrado por el concepto de agua precipitable es de 44.45 mm, valores casi idénticos. De acuerdo con lo observado en los histogramas de densidades de precipitaciones, en donde el umbral se encontraba alrededor de 20 mm, se consideró importante tener en cuenta las precipitaciones mayores a 30 mm y a 40 mm, ya que el valor de 44.6 mm, es un valor muy alto de precipitación sobre la ciudad de Bogotá, que llevaría a descartar muchos eventos con magnitudes importantes, que podrían considerarse como extremas.

Algunos estudios similares realizados en otras parte del mundo, por ejemplo Estados Unidos, en el trabajo realizado por (Groisman et al., 2011), en la parte central de este país, asumieron las precipitaciones con intensidades entre 12.7 mm/día (0.5”) y 25.4 mm/día (1”) como moderadamente intensas, entre 25.4 mm/día (1”) y 76.2 mm como intensas, y por encima de 76.2 mm/día como muy intensas. Estos umbrales para Bogotá, se consideran muy elevados, ya que las magnitudes de las precipitaciones diarias sobre la ciudad, como se vio atrás, casi nunca rebasan los 60 mm.

Por otro lado, en Argentina (Scian & Pierini, 2013), se estudió el comportamiento de las precipitaciones diarias extremas, y se encontraron umbrales con rangos de 50, 100 y 150 mm/día, también muy altos en comparación con el caso de Bogotá. Las diferencias

encontradas entre las precipitaciones en latitudes muy altas y muy bajas, pueden explicarse en el sentido que, la precipitaciones en latitudes altas en ambos hemisferios en general se presentan en cortos periodos de tiempo, mientras que en las latitudes cercanas al ecuador, si bien, también tenemos un comportamiento bimodal (como es el caso de Bogotá) y no es tan marcado como son las estaciones, las lluvias en general, ocurren durante todo el año con magnitudes más bajas que en latitudes altas, esto se debe a que en estas latitudes altas, la precipitación que se presenta por lo general es de tipo convectiva, que generan grandes intensidades en las precipitaciones, que por lo general se presentan en la temporada de verano, cuando se presenta una temporada estival muy cálida, húmeda y con intensas precipitaciones (Monsalve, G., 1995; Ray K. Lensley, Jr. et al., 1997)

Por otra parte, en el estudio realizado en el occidente del Tíbet (Wang et al., 2013), se utilizaron como precipitaciones extremas aquellas superiores a 10 mm/día. Esto se puede entender, teniendo en cuenta que la precipitación depende de la altura (Allamano et al., 2015; Ding et al., 2014; W. Liu et al., 2013), y que la altura a la cual se encuentra el área de estudio se encuentra por encima de los 3000 msnm, por consiguiente se espera que las precipitaciones en esta región sean con intensidades bajas.

Teniendo en cuenta lo anterior se clasificaron las tormentas en la ciudad de Bogotá en seis (6) categorías, las cuales se presenta en la Tabla No. 4-2:

El presente estudio se centró en los eventos de precipitación con magnitudes mayores a 10 mm, las cuales son las tormentas extremas. Estás a su vez están subdivididas de acuerdo a la Tabla No. 4-2.

Tabla No. 4-2. Clasificación de las Tormentas en la Ciudad de Bogotá

<b>RANGO (mm)</b>	<b>CLASIFICACIÓN</b>
1 - 10	Normales
10 - 20	Moderadamente Fuertes
20 - 30	Fuertes
30 - 40	Muy Fuertes
40 - 44.6	Moderadamente Extremas
> 44.6	Extremas

#### 4.2.2 Análisis de los índices de Precipitaciones

Como ya se mencionó, los trece (13) índices seleccionados se obtuvieron mediante la aplicación del software RClimDex V1.

El resumen de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla No. 4-3, los cuales van a ser analizados y descrito con detalle un poco más adelante. La Tabla contiene para cada uno de los índices, la tendencia regional, el rango (valores máximos y mínimos de la tendencia), porcentaje de estaciones con tendencia negativa, y porcentaje e estaciones con tendencia positiva, y finalmente, el valore de  $R^2$ , de los ajuste lineales que se realizaron para cada una de los índices.

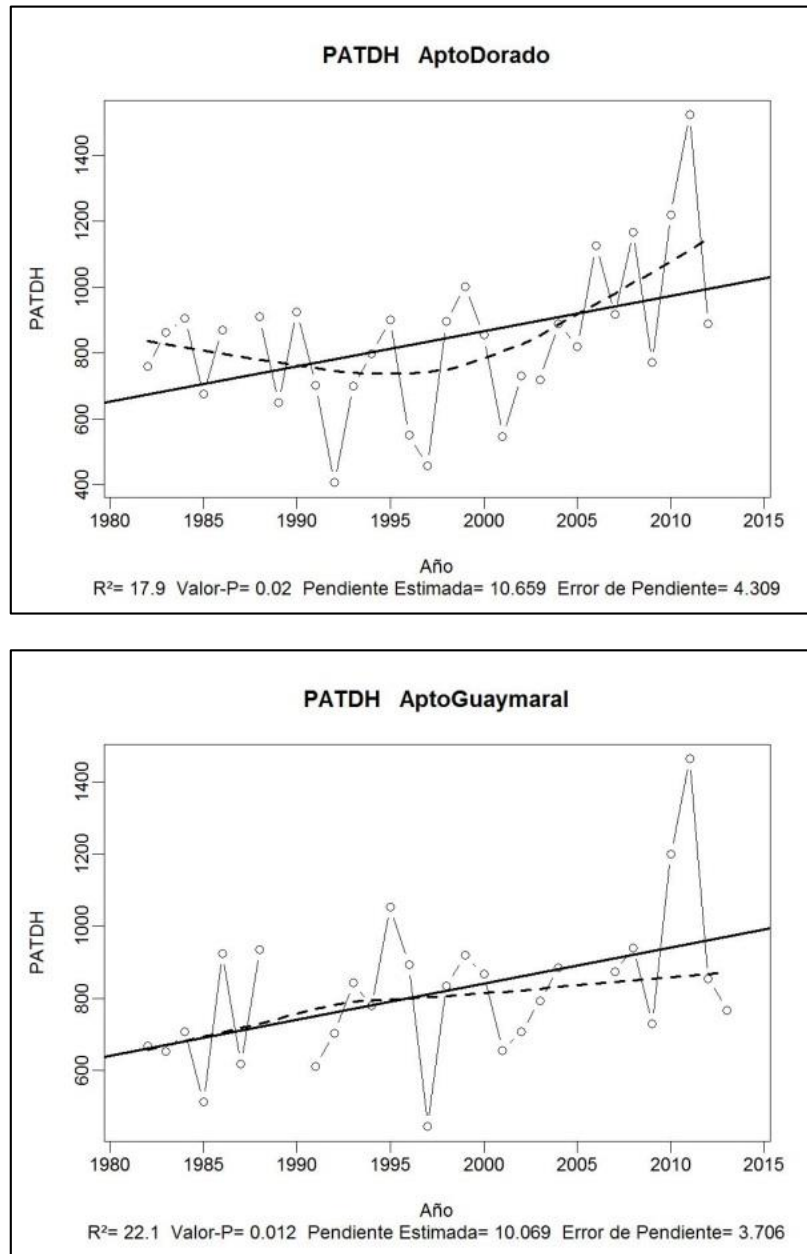
Es importante aclarar que sí bien se analizaron todos los 13 índices de precipitación extrema, propuestos por la Junta CCI/CLIVAR/ CMOMM ETCCDI, dentro del estudio, se consideraron los índices DMH, DEH, NSPI, NSPMM (30), NSPMM (40) y NSPMM (44.6) como los principales, ya que estos índices son los que están más relacionado con precipitaciones por encima de lo normal, con magnitudes significativas, de acuerdo a lo observado dentro las series de tiempo de las estaciones, y por ende con tormentas extremas.

**Tabla No. 4-3. Resultados de Ajuste Lineal Análisis de Tendencias**

Índice	Tendencia Regional	Rango		Porcentaje de Estaciones con Tendencia Negativa	Porcentaje de Estaciones con Tendencia Positiva	R <sup>2</sup>
PATDH	13.167	5.195	22.003	0.00	100.0	29.7
DS	0.043	-0.310	0.739	52.38	47.6	5.3
DHC	0.054	-0.061	0.179	10	90.5	4.6
MMPD	0.369	-0.156	1.096	23.81	76.2	12.8
MMP5D	0.783	-0.121	1.447	4.76	95.2	14.9
DMH	6.101	1.876	12.633	0.00	100.0	24.9
DEH	2.568	0.632	5.732	0.00	100.0	14.7
NSPI	0.518	0.221	0.972	0.00	100.0	28.3
NSPMI	0.234	0.061	0.391	0.00	100.0	25.5
NSMM (30)	0.107	0.021	0.260	0.00	100.0	20.9
NSMM (40)	0.051	-0.002	0.160	4.76	95.2	13.4
NSMM (44.6)	0.037	-0.003	0.110	14.29	85.7	12.9
ISI	0.062	0.035	0.125	0.00	100.0	33.9

El primer índice es **Precipitación anual total en los días húmedos** ( $RR \geq 1\text{mm}$ ) (PATDH). En la Figura No. 4-7, se presentan dos ejemplos de los resultados gráficos de este análisis y la tendencia de los resultados obtenidos. Se puede observar que para las dos estaciones mostradas, y en general para todas las estaciones objeto de análisis (ver Anexo F), este índice presenta una fuerte tendencia positiva, en los últimos 30 años, en el aumento en la precipitación anual en días húmedos. En la Tabla No. 4-3 se observan los resultados obtenidos del ajuste lineal de tendencias realizadas para este y todos los índices calculados en todas las estaciones. Así mismo, en la Tabla No. 4-3 se muestra que la tendencia regional para el parámetro PATDH es 13.167, que corresponde a una pendiente positiva, con rangos entre 5.195 y 22.003.





**Figura No. 4-7. Ejemplo de los resultados para el índice PATDH.**  
 (La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)

En la Figura No. 4-8, se puede observar que los valores más altos de precipitación total en días húmedos se presentan en los cerros orientales y hacia el norte, mientras que los valores más bajos, se encuentran hacia el occidente y sur occidente de la ciudad. Asimismo, en la Figura No. 4-9 se observa la tendencia promedio del índice, en donde se observa que hacia el centro y norte de la ciudad se presentan un comportamiento de la tendencia hacia el crecimiento, más pronunciado del orden de 16 a 22 mm al año.

Adicionalmente en la Figura No. 4-10 se encuentran los coeficientes de variación para este índice, y de acuerdo con diferentes autores (Bautista S., 1998; DANE, 2008; Särndal, Carl Erik, Swenson, B., & Wretman, J., 1992), el coeficiente de variación para una muestra se considera 0% y 7%: precisa; 7% y 14%: la precisión es aceptable; 14% y 20%: precisión es regular; y mayores del 20% es poca precisa y por lo tanto se recomienda solo para fines descriptivos. Por lo tanto se puede concluir que en la mayoría de la estaciones se muestra una tendencia de crecimiento, y sin embargo, no tiene muy buena precisión.

Por otro lado, se aclara que el método empleado para generar los mapas, fue el método del inverso de la distancia, en el cual se asigna un peso a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa. Este método se trata principalmente de una meda ponderada, por lo que el resultado se encuentra siempre dentro de la variación de los datos. (Oliver, M.A. & Webster, R, 1990)

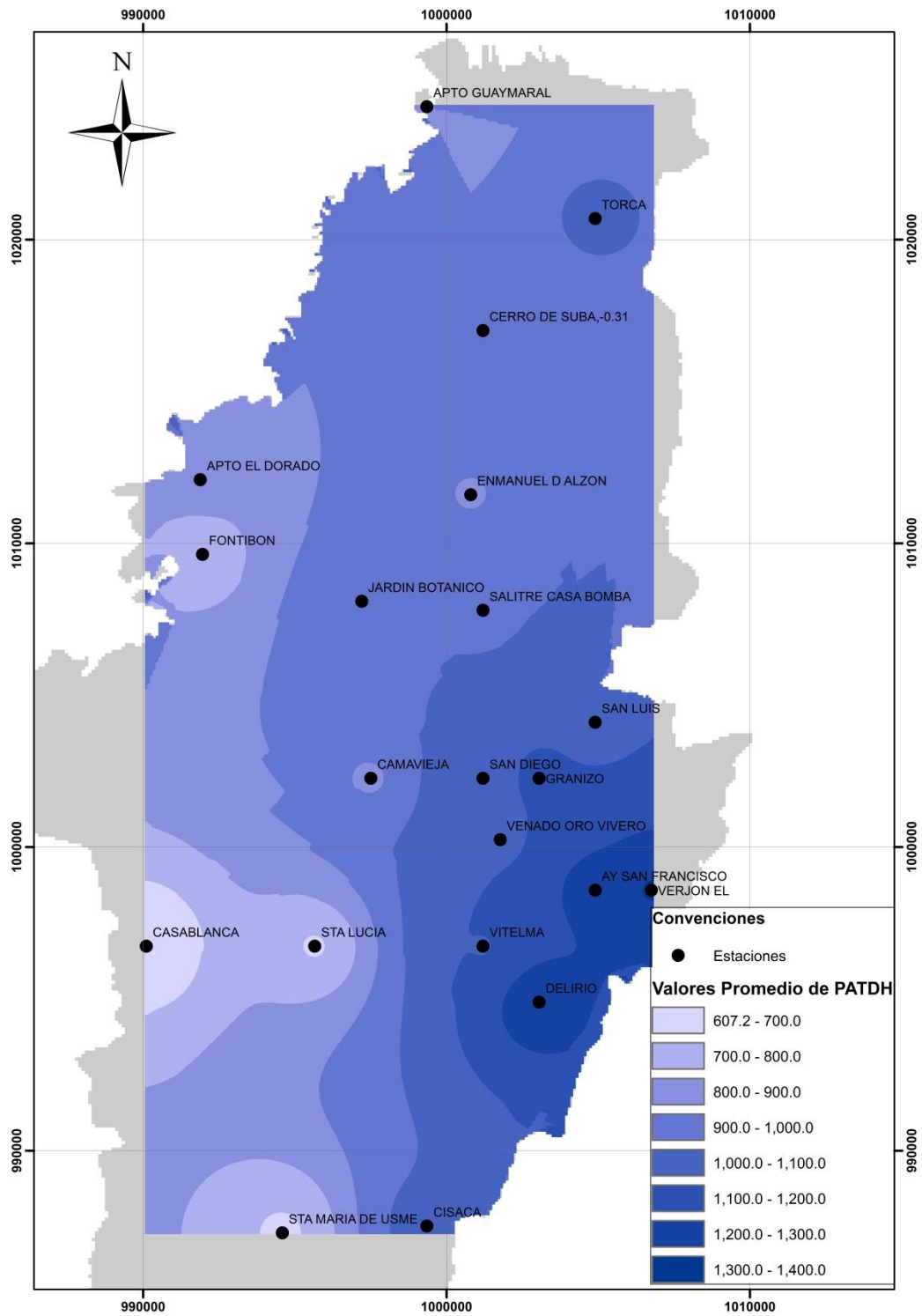


Figura No. 4-8. Distribución Espacial Promedio del Índice PATDH.

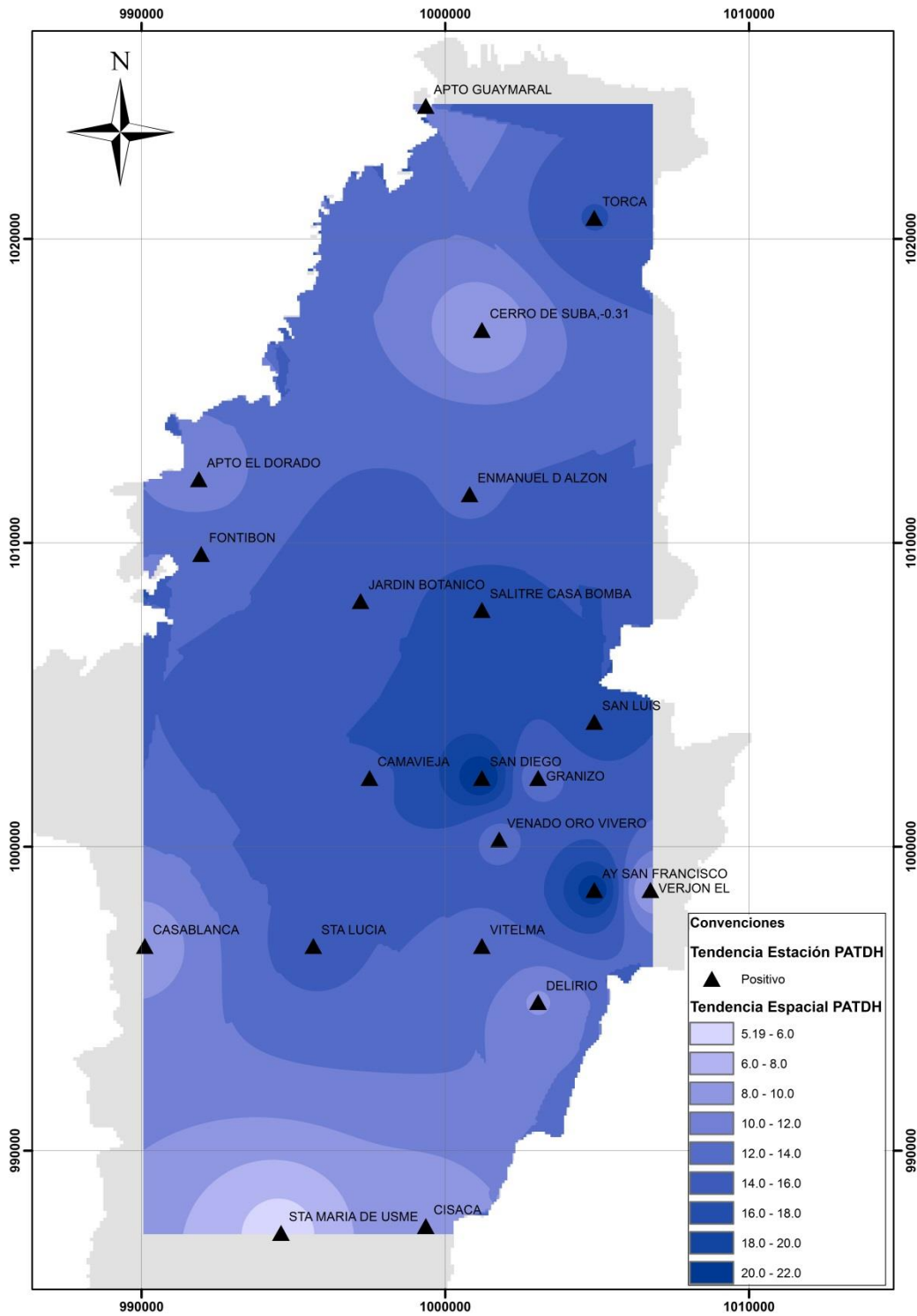


Figura No. 4-9. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice PATDH.

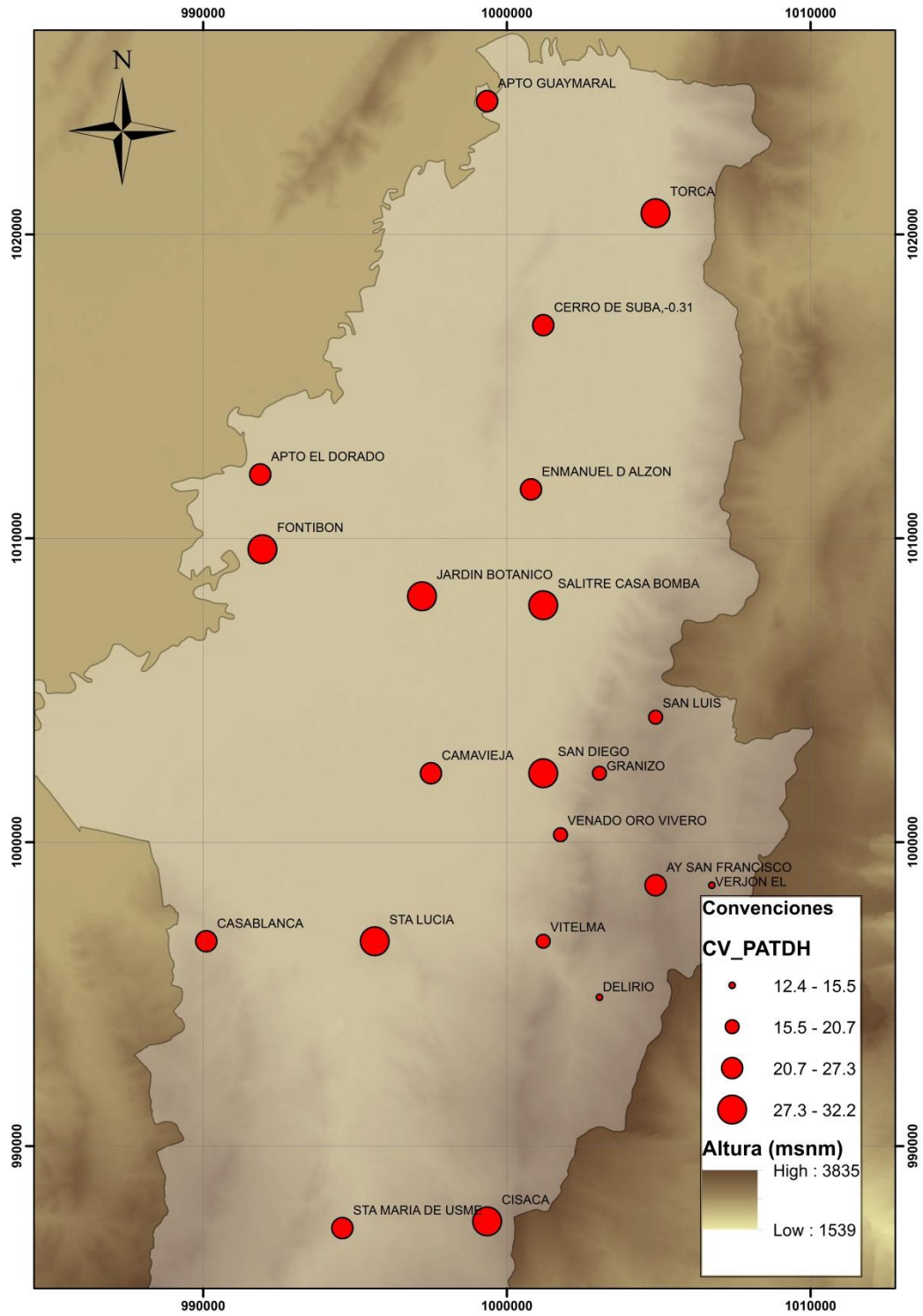
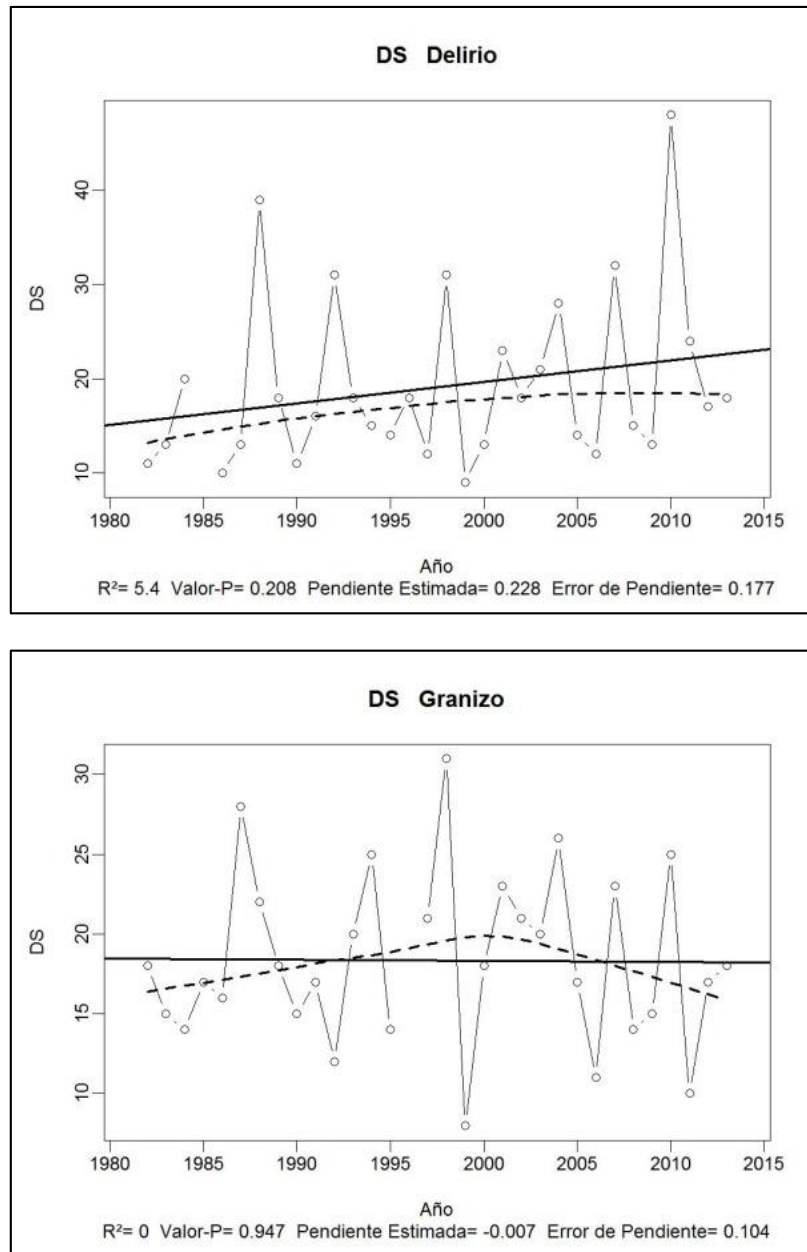


Figura No. 4-10. Variación Coeficiente de Variación para el Índice PATDH. (Valores en porcentaje)

El segundo índice corresponde al **número máximo de días consecutivos con precipitación menor a 1 mm (DS)**. Para este índice se puede observar una tendencia regional mixta (positiva y negativa) en el número de días consecutivos secos. Para el 52% de las estaciones estudiadas se presenta una tendencia negativa, con un valor de decrecimiento del orden de 0.310, mientras que para el 48% restante de las estaciones se presenta una tendencia positiva con un valor de crecimiento del orden de 0.739. En la Figura No. 4-11, se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos del estudio sobre el índice DS, en las estaciones Delirio y Granizo.

En la Figura No. 4-12 se puede ver que las estaciones ubicadas en el norte (con 21 a 22 días secos al año) y en el sur occidente (con 21 a 24 días secos al año) presentan en promedio un gran número de días secos al año, mientras que las estaciones ubicadas hacia el costado oriental (en los cerros) presentan en promedio la menor cantidad de días secos al año (con 17 días al año). Por otro lado, en la Figura No. 4-13 y teniendo en cuenta que la tendencia encontrada para este índice es mixta, se encontró que las estaciones que presentan tendencia negativa (disminución en el número de días secos), son aquellas ubicadas, en su mayoría, en la parte plana de la ciudad, con una tendencia en promedio igual a -0.144 días/año, mientras que las estaciones con tendencia positiva (aumento en el número de días secos), en su mayoría están ubicadas en los cerros, la tendencia fue de 0.250 días/año.



**Figura No. 4-11. Ejemplo de los resultados para el índice DS.**  
 (La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)

En la Figura No. 4-14 se presenta el coeficiente de variación para el índice de días secos, encontrando que las series analizadas presentan poca precisión, con datos muy dispersos y la media no es muy confiable, ya que encontramos muchos valores hacia la derecha y a la izquierda de esta.

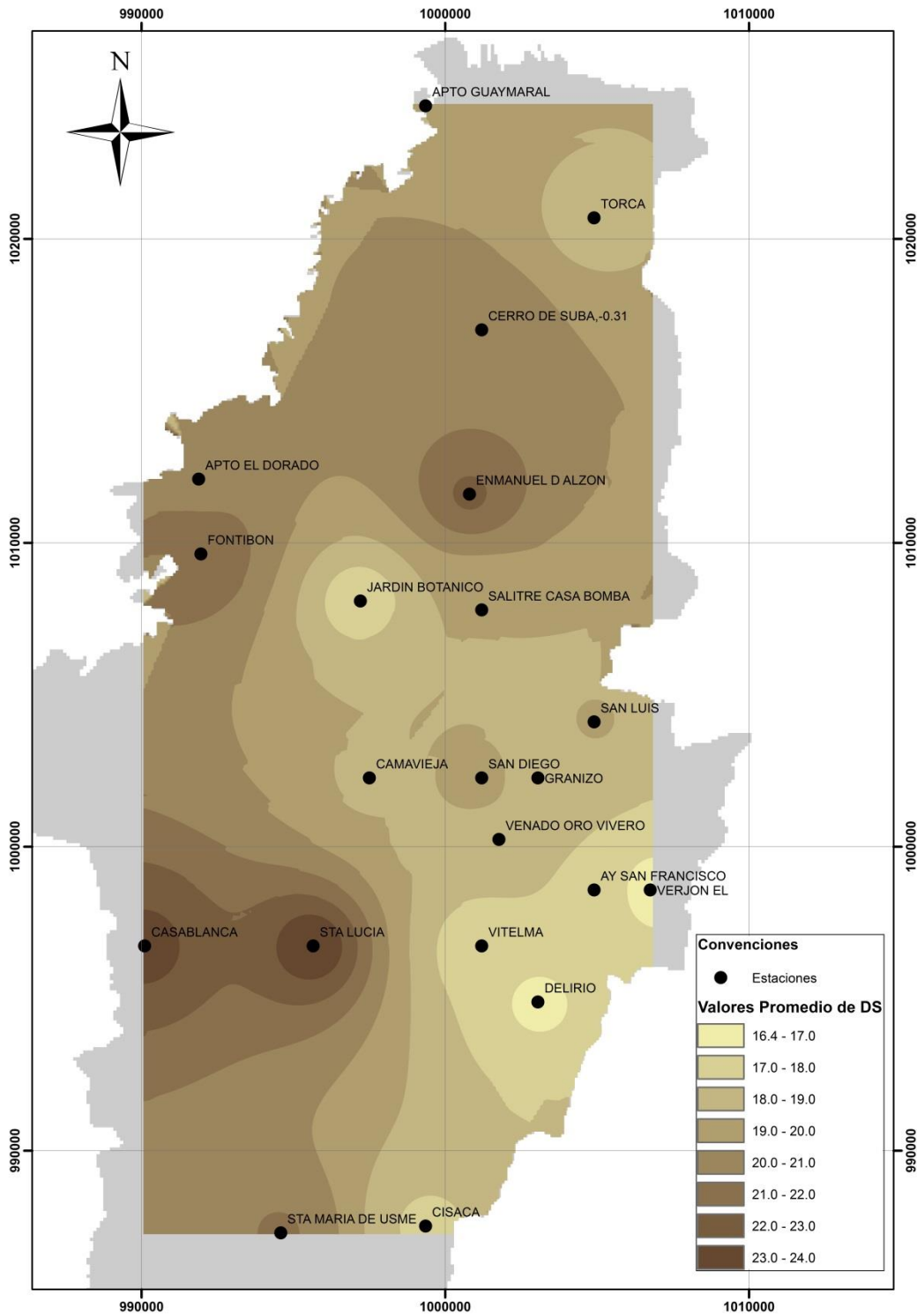


Figura No. 4-12. Distribución Espacial Promedio del Índice DS.



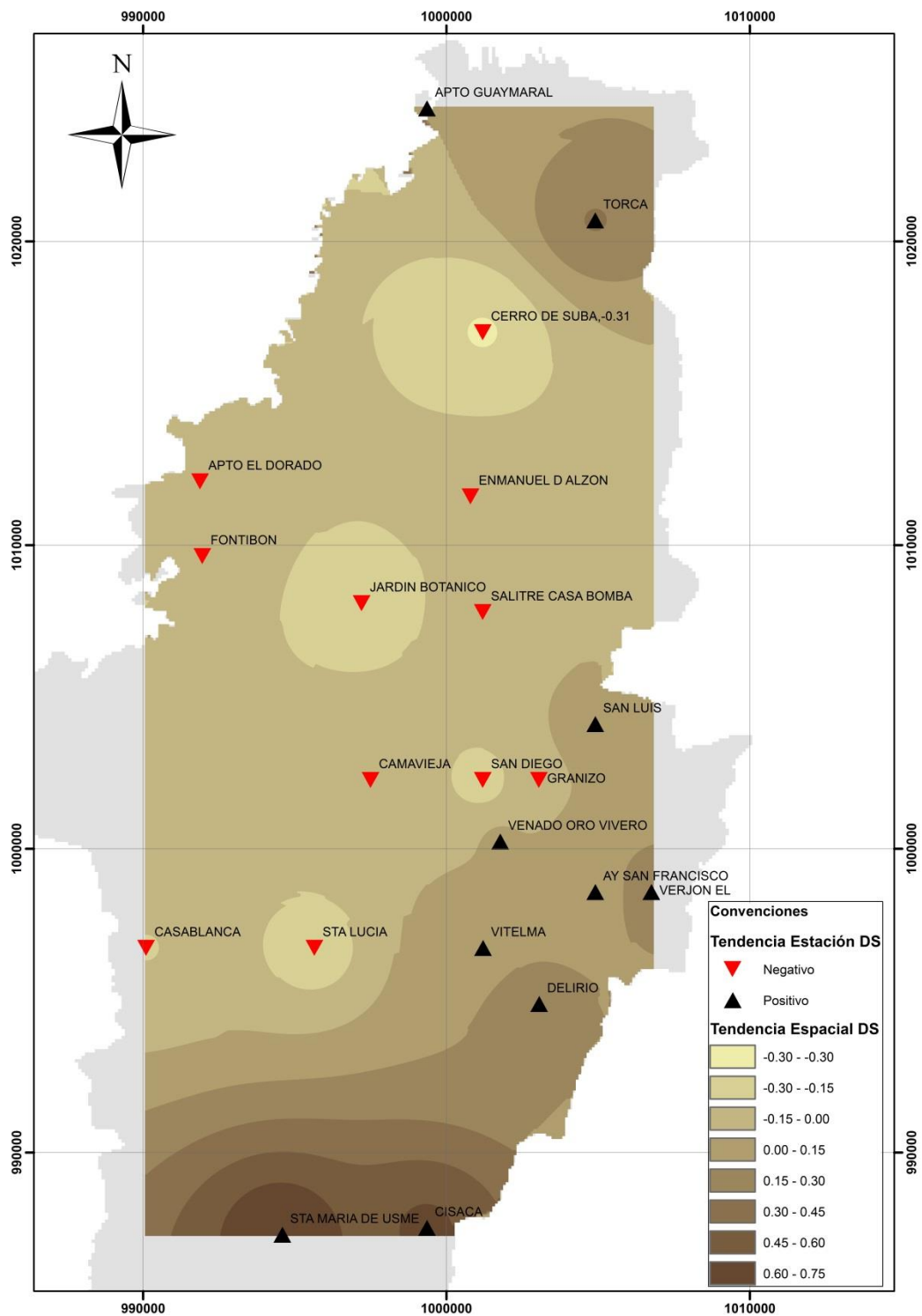


Figura No. 4-13. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice DS

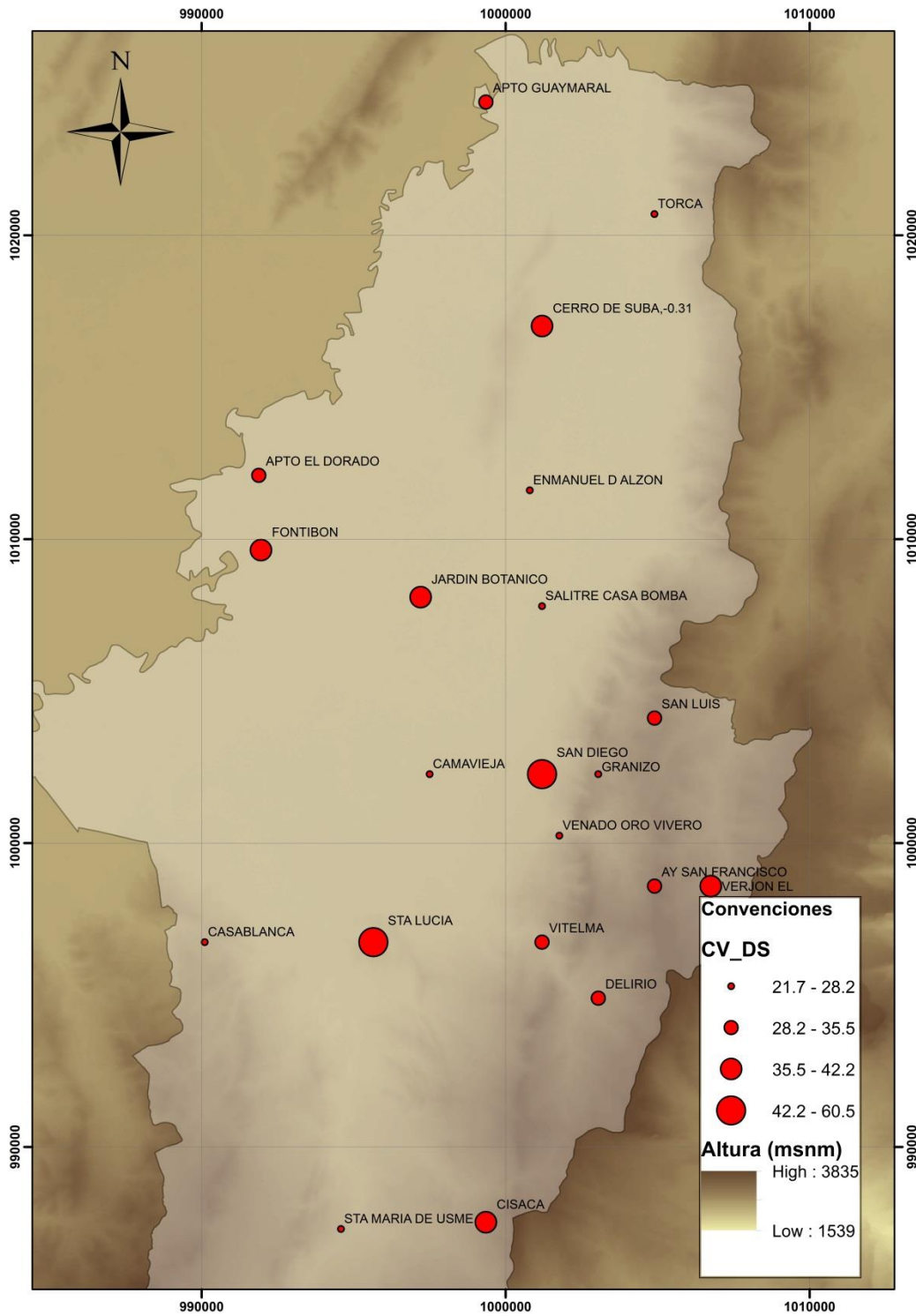


Figura No. 4-14. Variación Coeficiente de Variación para el Índice DS. (Valores en porcentaje)

El tercer índice, corresponde al **número máximo de días consecutivos con precipitación mayor o igual a 1 mm (DHC)**. De acuerdo al ajuste realizado se observa que hay una ligera tendencia positiva en el aumento de los días consecutivos húmedos, con una tendencia regional de 0.054 días/año, con rangos de crecimiento entre -0.061 y 0.179. Adicionalmente, se encontró que solo el 10% de las estaciones presentan una tendencia negativa, contra el 90% de las estaciones que presentan una tendencia positiva. En la Figura No. 4-15, se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos del estudio sobre el índice DHC, en las estaciones San Luis y Santa Lucía, en donde es posible observar en las dos gráficas una tendencia positiva, para la primera estación una tendencia de 0.057 día/año, y para la segunda estación de 0.03 día/año.

En la Figura No. 4-16 se observa que la mayor cantidad de días consecutivos húmedos al año se presenta en los cerros orientales y en el norte; esto coincide con lo observado en los histogramas de precipitación descritos en el capítulo 3, que presentan una distribución de precipitación monomodal, con la mayoría de meses húmedos. Adicionalmente, se observa cómo en la parte plana de la ciudad, hacia el centro y occidente, se presentan menos días húmedos consecutivos, lo cual coincide con el índice DS, que sugiere un comportamiento espacial muy semejante. En la Figura No. 4-18 se presentan los valores del coeficiente de variación del índice en las estaciones, de donde se puede determinar que en estaciones como Camavieja, Salitre Casa Bomba y Torca, se presenta mayor dispersión en este índice, sin embargo, es claro que para este índice todas las estaciones presentan baja precisión. Por otro lado y de acuerdo con la Figura No. 4-17, se puede observar que de las 21 estaciones, solo 2 presentan una tendencia negativa, que son Jardín Botánico y Granizo, las otras 19 estaciones presentan una tendencia positiva. Estas estaciones están ubicadas más o menos hacia el centro de la ciudad, donde se puede observar, de acuerdo a la espacialidad generada, que estas presentan la menor tendencia de crecimiento de este índice.

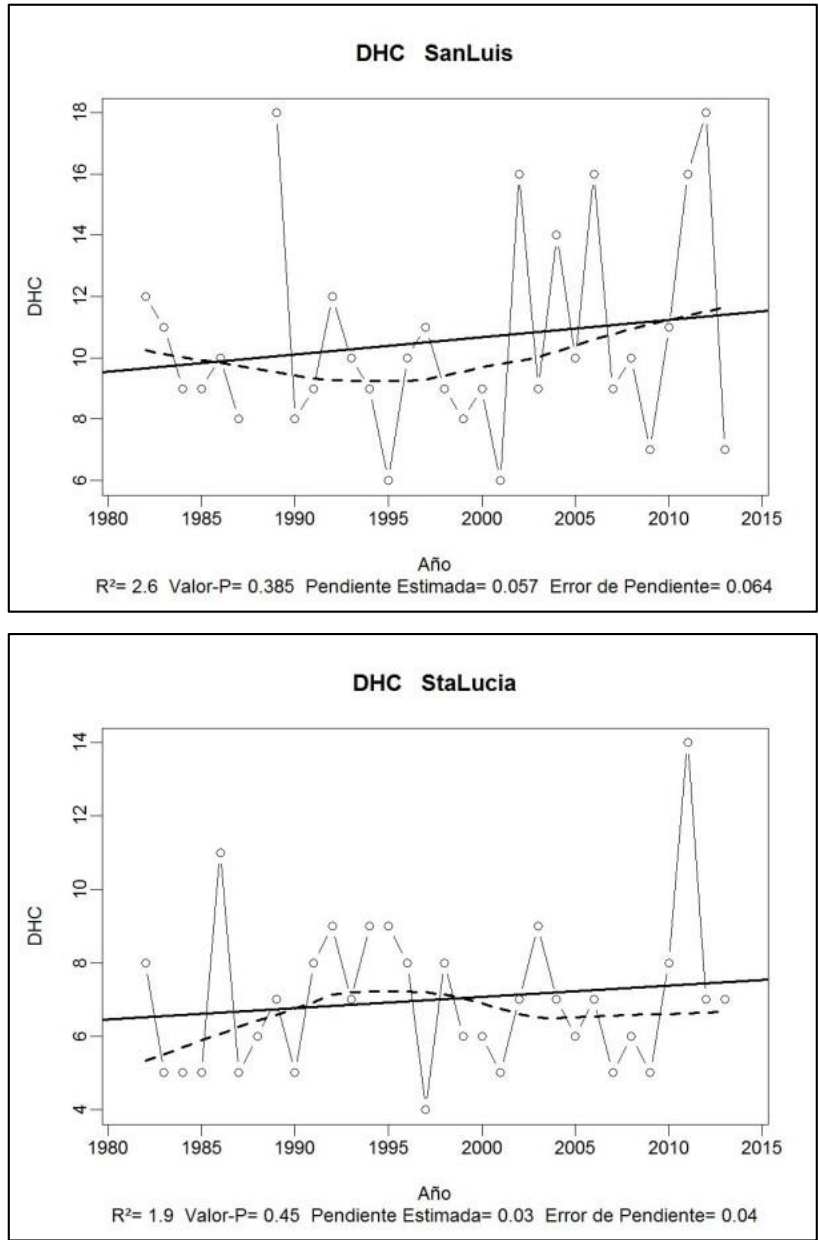


Figura No. 4-15. Ejemplo de los resultados para el índice DHC. (La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)

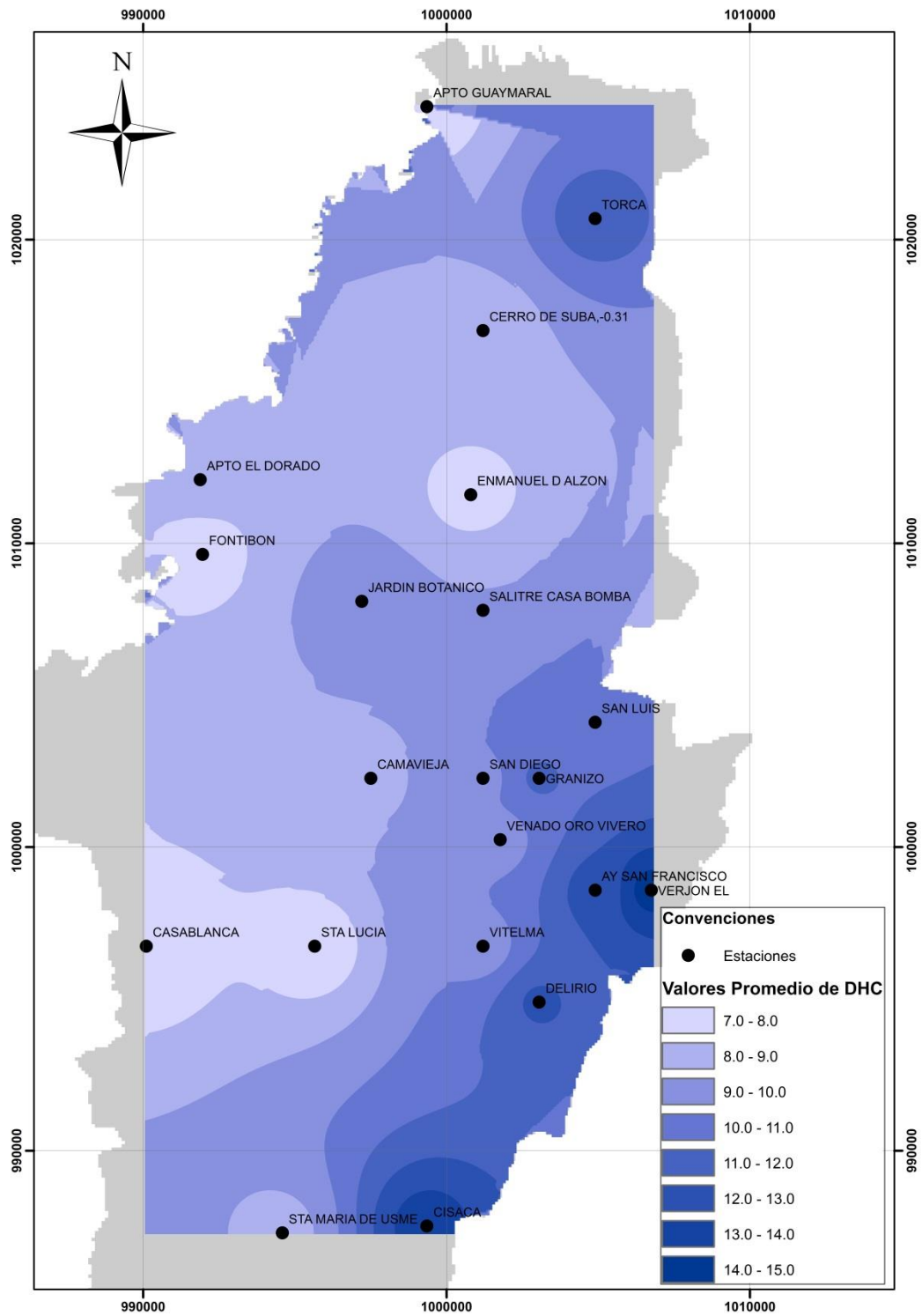


Figura No. 4-16. Distribución Espacial Promedio del Índice DHC.

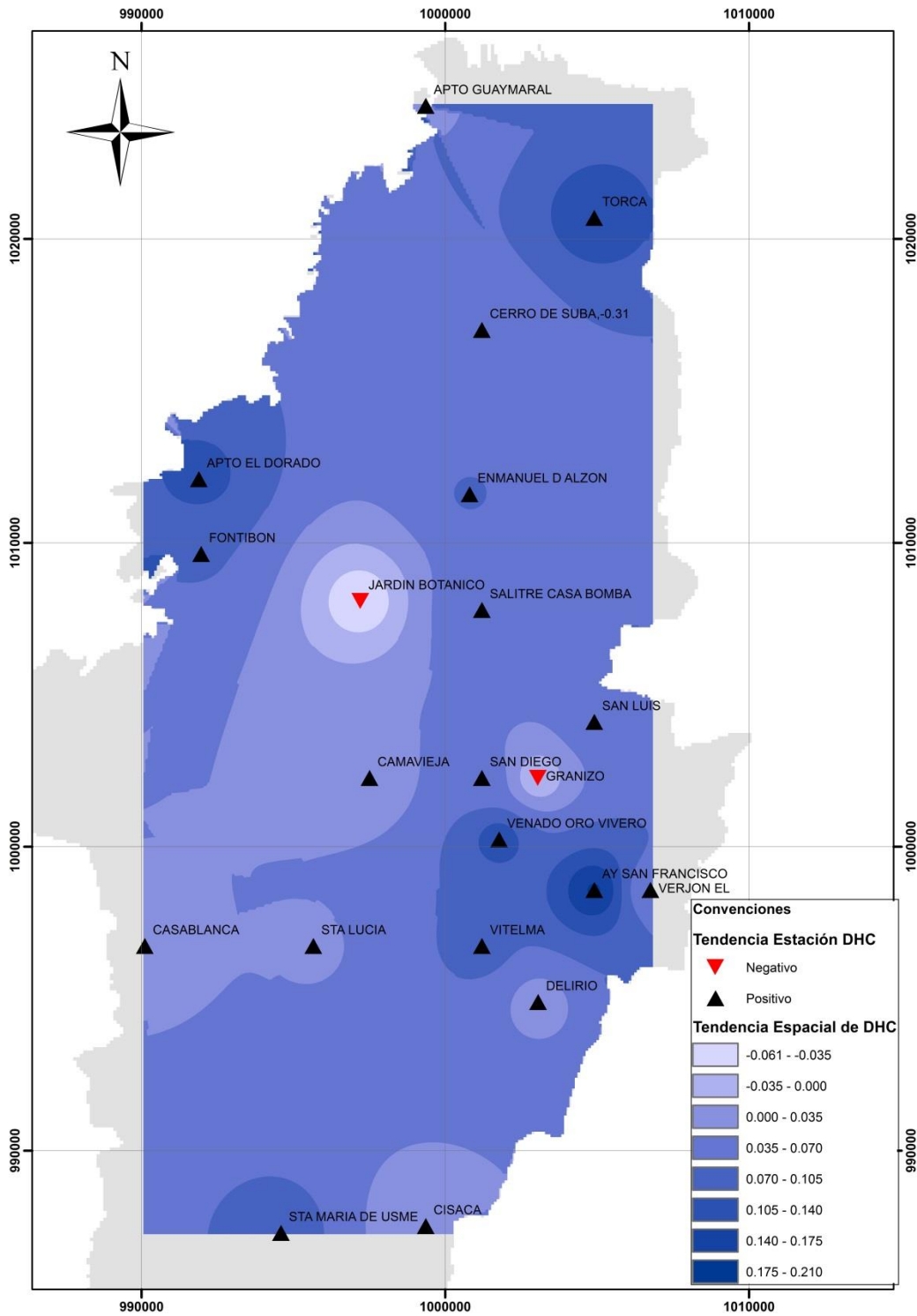


Figura No. 4-17. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice DHC.

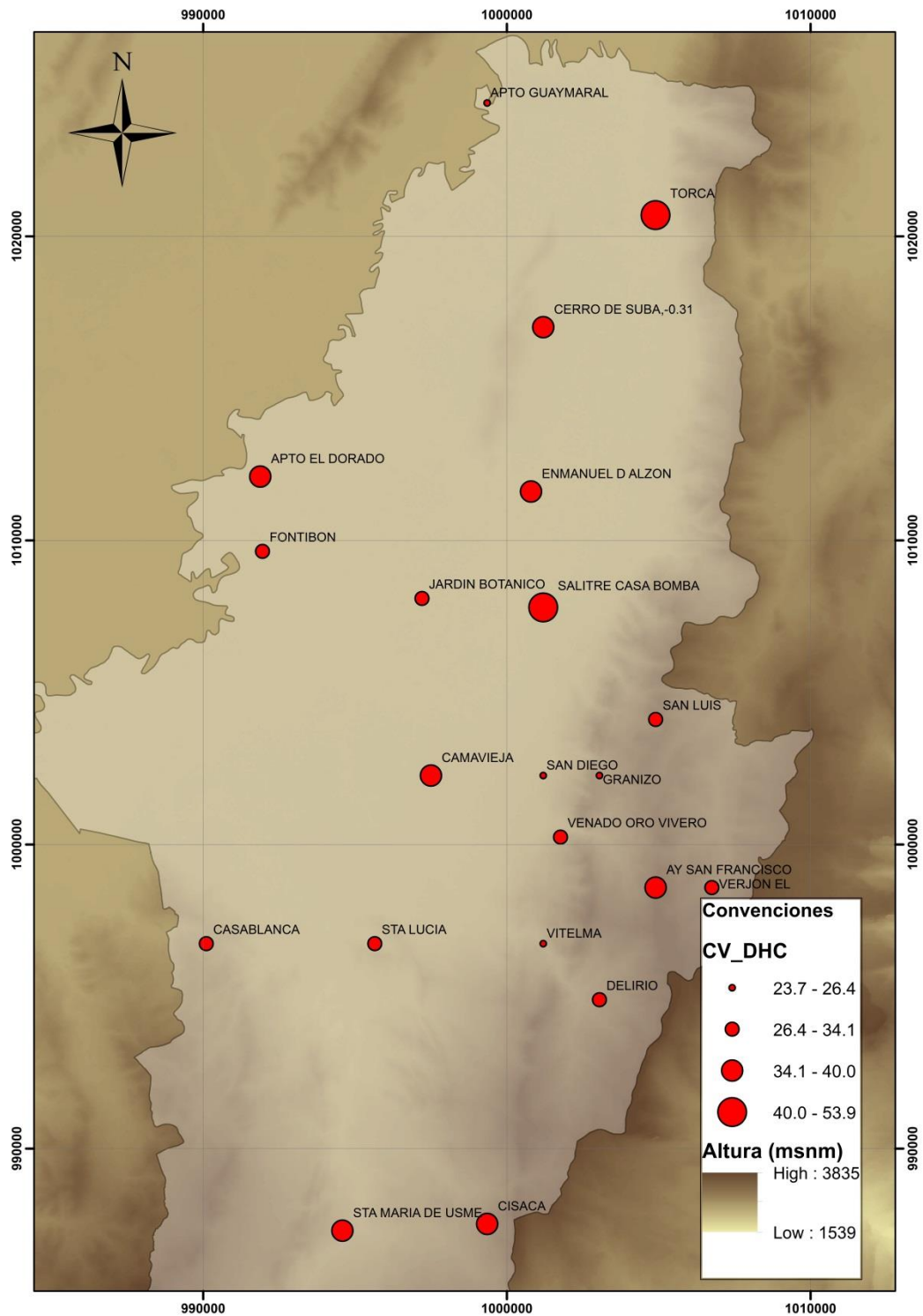
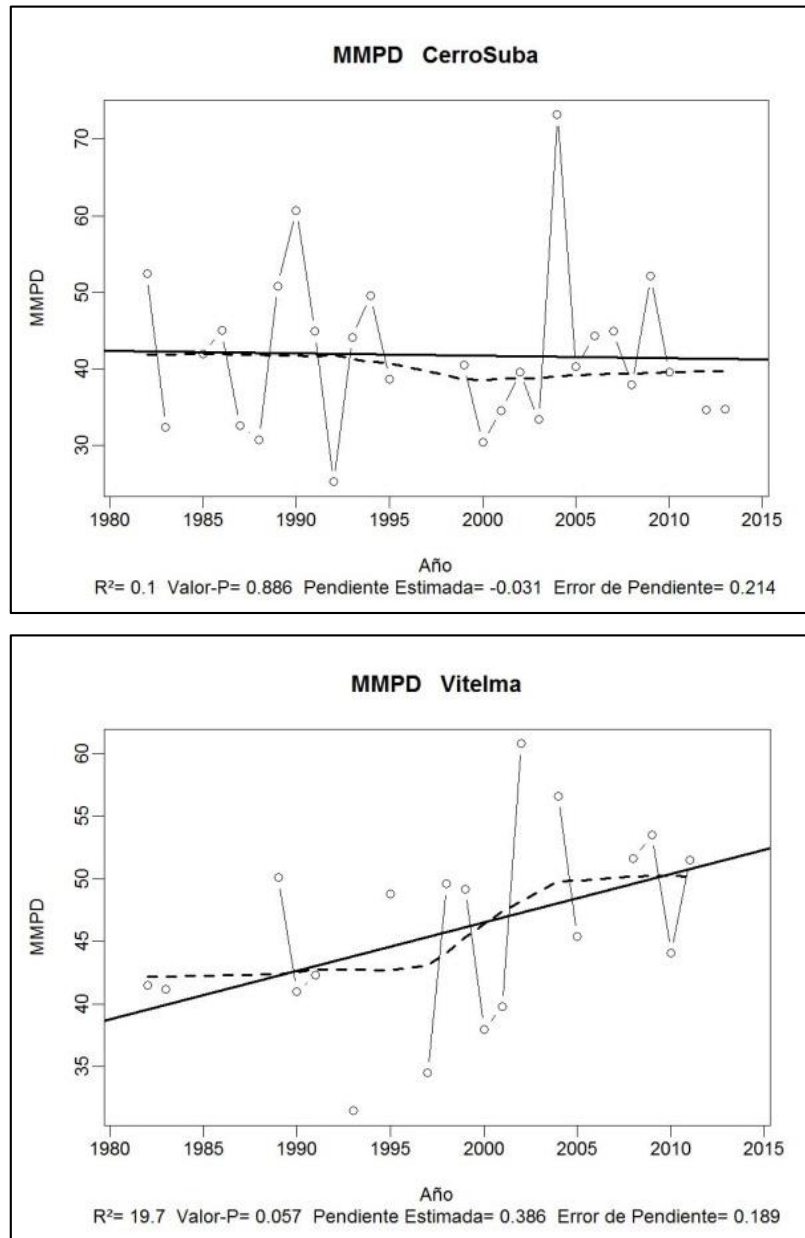


Figura No. 4-18. Variación Coeficiente de Variación para el Índice DHC. (Valores en porcentaje)

El cuarto índice corresponde al **máximo mensual de precipitación en un (1) día (MMPD)**. Este índice indica cómo ha sido el comportamiento a través del tiempo de la precipitación máxima en 24 horas a nivel mensual multianual: De acuerdo con el ajuste realizado (ver Tabla No. 4-3) se observa que, en general, existe una ligera tendencia positiva hacia el aumento de la precipitación máxima en 24 horas, con una tendencia regional de 0.369 mm/año, con rangos de crecimiento entre -0.156 y 1.096. Se observa que solo el 24% de las estaciones presentan una tendencia negativa, contra el 76% de las estaciones que presentan una tendencia positiva. En la Figura No. 4-19, se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos para el índice MMPD, en las estaciones de Cerro de Suba y Vitelma, en donde se puede observar que la estación de Cerro de Suba presenta una tendencia de crecimiento negativo del orden de 0.031 mm/año, mientras que la estación Vitelma presenta una más fuerte tendencia positiva del orden de 0.386 mm/año.

El comportamiento de este índice se puede observar en la Figura No. 4-20. De acuerdo con los datos obtenidos se puede observar que la precipitación máxima diaria mensual en la ciudad se presenta en el oriente, desde el norte hasta el sur, de la ciudad, mientras que en el occidente y sur occidente, estos valores de precipitación son menores. Mientras tanto, en la Figura No. 4-21, se observa que existen cuatro (4) estaciones con tendencia negativa. El comportamiento espacial del índice presenta valores negativos en el nor-occidente de la ciudad y aumenta en sentido sur y oriente de la ciudad, donde se puede observar la mayor tendencia de crecimiento. Adicionalmente, en la Figura No. 4-22 se muestra el mapa del coeficiente de variación de este índice que muestra que las estaciones ubicadas hacia los cerros orientales, presentan mayor dispersión de los datos, también se observa que la precisión arrojada por estas estaciones para este índice es baja, encontrando los valores más altos de dispersión hacia los cerros orientales, que coincide con las estaciones que presentan una tendencia positiva.





**Figura No. 4-19. Ejemplo de los resultados para el índice MMPD.**  
 (La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)

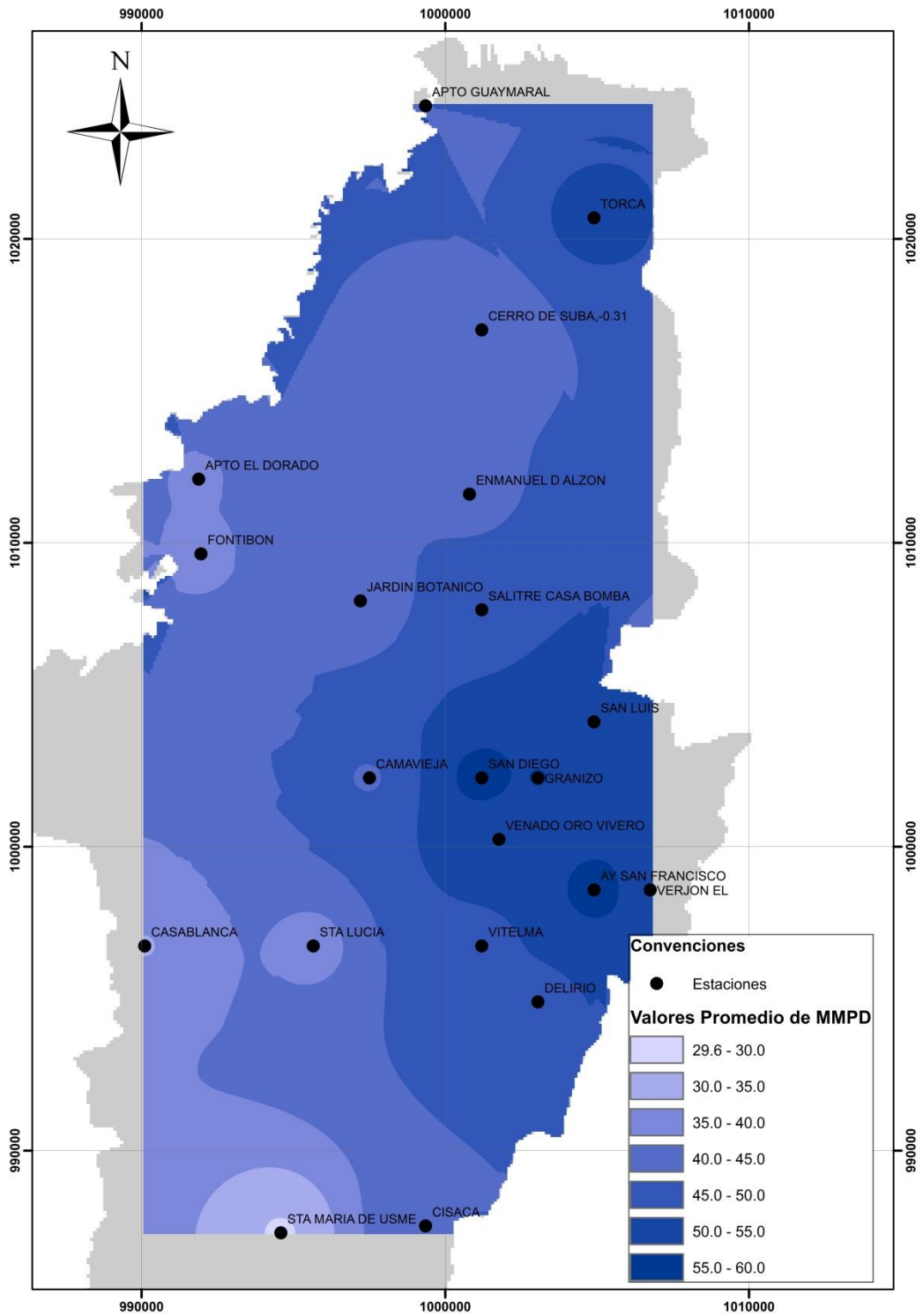


Figura No. 4-20. Distribución Espacial Promedio del Índice MMPD.

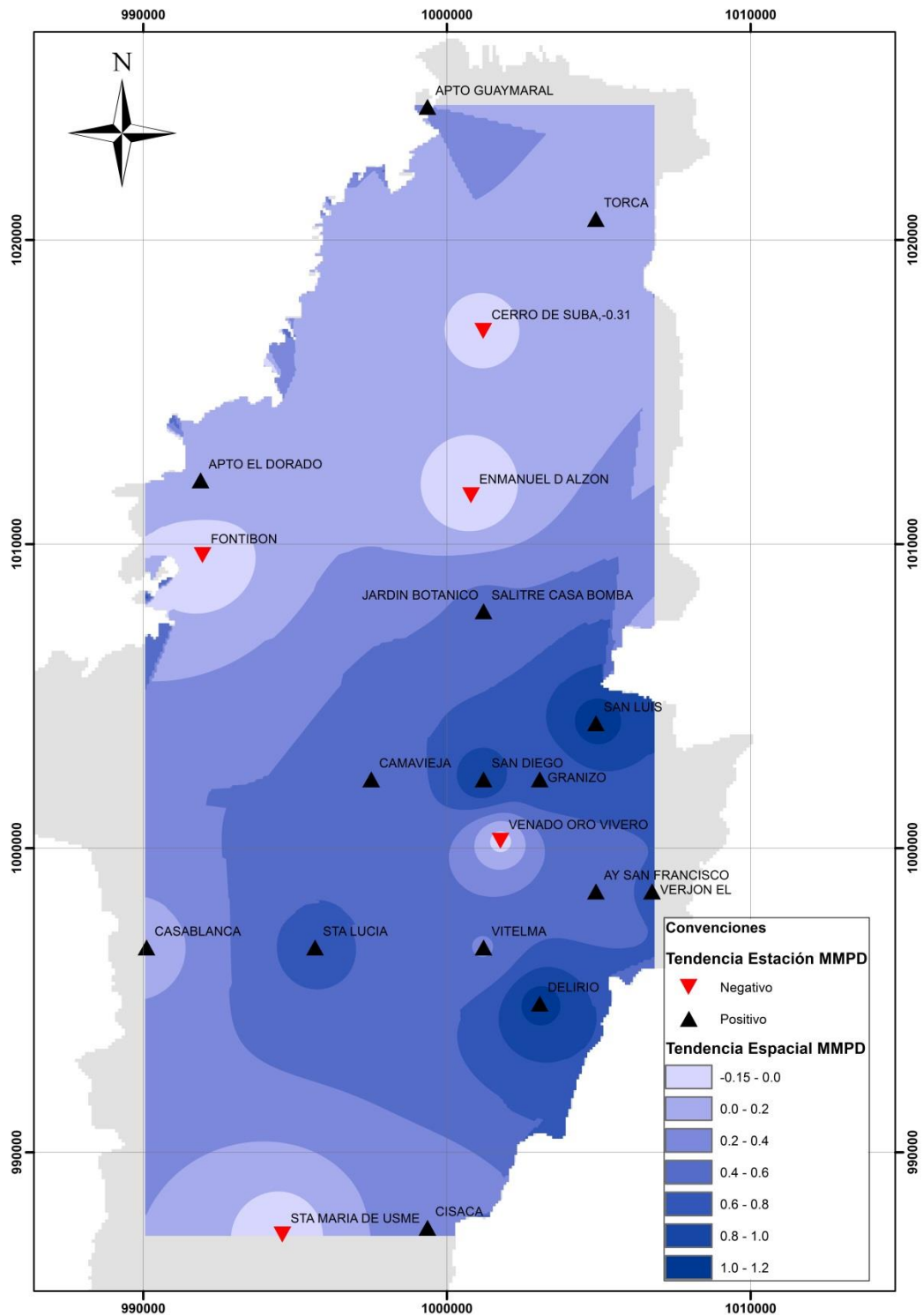


Figura No. 4-21. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice MMPD.

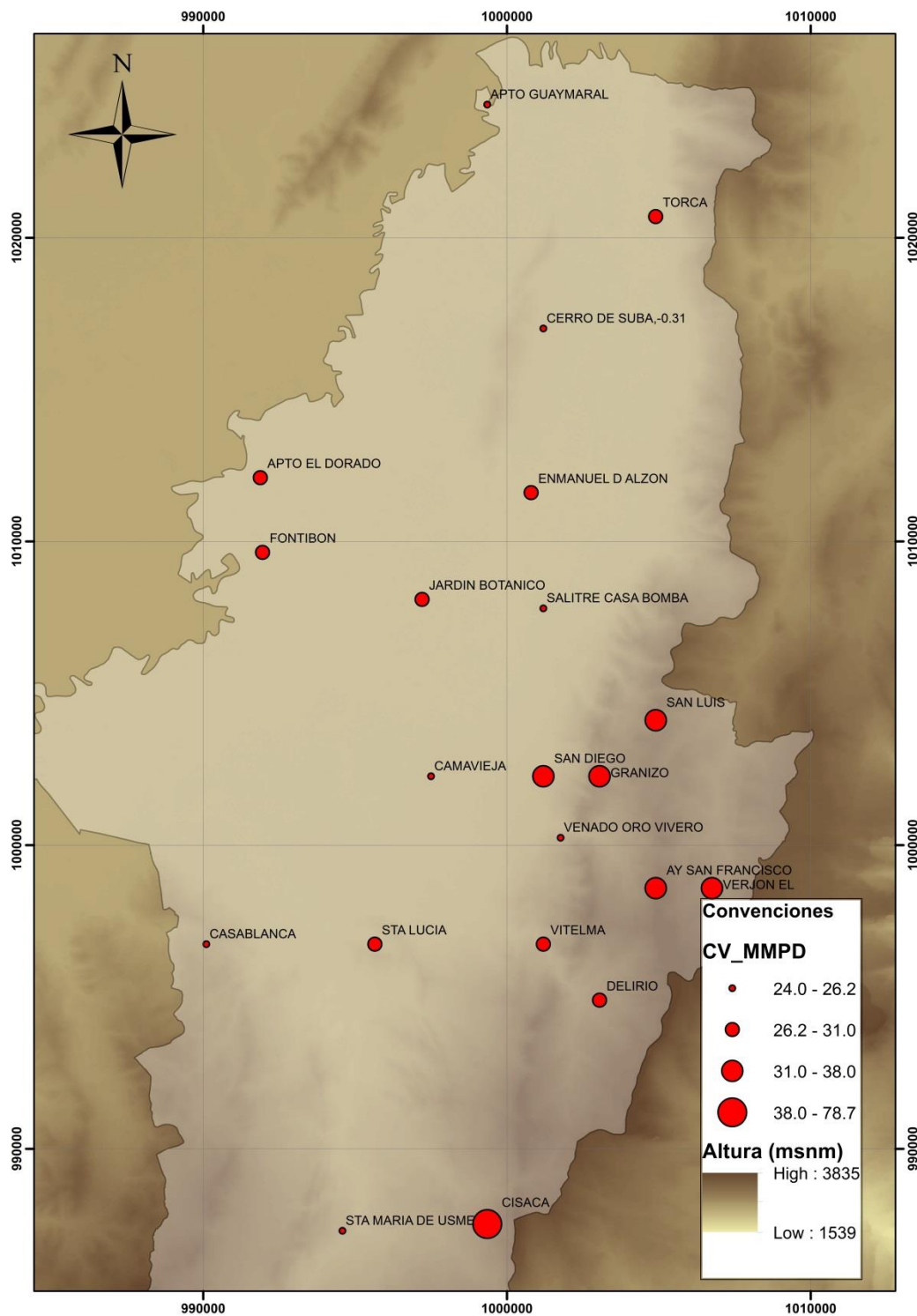
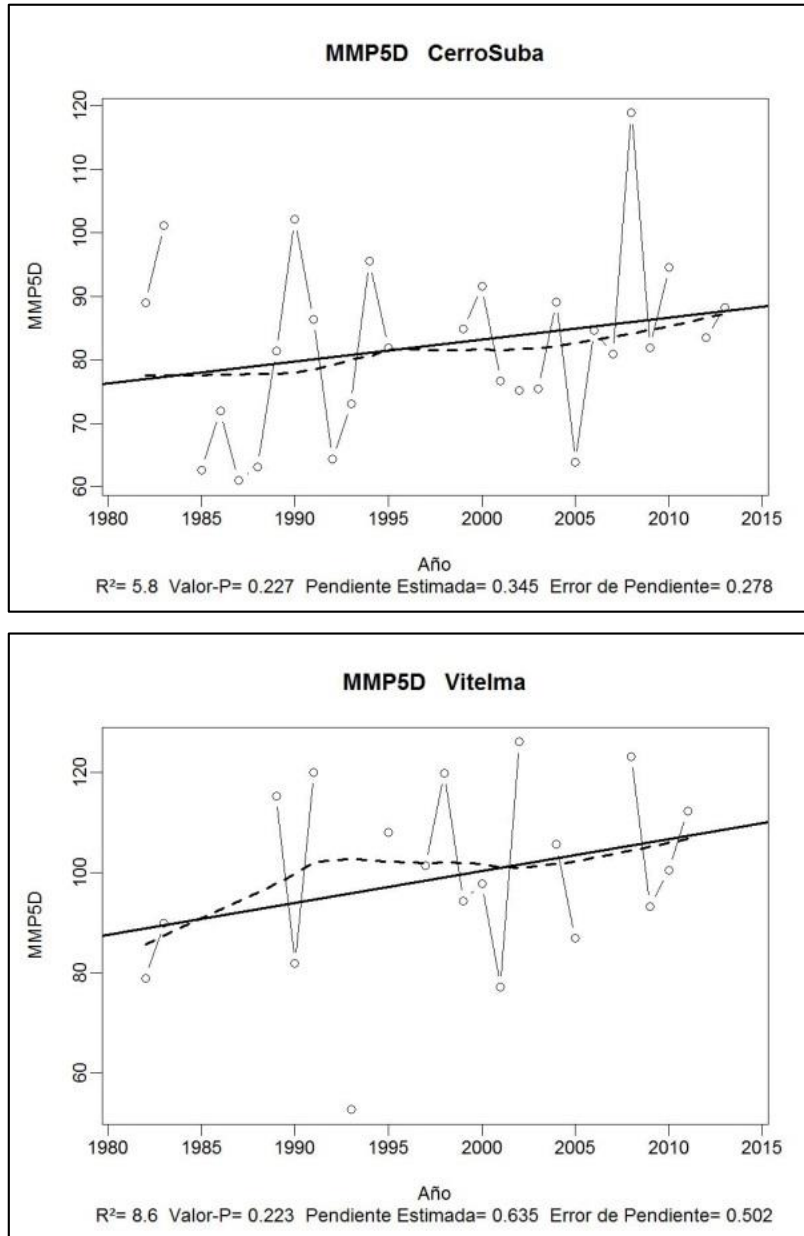


Figura No. 4-22. Variación Coeficiente de Variación para el Índice MMPD. (Valores en porcentaje)

El quinto índice analizado es el **máximo mensual de precipitación en cinco (5) días consecutivos (MMP5D)**. Este índice evalúa el comportamiento de la precipitación acumulada en 5 días consecutivos a nivel mensual multianual. De acuerdo con el ajuste realizado (ver Tabla No. 4-3) se encontró que hay una ligera tendencia positiva, en donde la tendencia regional es de 0.783 mm/año, con rangos de crecimiento entre -0.121 y 1.447. Adicionalmente se observa que solo el 5% de las estaciones presentan una tendencia negativa, contra el 95% de las estaciones que presentan una tendencia positiva. En la Figura No. 4-23, se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos del estudio sobre el índice MMP5D, en las estaciones de Cerro de Suba y Vitelma, en donde se puede determinar que la estación de Cerro de Suba presenta una tendencia de crecimiento positivo del orden de 0.345 mm/año, mientras que la estación Vitelma presenta una tendencia positiva del orden de 0.635 mm/año. Comparando el comportamiento de estas dos estaciones con el crecimiento de la precipitación máxima en 24 horas, se evidencia que si bien la estación Cerro de Suba presentaba una tendencia leve negativa, ahora presenta una tendencia positiva más significativa. Esto quiere decir que la tendencia a que aumente la intensidad en precipitaciones diarias es a que aumente, como se observa en la figura (MMPD), donde lo últimos diez años la tendencia es positiva concordante con la Figura (MMP5D) para esta estación.

El comportamiento espacial de la precipitación máxima durante 5 días consecutivos, es muy coherente con lo observado para el índice MMPD, y se acentúa más, mostrando, valores mayores hacia la zona de los cerros orientales. De igual manera, que para el índice anterior (MMPD), el occidente y sur occidente de la ciudad presentan valores menores de precipitaciones diarias en cinco días consecutivos. Este comportamiento se puede evidenciar en la Figura No. 4-24. Adicionalmente, en la Figura No. 4-25, se observan la tendencias de este índice en las estaciones y la espacialidad de la misma en la ciudad, donde se observa que la única estación que presenta una tendencia negativa es la estación Cisaca ubicada hacia el sur de la ciudad, mientras que en todas la demás estaciones la tendencia es negativa, con tendencias más acentuadas a los cerros orientales. En la Figura No. 4-26, se presentan los valores del coeficiente de variación, para el índice MMP5D mostrando una dispersión menor en todas las estaciones que el índice anteriormente expuesto, pero se observan algunas estaciones con una precisión

regular, las cuales son las estaciones Casablanca y Cerro de Suba. Sin embargo, los valores mayores, siguen presentándose en las estaciones ubicadas en los cerros.



**Figura No. 4-23. Ejemplo de los resultados para el índice MMP5D.**  
(La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)

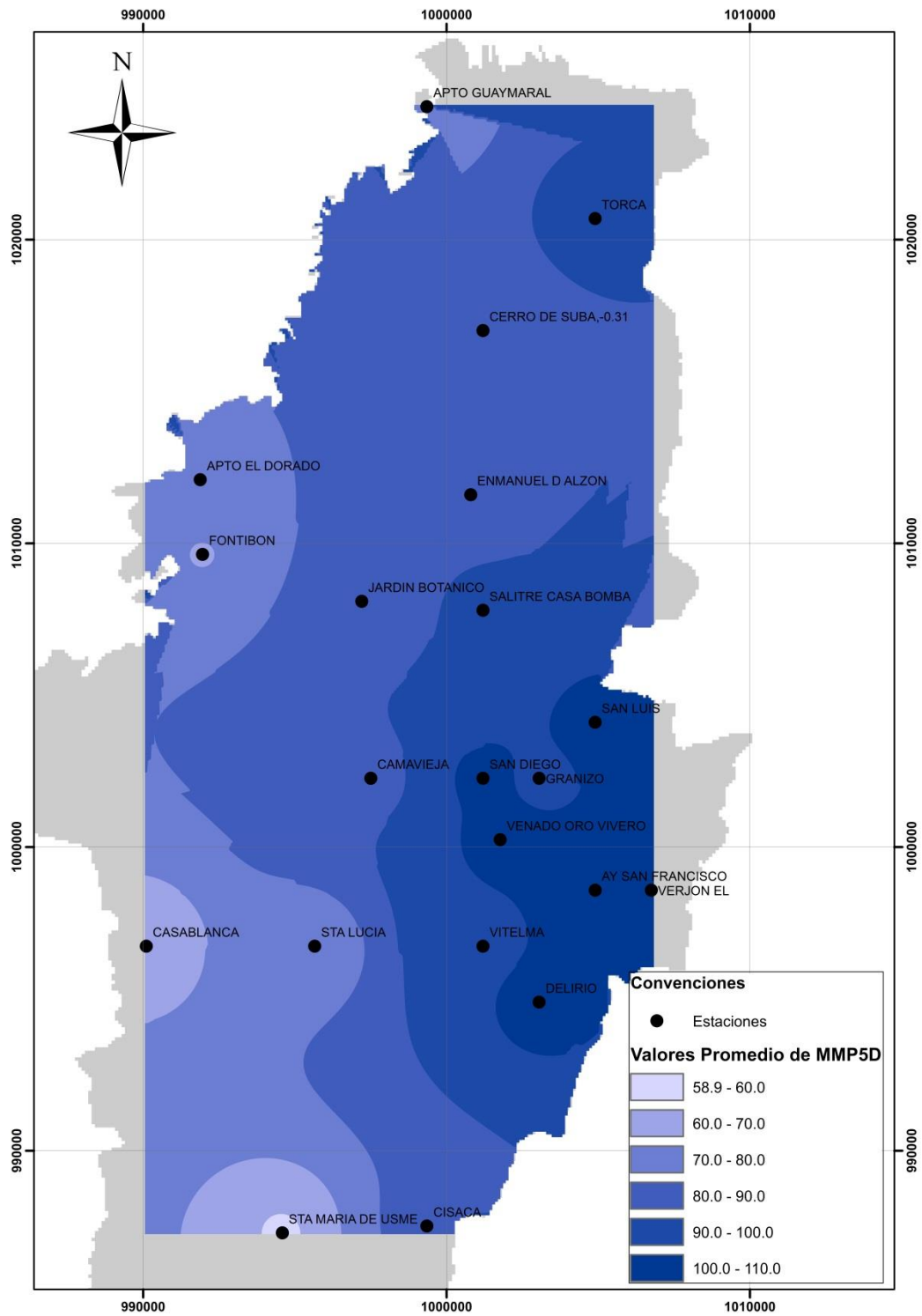


Figura No. 4-24. Distribución Espacial Promedio del Índice MMP5D.

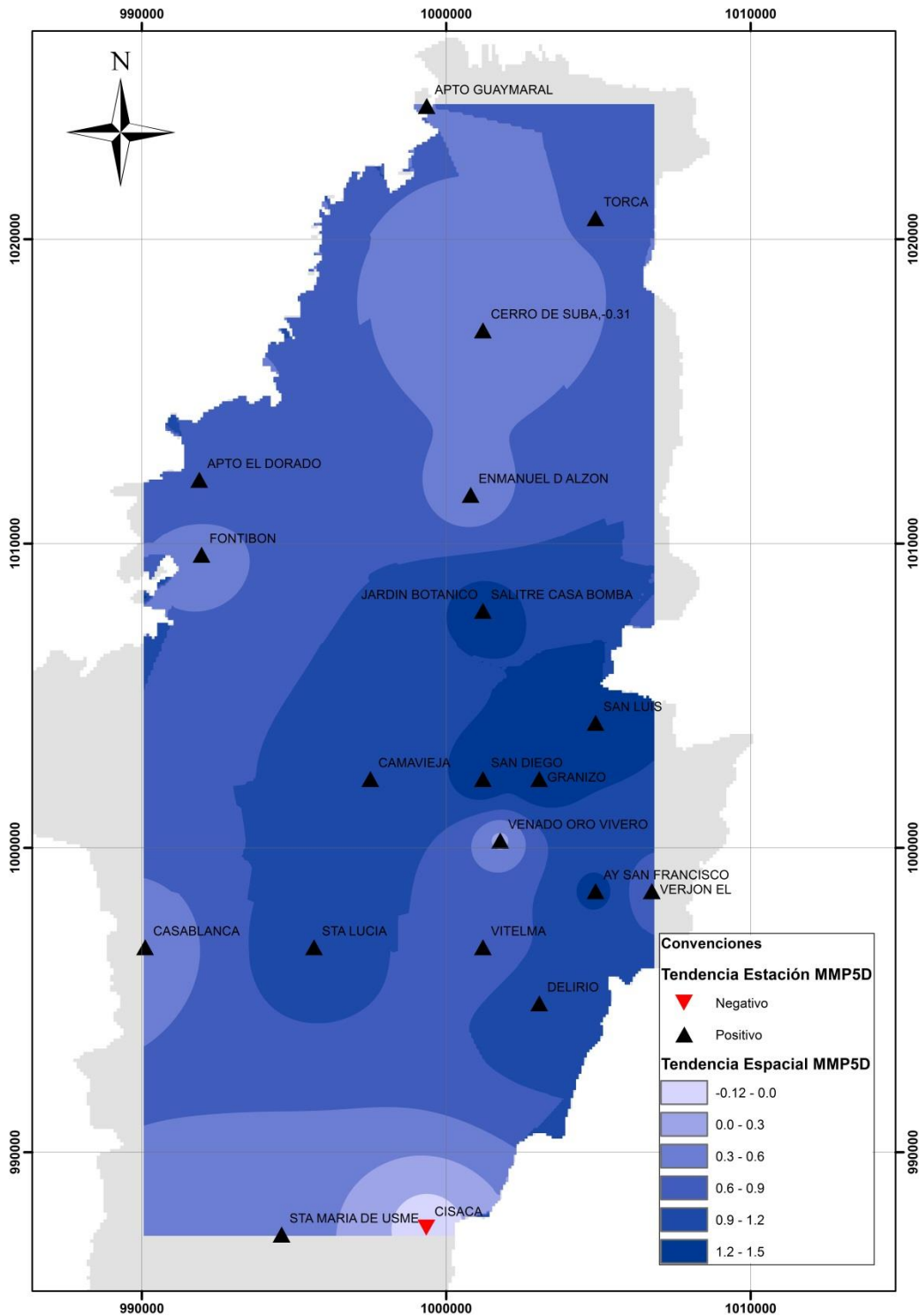


Figura No. 4-25. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice MMP5D.



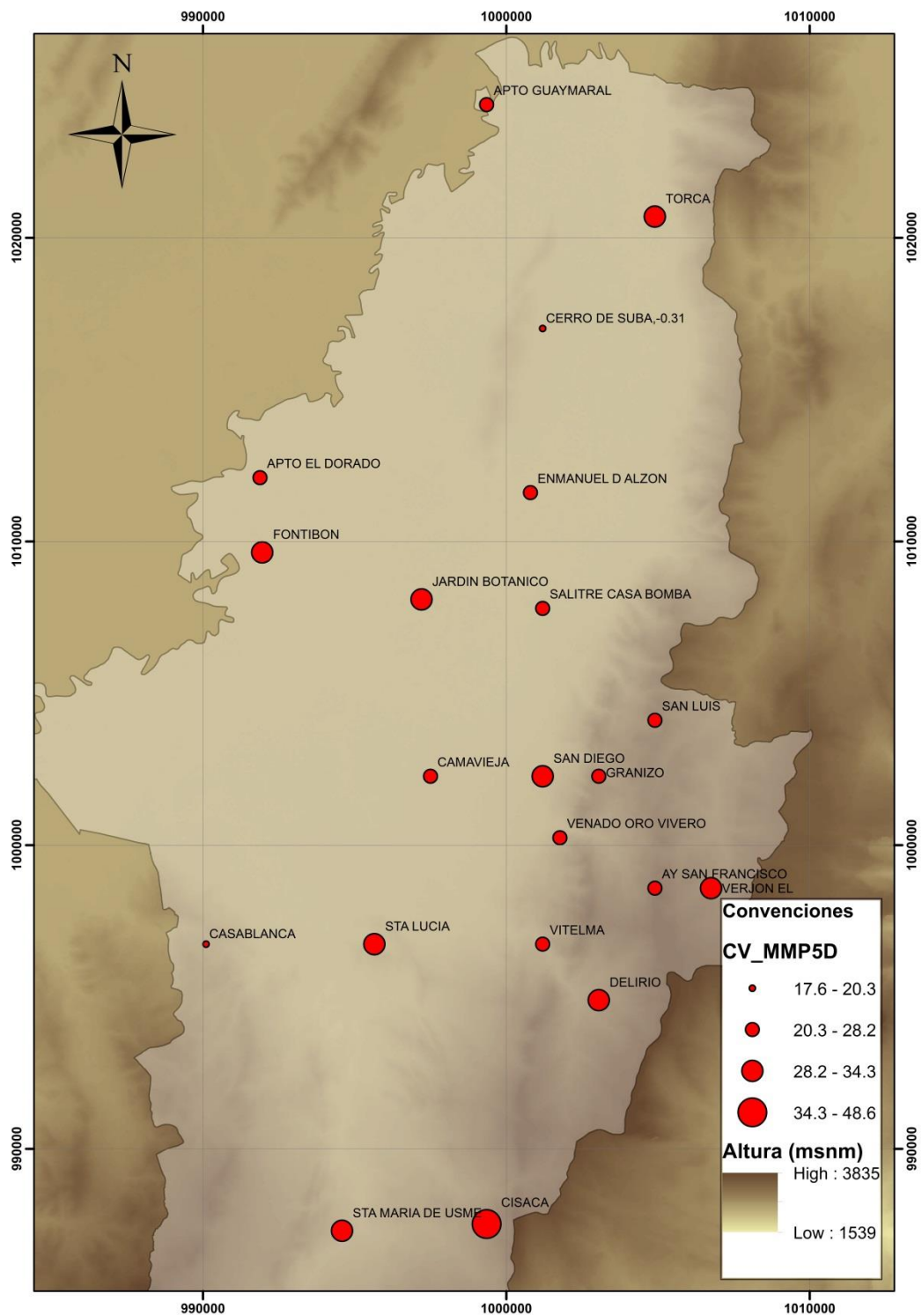
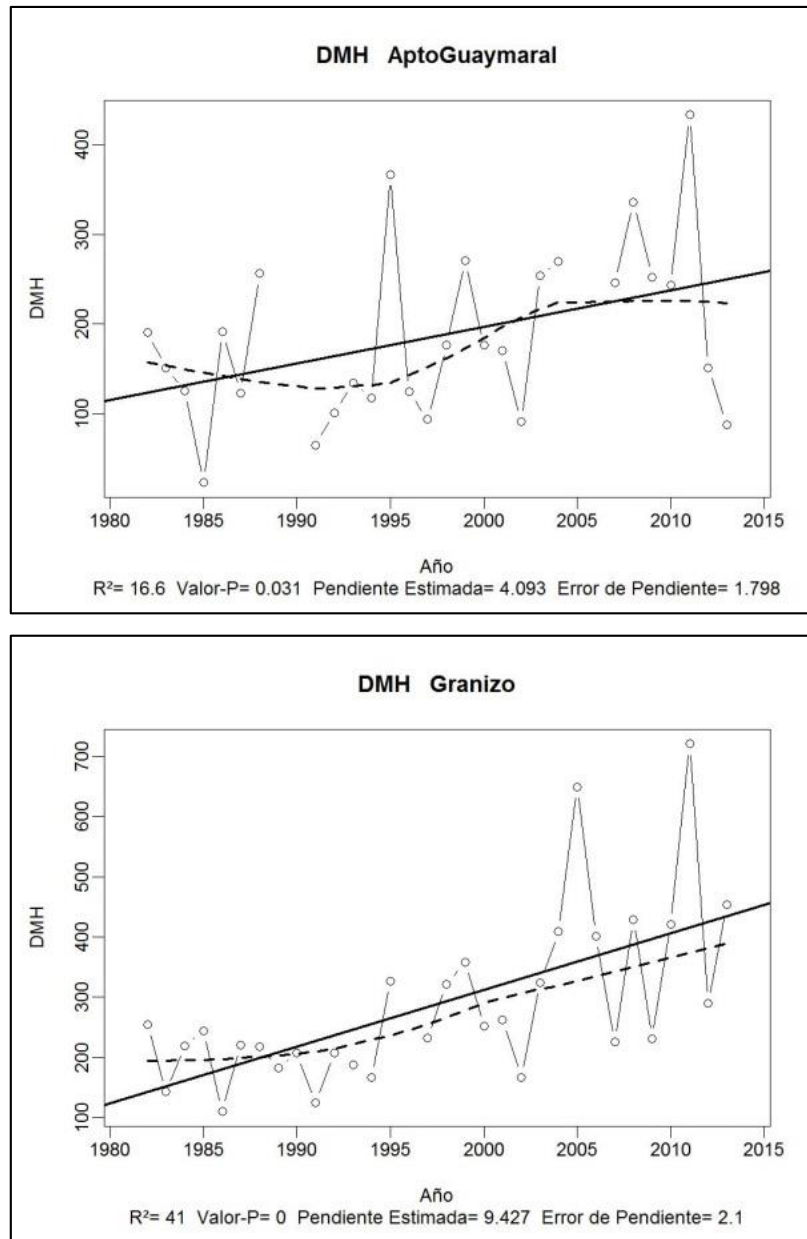


Figura No. 4-26. Variación Coeficiente de Variación para el Índice MMP5D. (Valores en porcentaje)

El sexto índice es la **precipitación anual total en que la precipitación diaria es mayor al percentil 95 (DMH)**. De acuerdo con el ajuste realizado se observa (ver Tabla No. 4-3) que hay una fuerte tendencia positiva en la totalidad de las estaciones consideradas, con una tendencia regional de aumento de 6.101 mm/año, con rangos de crecimiento entre 1.876 y 12.633 mm/año. Adicionalmente, se encontró que todas las estaciones presentan una tendencia positiva; esto quiere decir que la precipitación por encima del percentil del 95% ha aumentado en toda la zona de estudio, lo que está estrechamente ligado con el crecimiento de las precipitaciones extremas. En la Figura No. 4-27 se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos del estudio sobre el índice DMH, en las estaciones de Aeropuerto Guaymaral y Granizo, donde se puede observar que las dos estaciones presentan una tendencia ascendente, la primera de ellas presenta un crecimiento del orden de 4.003 mm/año, mientras que la segunda presenta un crecimiento del orden de 9.427 mm/año.

De acuerdo con la Figura No. 4-28, el centro-orientado de la ciudad presenta precipitaciones por encima del percentil 95, mientras que en el occidente y sur occidente de la ciudad siguen presentando precipitaciones anuales inferiores al resto de la ciudad. Por otro lado, en la Figura No. 4-29 se observa que la espacialidad de las tendencias encontradas en las estaciones, para este índice muestra una tendencia positiva, con mayor tendencia en las estaciones ubicadas hacia los cerros orientales y el norte de la ciudad. En la Figura No. 4-30 se presentan los valores del coeficiente de variación, encontrando esta vez que las estaciones con mayor variabilidad del índice son aquellas ubicadas hacia el centro y el norte de la ciudad, pero todas las estaciones presentan poca precisión.



**Figura No. 4-27. Ejemplo de los resultados para el índice DMH.  
 (La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)**

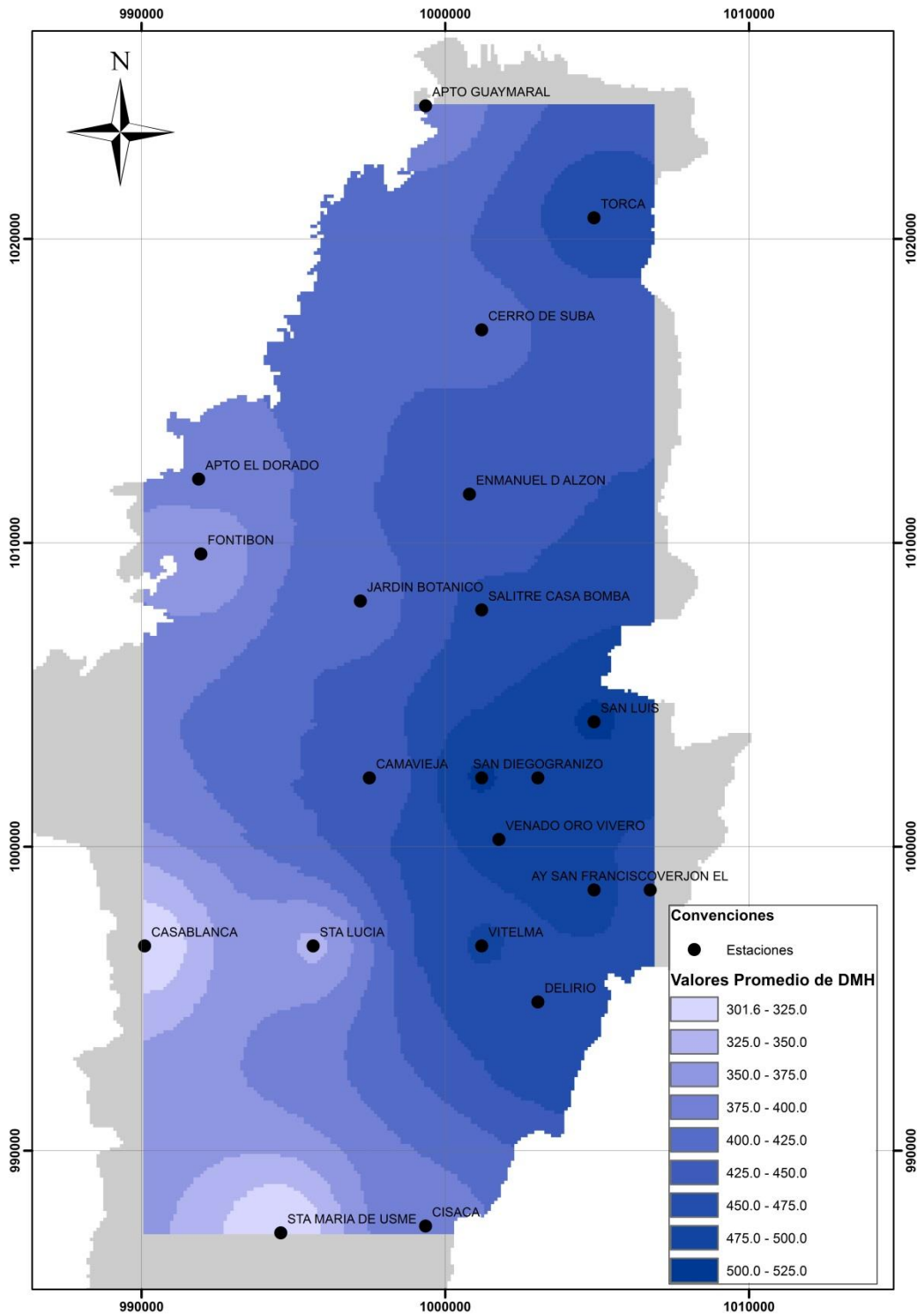


Figura No. 4-28. Distribución Espacial Promedio del Índice DMH.

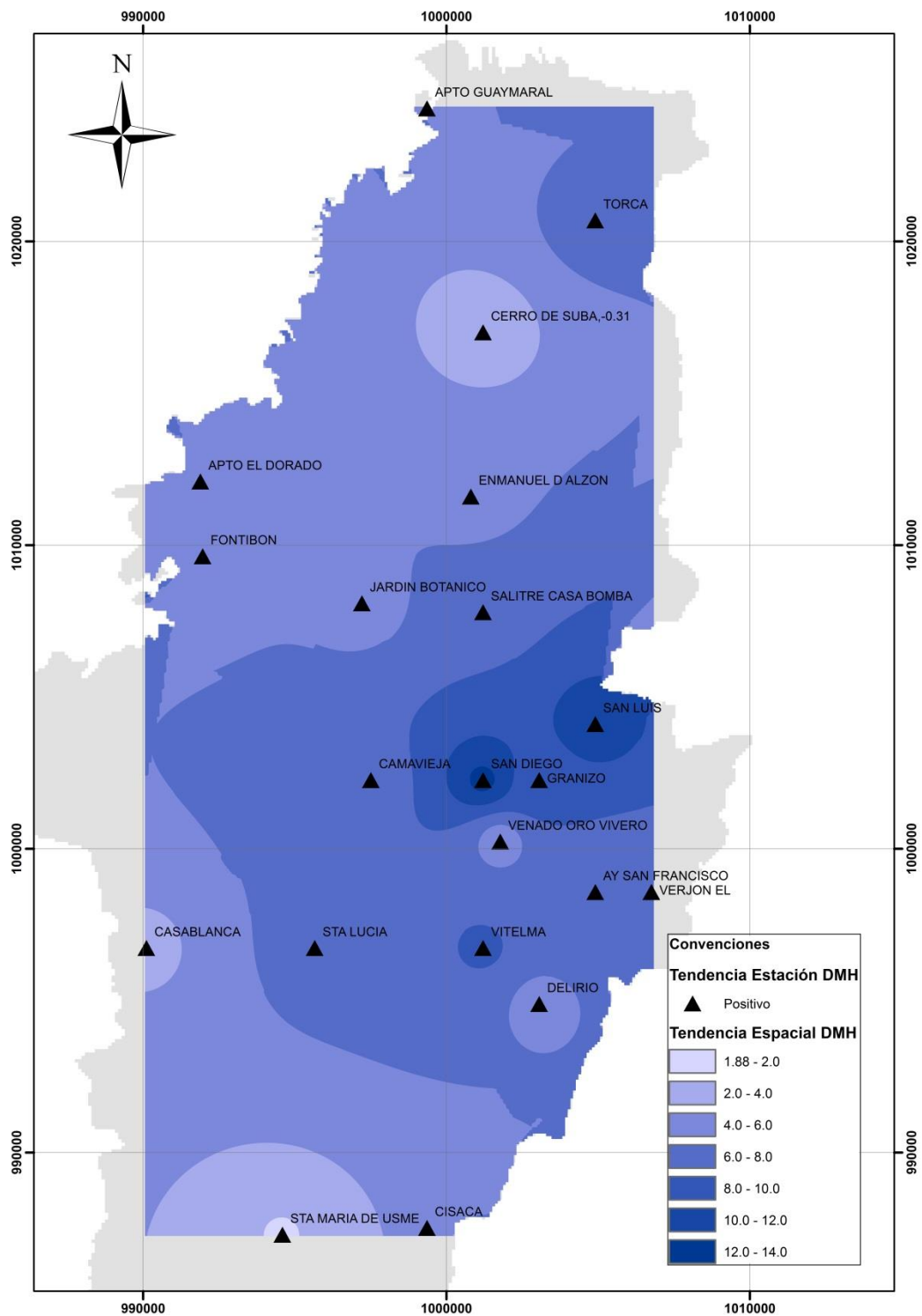


Figura No. 4-29. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice DMH.

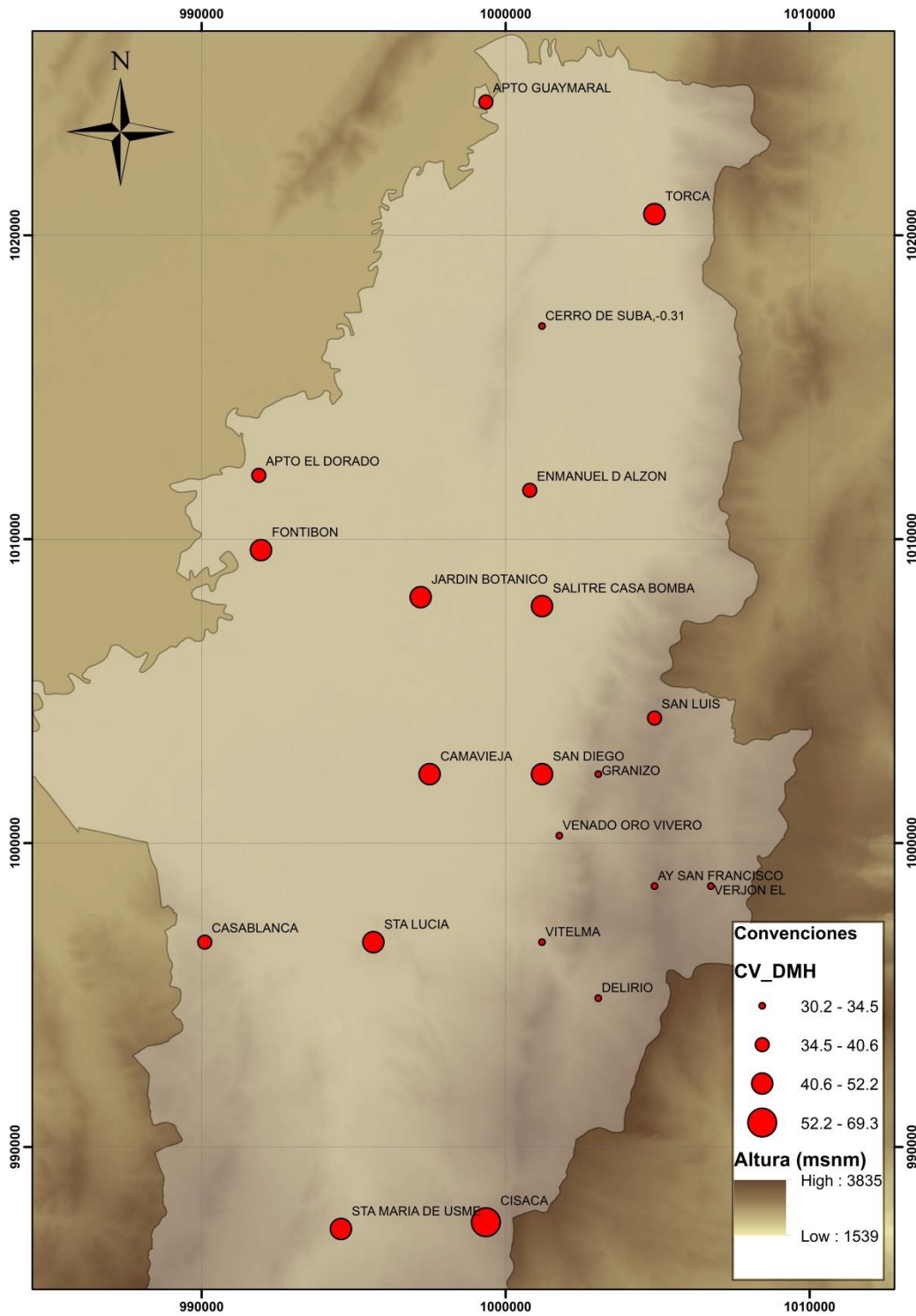
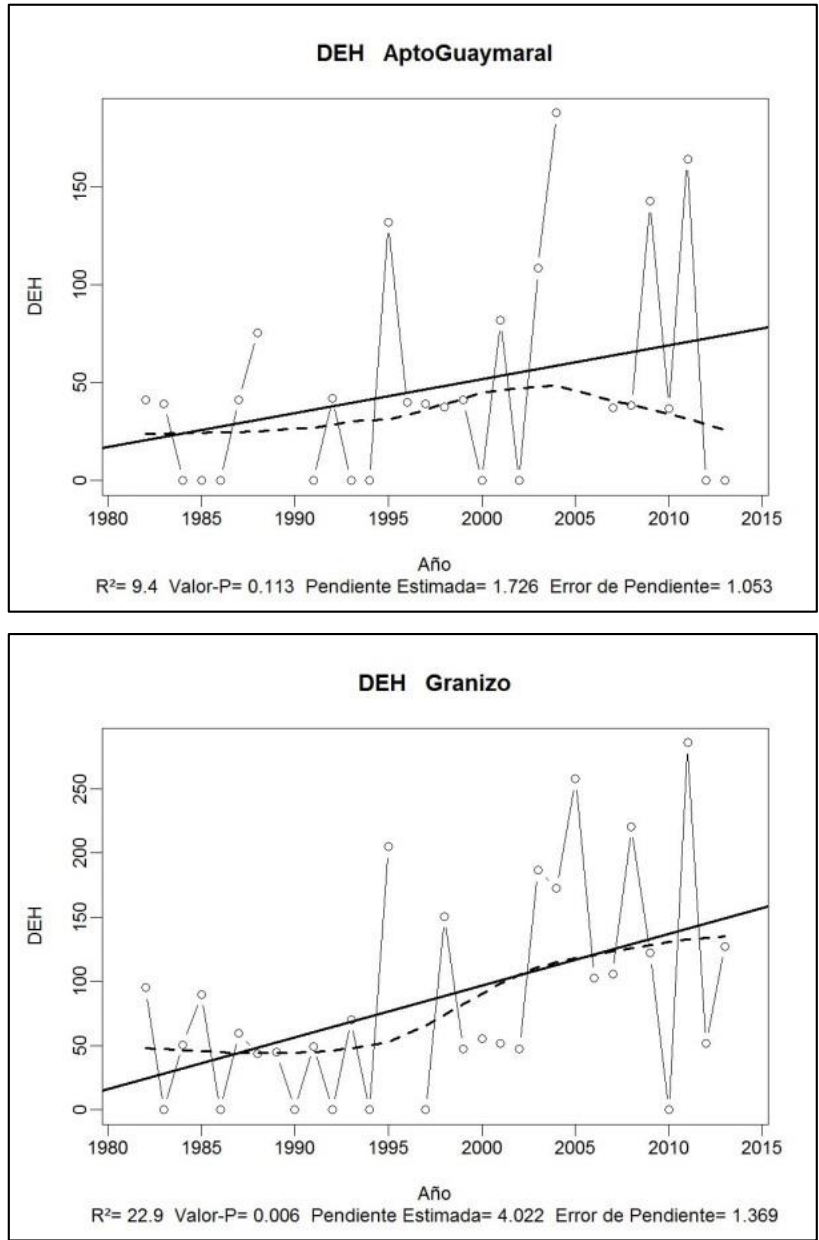


Figura No. 4-30. Coeficiente de Variación para el Índice DMH. (Valores en porcentaje)

El séptimo índice es la **precipitación anual total en que la precipitación diaria es mayor al percentil 99 (DEH)**. De acuerdo con el ajuste realizado (ver Tabla No. 4-3) se observa que hay una ligera tendencia positiva en la totalidad de estaciones, con una tendencia regional de 2.568 mm/año, con rangos de crecimiento entre 0.632 y 5.732 mm/año. Una tendencia positiva quiere decir que la precipitación por encima del percentil del 99% ha aumentado, lo que está estrechamente ligado con el crecimiento de las precipitaciones extremas. En la Figura No. 4-31, se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos del estudio sobre el índice DEH, en las estaciones de Aeropuerto Guaymaral y Granizo, donde se puede observar que las dos estaciones presentan una tendencia ascendente, la primera de ellas, presenta un crecimiento del orden de 0.113 mm/año, mientras que la segunda presenta un crecimiento del orden de 4.022 mm/año.

Según la Figura No. 4-32 se puede observar que los Cerros son la zona de la ciudad en donde la precipitación anual mayor al percentil 99 es más grande; este comportamiento está en concordancia con los índices anteriormente expuestos, considerando que los cerros presentan grandes precipitaciones a lo largo del año. En la Figura No. 4-33 se observa que todas las estaciones presentan una tendencia positiva, con mayor crecimiento para las estaciones ubicadas en los cerros y en el norte de la ciudad, y el menor crecimiento se encontró en el occidente y sur occidente de la ciudad. De otra parte, en la Figura No. 4-34, se presentan los valores del coeficiente de variación, encontrando que existe una gran dispersión en los datos de todas las estaciones, ya que presentan valores muy elevados, adicionalmente, se puede observar que las estaciones ubicadas en los cerros presentan mayor dispersión. La poca precisión encontrada en estas estaciones sirve para dejar claro que los valores encontrados acá se deben considerar como una descripción cualitativa de las tendencias que se están observando, sin embargo, no se pueden usar como un valor determinista y exacto, debido a las falencias en la calidad de los datos usados.



**Figura No. 4-31. Ejemplo de los resultados para el índice DEH.**  
(La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)



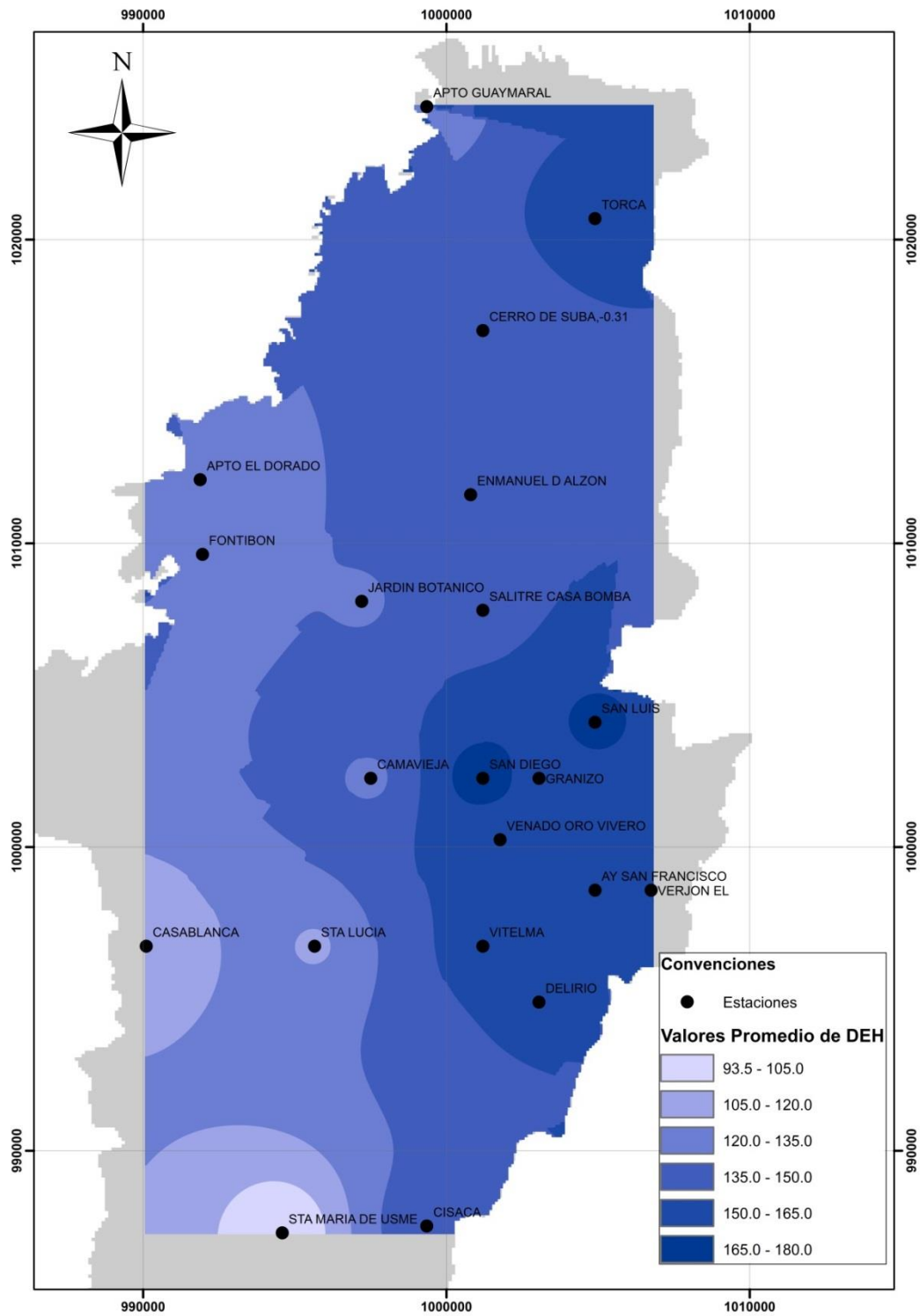


Figura No. 4-32. Distribución Espacial Promedio del Índice DEH.

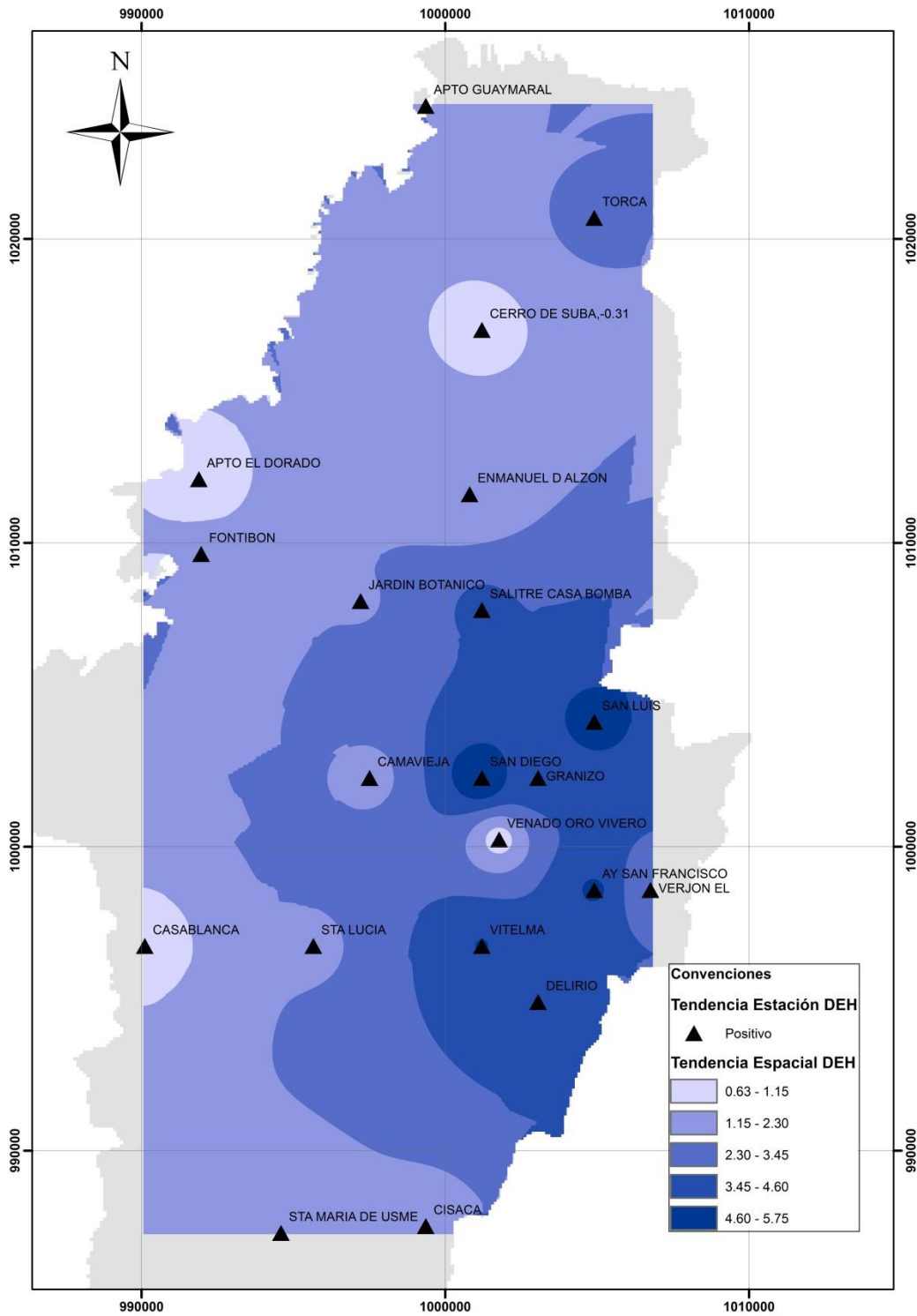


Figura No. 4-33. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice DEH.

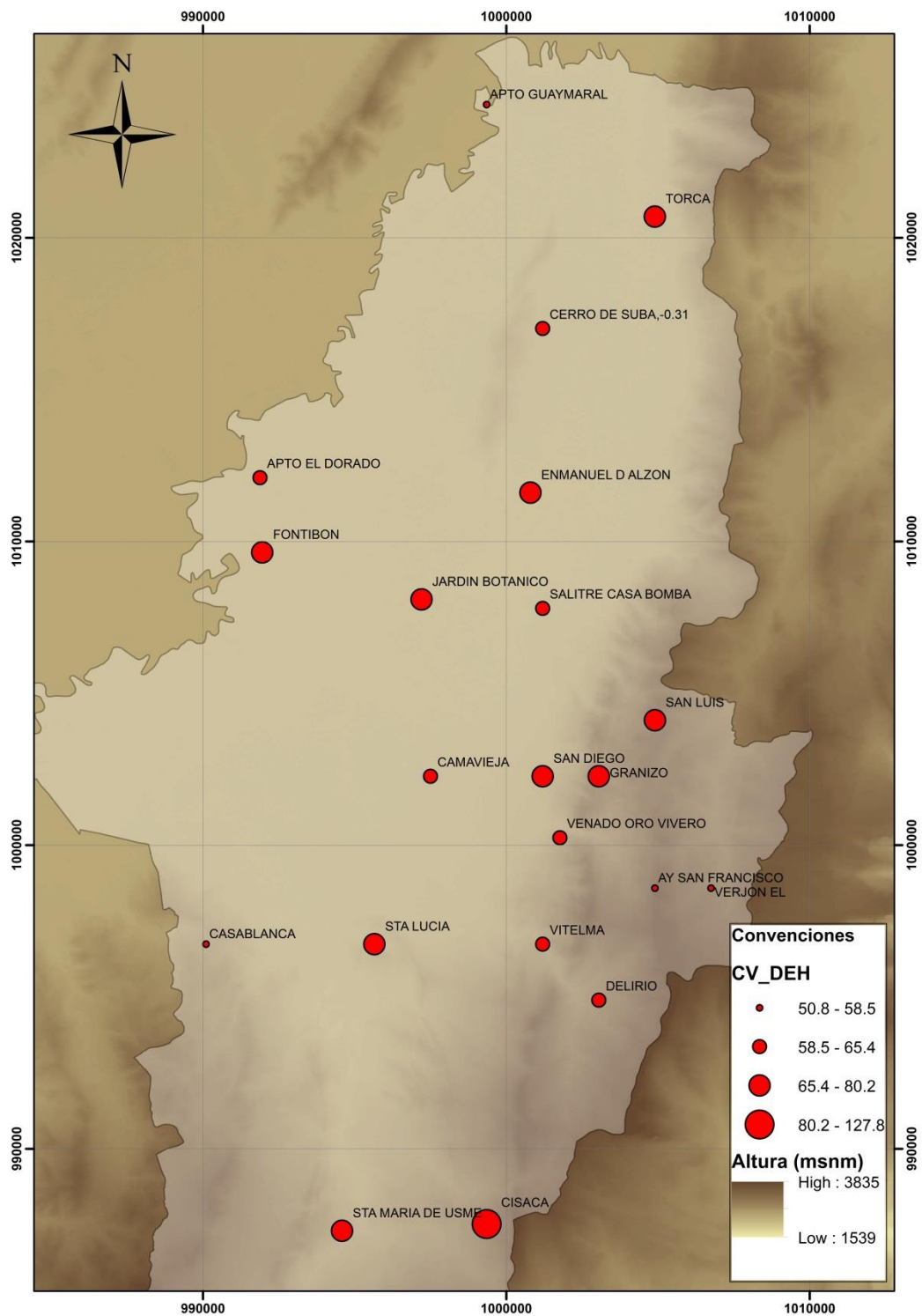
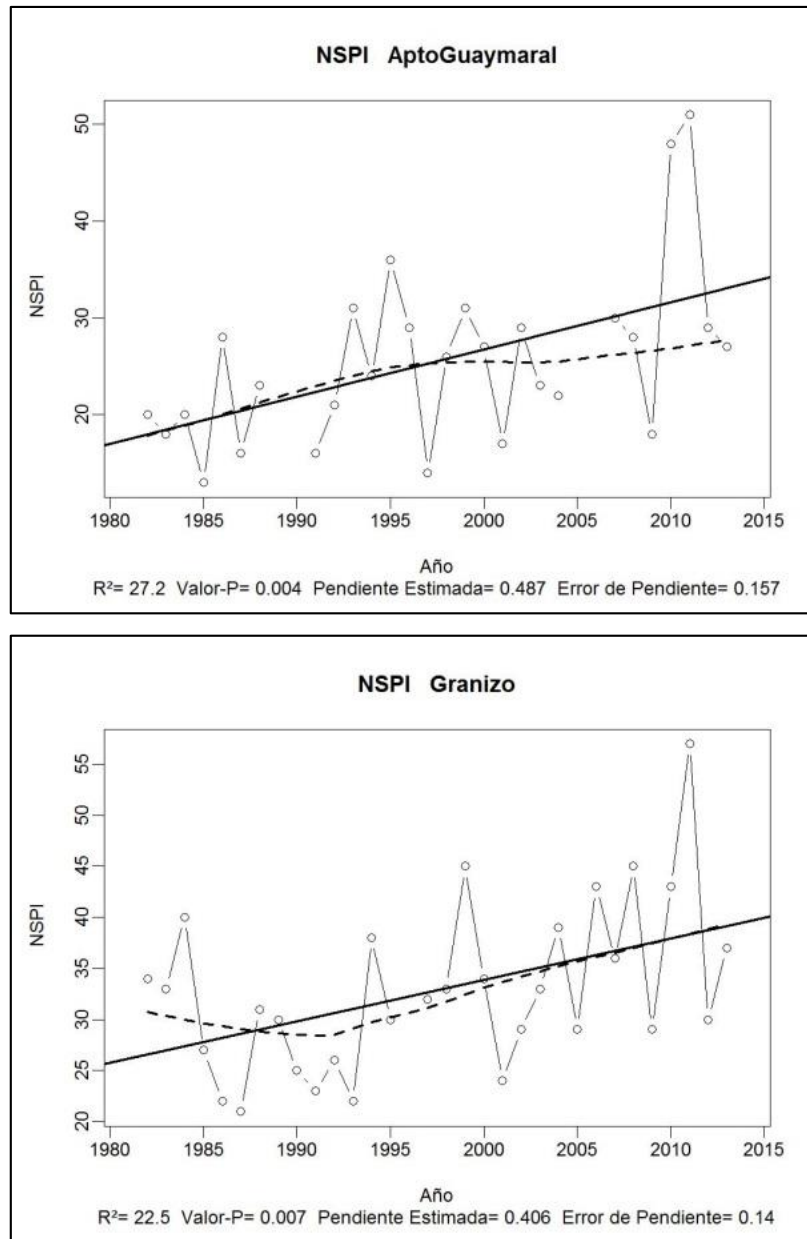


Figura No. 4-34. Coeficiente de Variación para el Índice DEH.  
(Valores en porcentaje)

El octavo índice es el **número de días con precipitación intensa (NSPI)**. Este índice indica cómo ha sido el comportamiento de la precipitación por encima de 10 mm. De acuerdo con el ajuste realizado (ver Tabla No. 4-3) se observa que hay una tendencia positiva, con una tendencia regional de 0.518 día/año, con rangos de crecimiento entre 0.221 y 0.972 día/año. Una ligera tendencia positiva quiere decir que el número de días con precipitación por encima de 10 mm ha aumentado a través del tiempo, lo que está estrechamente ligado con el crecimiento de las precipitaciones intensas. En la Figura No. 4-35, se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos del estudio sobre el índice NSPI, en las estaciones de Aeropuerto Guaymaral y Granizo, en donde se puede observar que las dos estaciones presentan una tendencia ascendente, la primera de ellas presenta un crecimiento del orden de 0.487 día/año, mientras que la segunda presenta un crecimiento del orden de 0.406 día/año.

La Figura No. 4-36 muestra la distribución espacial del índice NPSI, donde se puede observar que el número mayor de días con precipitaciones por encima de 10 mm sigue presentándose en los cerros orientales y en el norte, con valores superiores a 30 eventos por año, mientras que en la zona occidental y sur occidental, este número de eventos se presentan de 17 a 24 veces al año con este tipo de profundidades. En la Figura No. 4-37 se presenta la espacialidad de tendencia de este índice encontrando que hacia el norte de la ciudad la tendencia positiva es muy marcada, adicionalmente, en el centro de la ciudad en las estaciones Jardín Botánico, Camavieja y Salitre Casa Bomba, también se presenta una tendencia marcada, además en el occidente y sur occidente de la ciudad, si bien se presenta una tendencia positiva, no es tan alta como en los otros sectores. Por otro lado, en la Figura No. 4-38 se presenta el coeficiente de variación, donde se observa que las estaciones ubicadas en el sur y el norte de la ciudad presentan una dispersión mayor, se observa que la precisión de los datos para este índice, se encuentra entre regularmente preciso y poco preciso.



**Figura No. 4-35. Ejemplo de los resultados para el índice NPSI.  
(La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)**

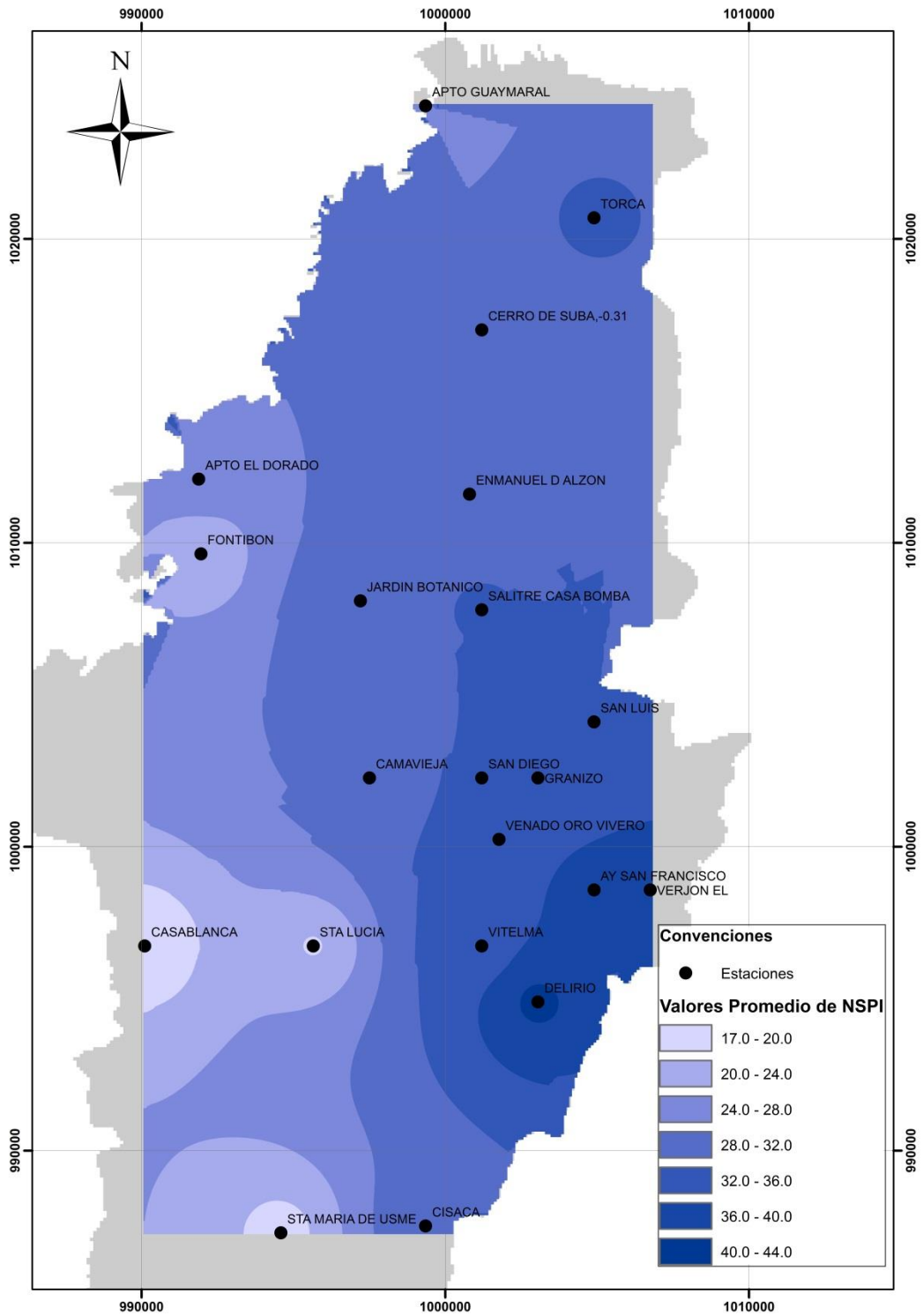


Figura No. 4-36. Distribución Espacial Promedio del Índice NSPI.

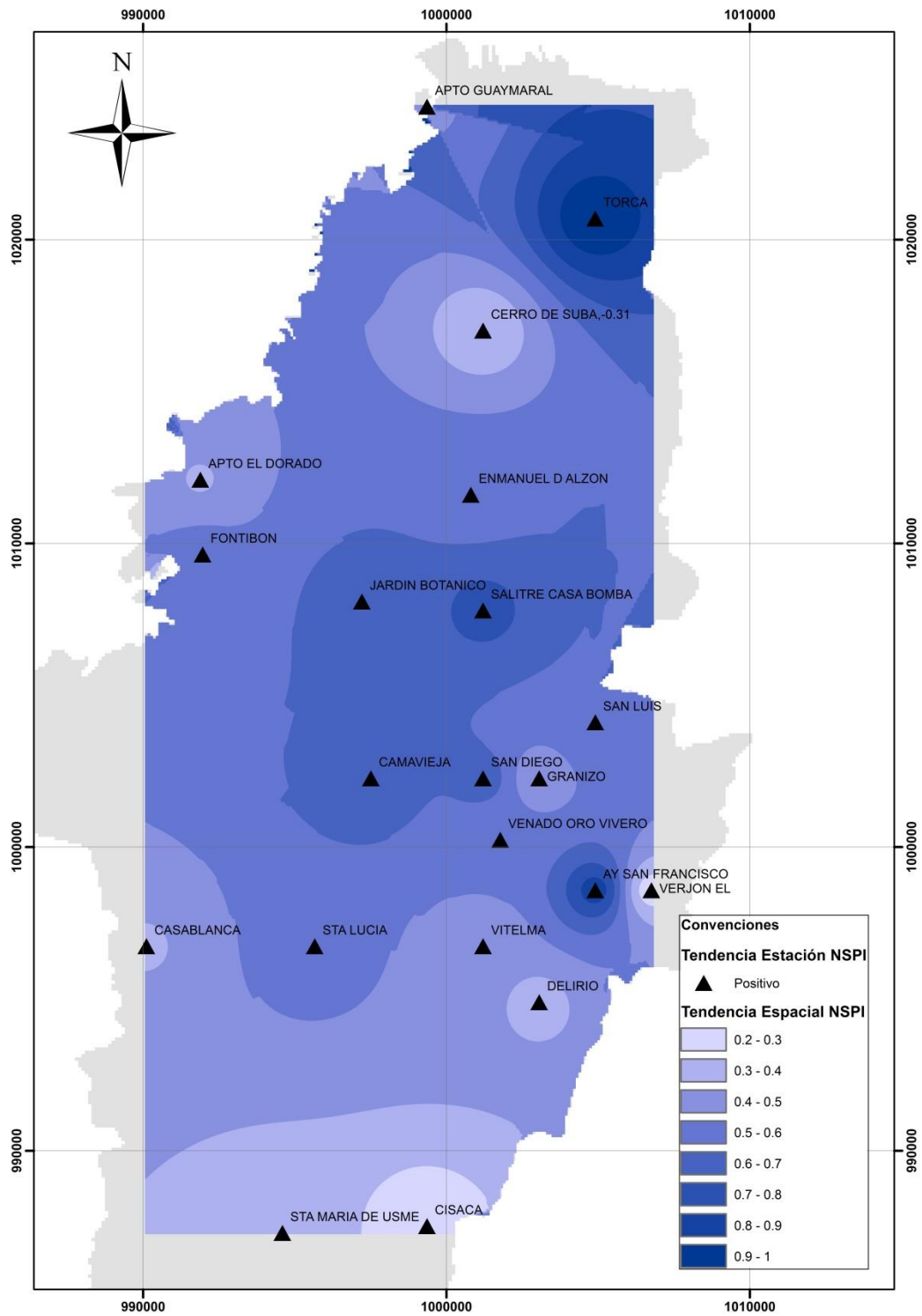


Figura No. 4-37. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice NSPI.

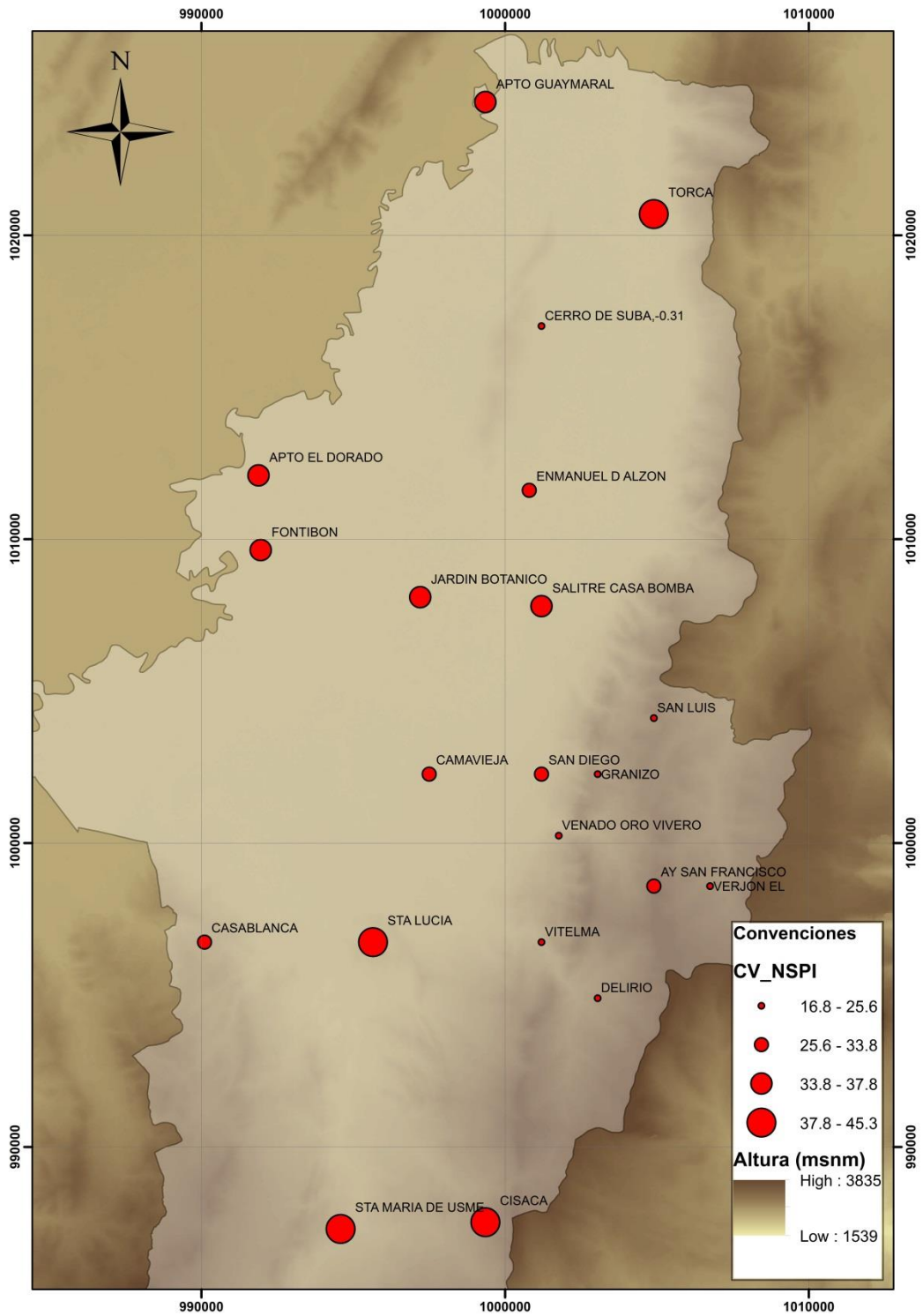
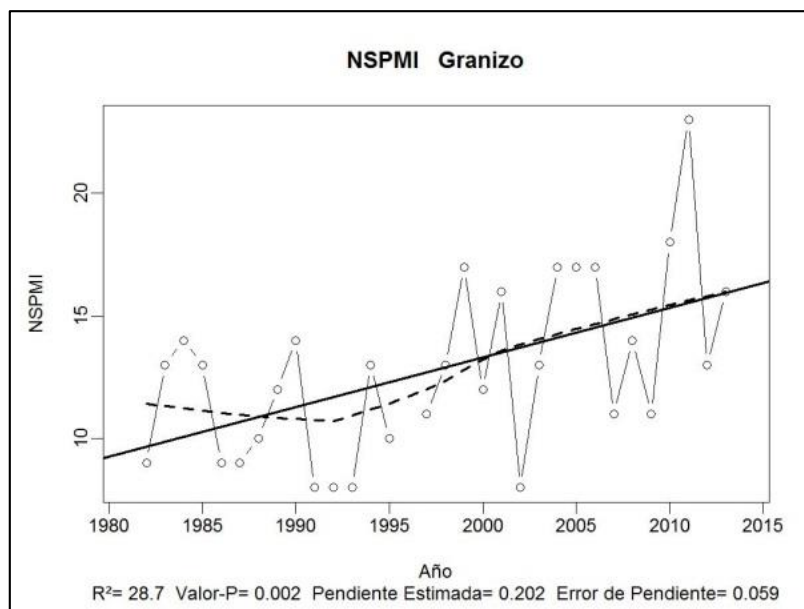
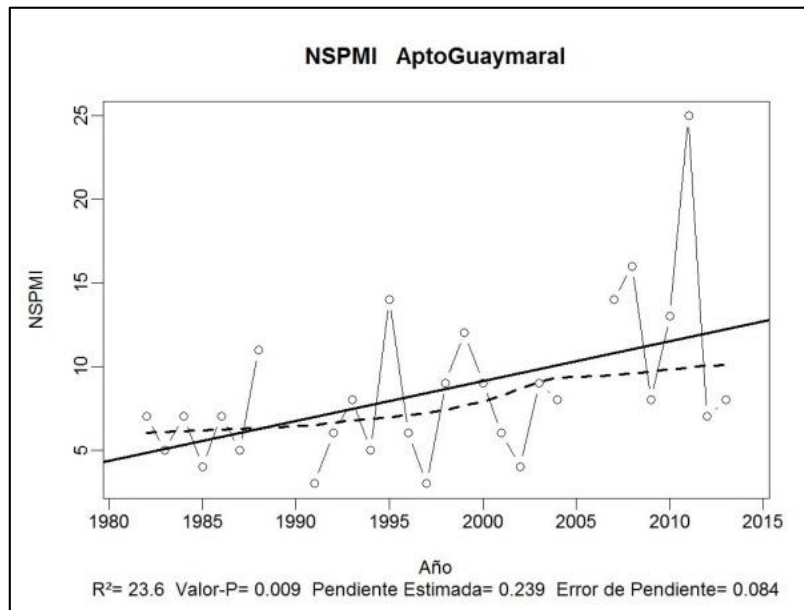


Figura No. 4-38. Coeficiente de Variación para el Índice NSPI.



El noveno índice es el **Número de días con precipitación muy intensa (NSPMI)**. Este índice indica cómo ha sido el comportamiento de la precipitación por encima de 20 mm. De acuerdo con el ajuste realizado se observa (ver Tabla No. 4-3) que hay una ligera tendencia positiva, con una tendencia regional de 0.234 día/año, con rangos de crecimiento entre 0.061 y 0.391 día/año. Adicionalmente, se encontró que todas las estaciones presentan una tendencia positiva, lo que quiere decir que el número de días con precipitación por encima de 20 mm ha aumentado, lo que está estrechamente ligado con el crecimiento de las precipitaciones muy intensas. En la Figura No. 4-39, se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos del estudio sobre el índice NSPMI, en las estaciones de Aeropuerto Guaymaral y Granizo, en donde se puede observar que las dos estaciones presentan una tendencia ascendente; la primera de ellas, presenta un crecimiento del orden de 0.487 mm/año, mientras que la segunda presenta un crecimiento del orden de 0.406 día/año.

El número de eventos al año con intensidades mayores a 20 mm/día, es del orden de 10 a 14 en los cerros orientales, mientras que en el sector occidental y sur occidental de la ciudad, disminuye hasta a 4 eventos al año. Este comportamiento se puede observar en la Figura No. 4-40. Además en la Figura No. 4-41 se observa que la tendencia de crecimiento acentuada en el norte y en el centro de la ciudad en el índice anterior se mantiene. Por otro lado en la Figura No. 4-42, se puede observar que las estaciones el Jardín Botánico, Salitre Casa Bomba, Sta Lucia y Apto Guaymaral, son las que presentan una mayor dispersión para este índice, encontrando mayor dispersión en las estaciones ubicadas hacia la parte plana de la ciudad, de igual manera que para el índice anterior, este índice presenta poca precisión.



**Figura No. 4-39. Ejemplo de los resultados para el índice NPSMI.**  
(La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)

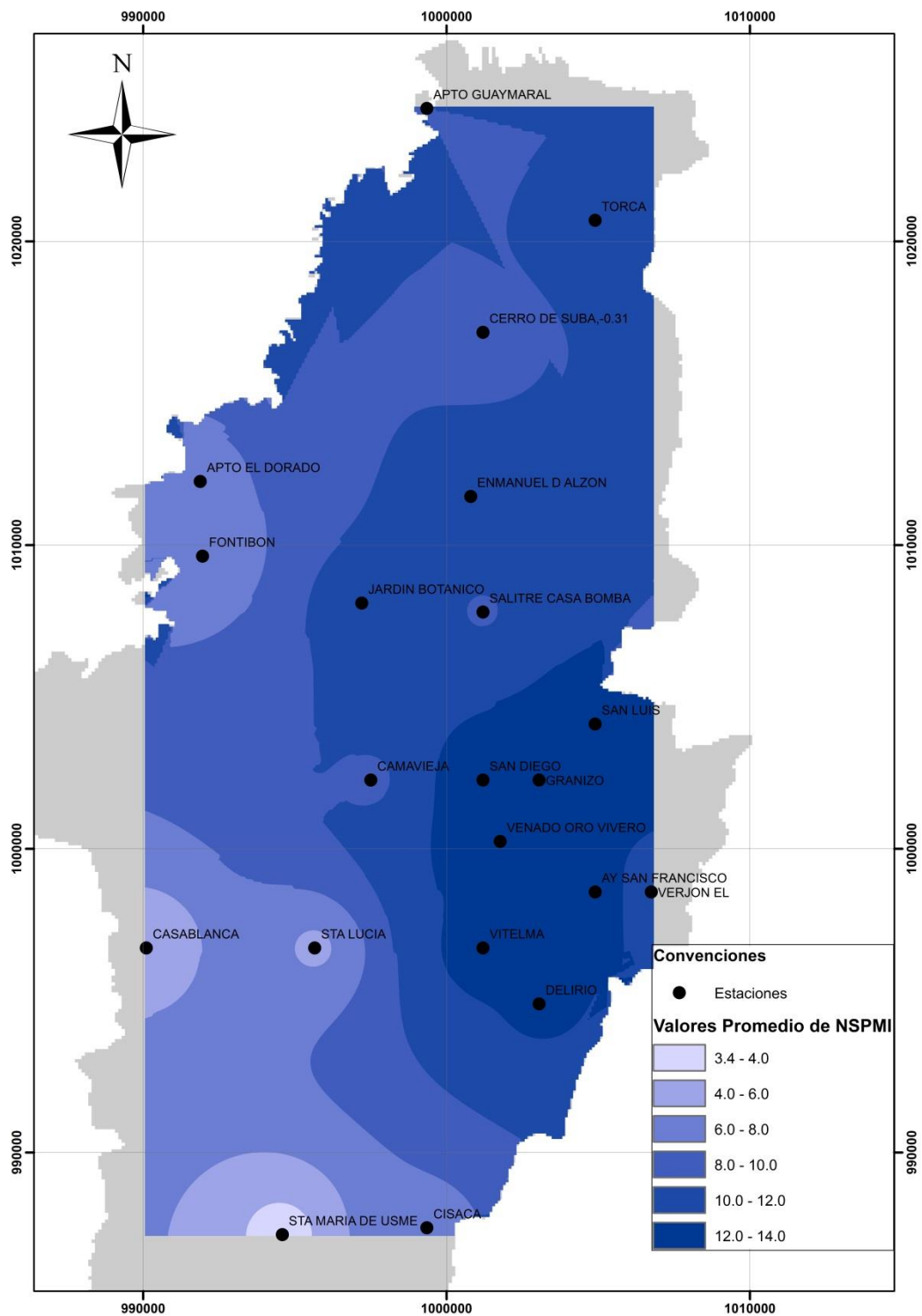


Figura No. 4-40. Distribución Espacial Promedio del Índice NSPMI.

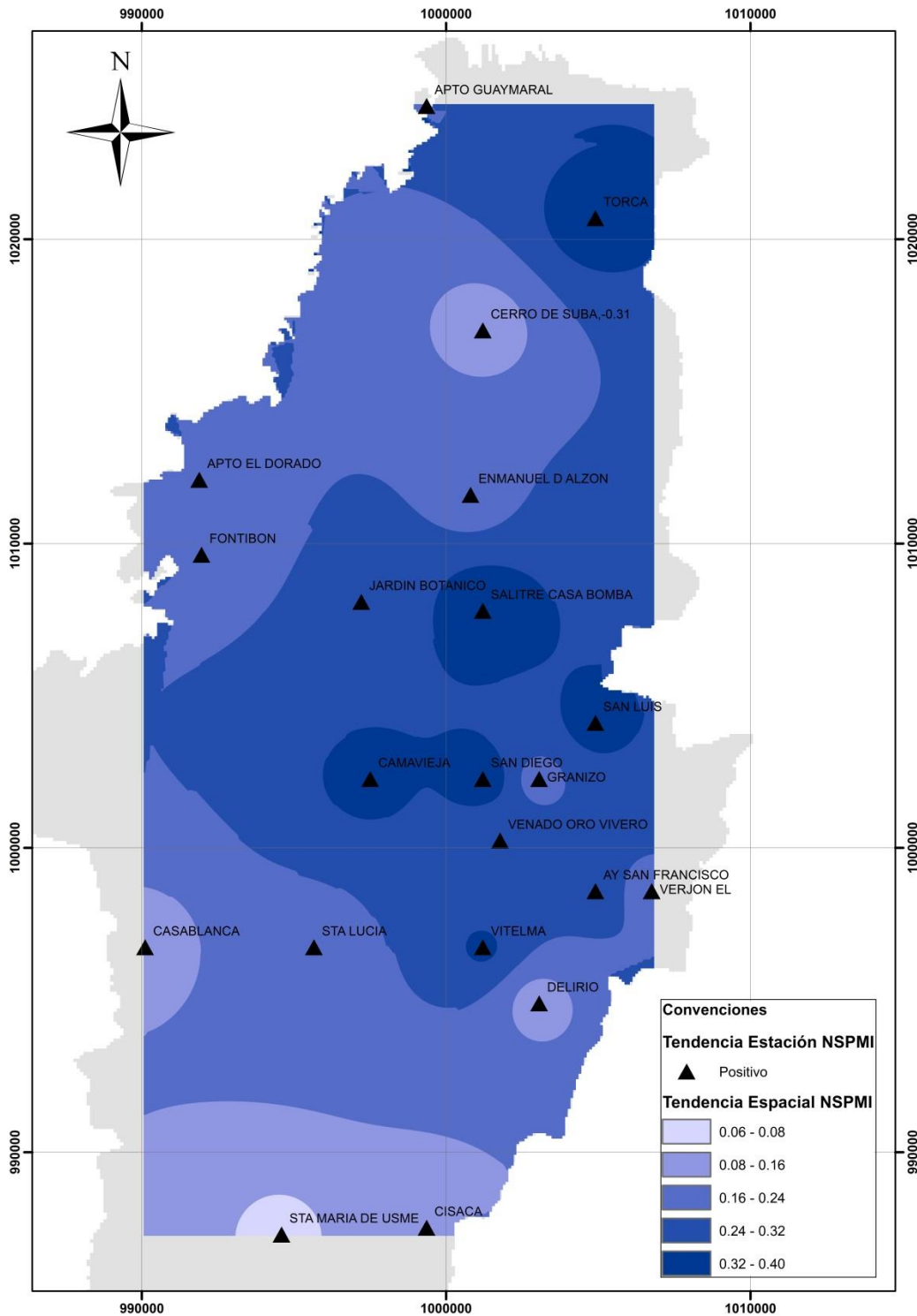


Figura No. 4-41. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice NSPMI.

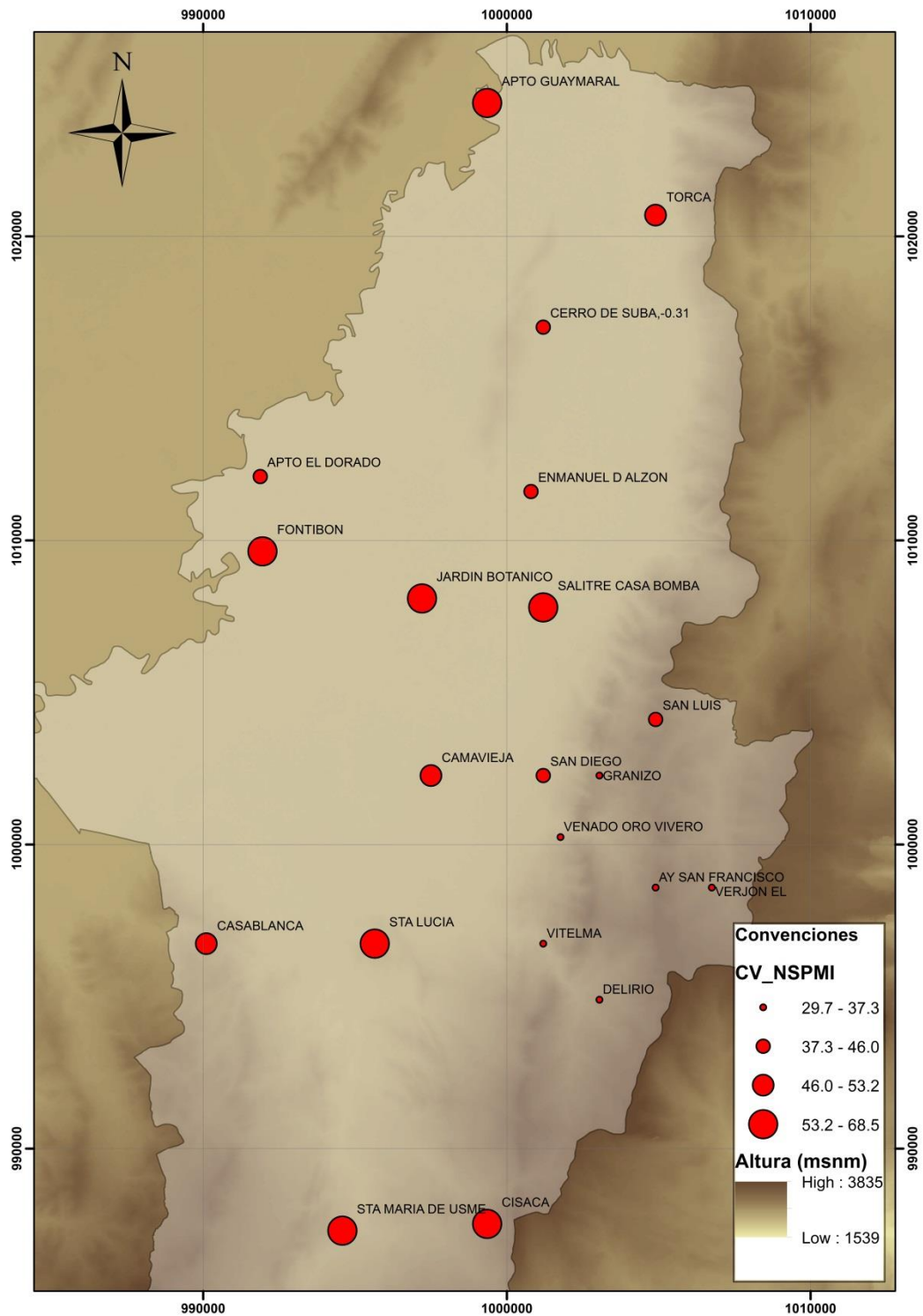
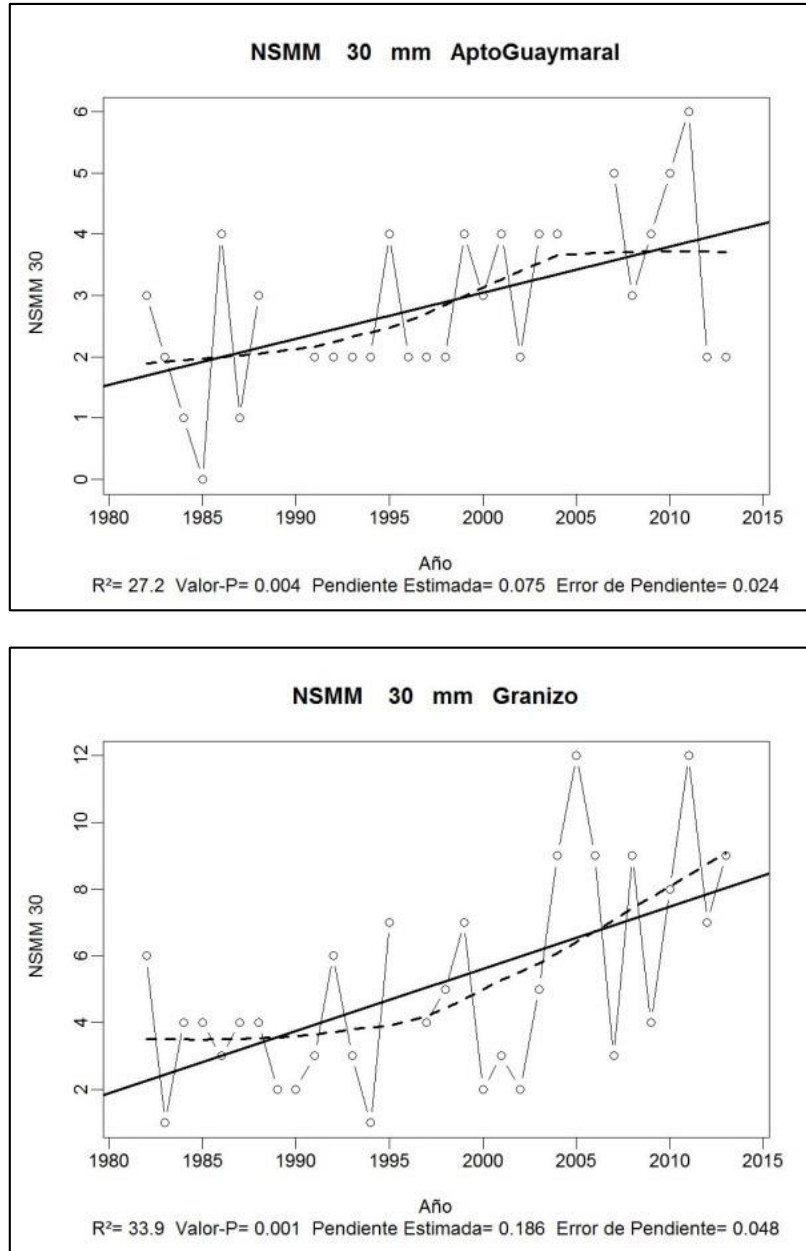


Figura No. 4-42. Coeficiente de Variación para el Índice NSPMI.

El décimo índice es el **número de días con precipitación muy intensa (NSMM (30))**. Este índice indica cómo ha sido el comportamiento temporal de la precipitación por encima de 30 mm. De acuerdo con el ajuste realizado se observa (ver Tabla No. 4-3) que hay una ligera tendencia positiva, con una tendencia regional de 0.107 día/año, con rangos de crecimiento entre 0.021 y 0.260 día/año. Adicionalmente se encontró que todas las estaciones presentan una tendencia positiva, lo que quiere decir que el número de días con precipitación por encima de 30 mm ha aumentado, lo que está estrechamente ligado con el crecimiento de las precipitaciones muy intensas. En la Figura No. 4-43, se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos del estudio sobre el índice NSPMM (30), en las estaciones de Aeropuerto Guaymaral y Granizo, en donde se puede observar que las dos estaciones presentan una tendencia ascendente, la primera de ellas presenta un crecimiento del orden de 0.075 día/año, mientras que la segunda presenta un crecimiento del orden de 0.186 día/año.

Nuevamente, se puede observar que en el occidente y sur occidente de la ciudad, se presentan la menor cantidad de eventos con precipitación por encima de 30 mm/día, que en promedio suceden 3 a 6 veces al año, mientras que en los cerros el número de estos eventos es el mayor, pues ocurren en promedio del orden de 11 a 14 eventos al año. Como se puede observar, la ocurrencia de estos eventos al año es el doble en los cerros orientales que en el occidente y el norte de la ciudad. En la Figura No. 4-44 se presenta la distribución espacial de este índice. Por otro lado en la Figura No. 4-45, se sigue observando la tendencia de mayor crecimiento hacia el norte y centro de la ciudad, sin embargo, para las estaciones ubicadas en el centro de la ciudad su área de crecimiento acentuado disminuyó con relación a los dos anteriores índices, concentrándose principalmente hacia las estaciones San Luis y San Diego.



**Figura No. 4-43. Ejemplo de los resultados para el índice NPMM (30).**  
 (La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)

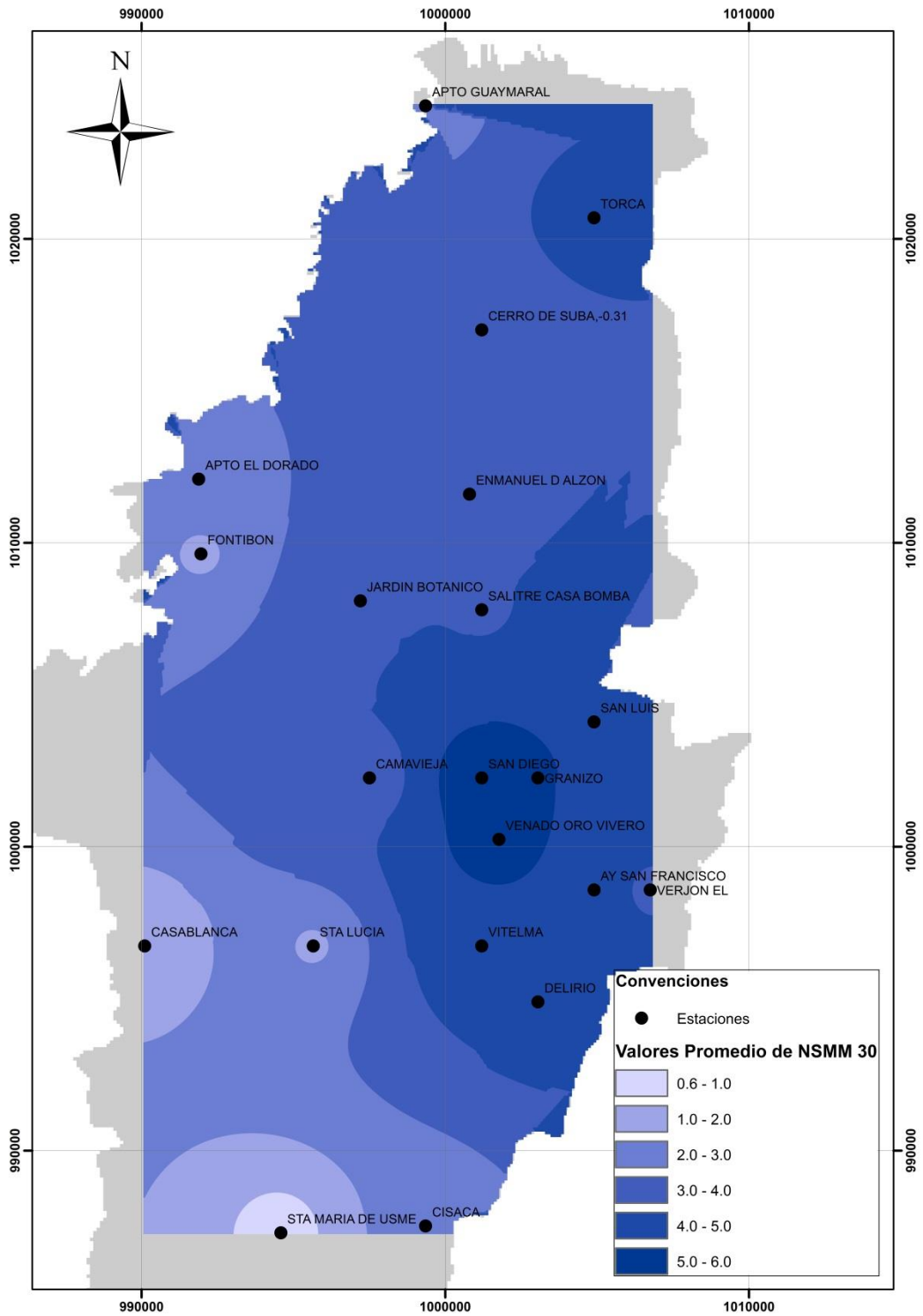


Figura No. 4-44. Distribución Espacial Promedio del Índice NSMM 30.



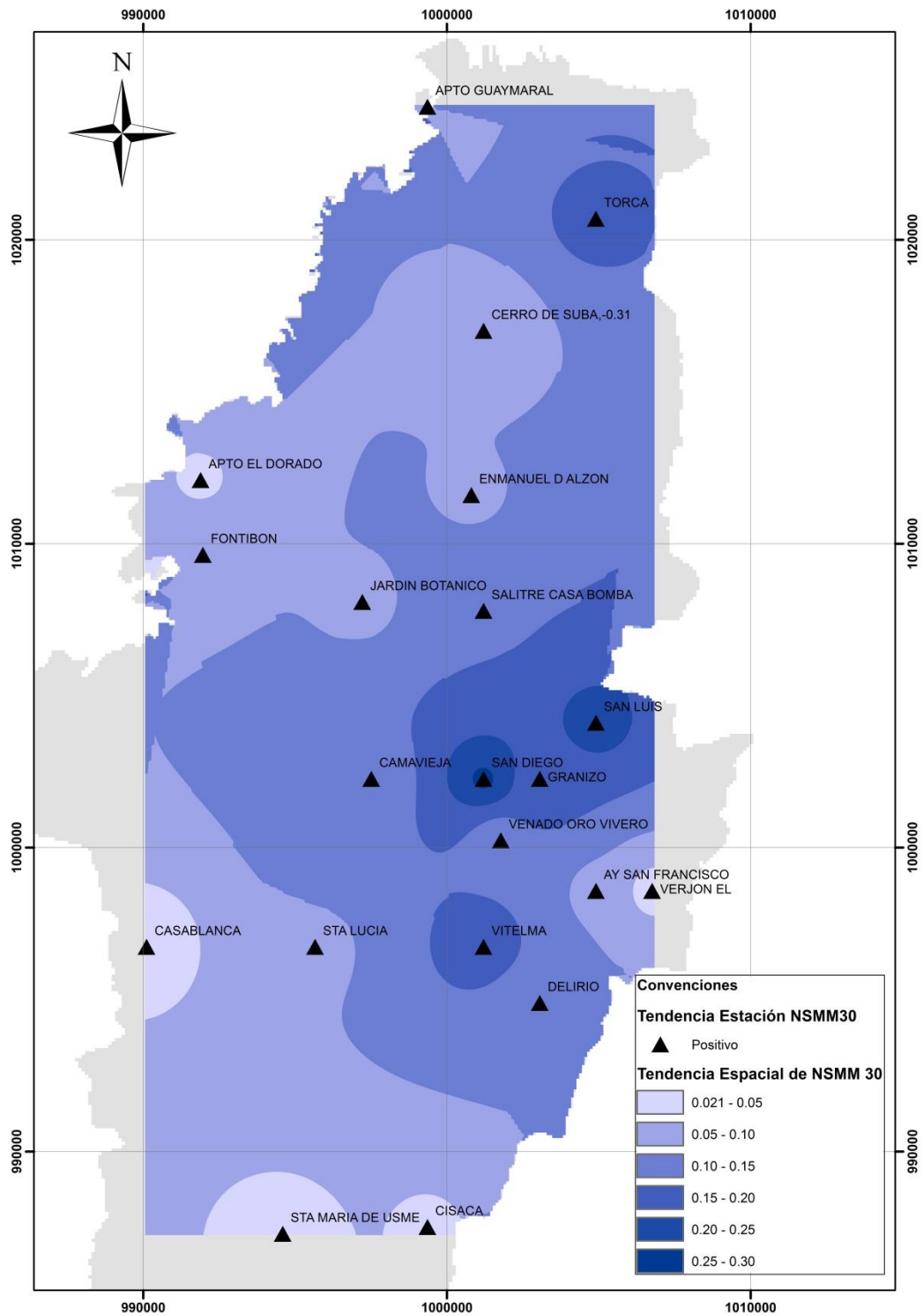


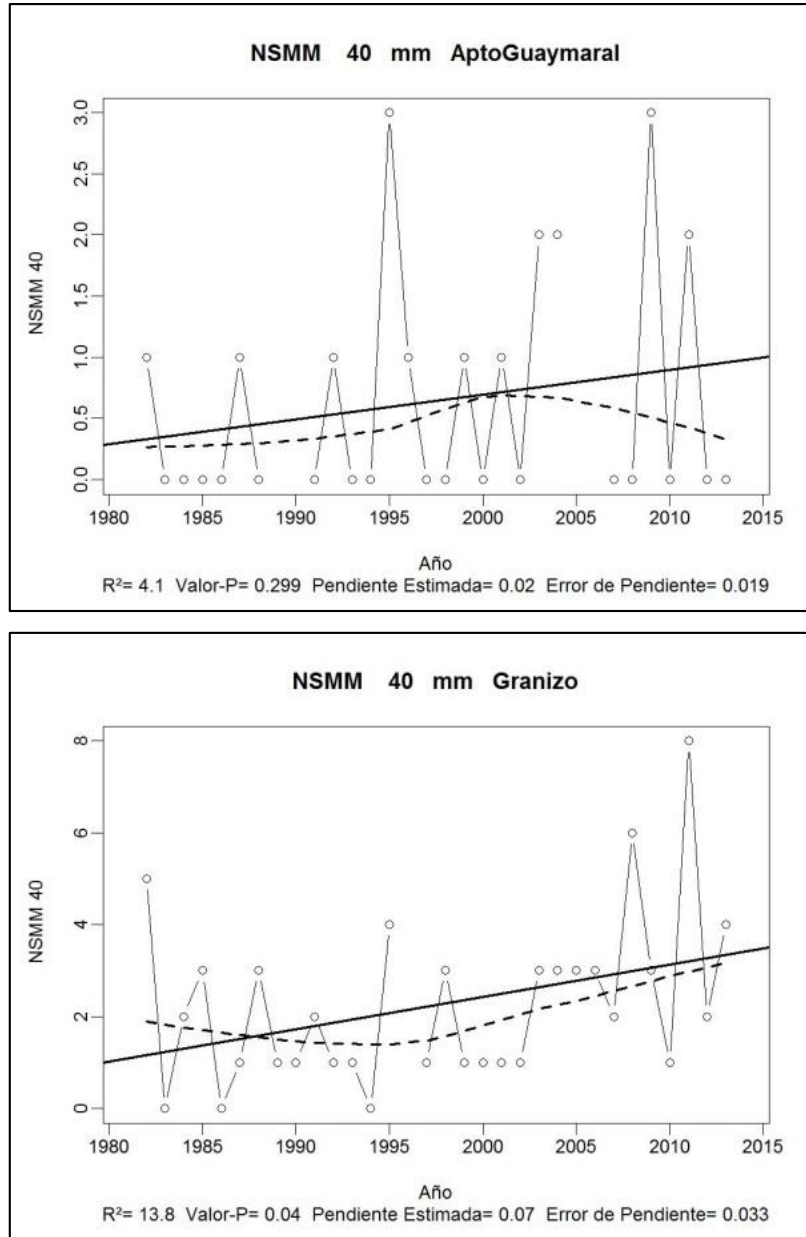
Figura No. 4-45. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice NSMM 30.

El undécimo índice es el **número de días con precipitación muy intensa (NSMM (40))**. Este índice indica cómo ha sido el comportamiento de la precipitación por encima de 40 mm. De acuerdo con el ajuste realizado se observa (ver Tabla No. 4-3) que hay una muy ligera tendencia positiva en la mayoría de las estaciones, con una tendencia regional de 0.051 día/año, con rangos de crecimiento entre -0.002 y 0.160 día/año. Adicionalmente se encontró que la tendencia es mixta, aunque positiva en la mayoría de las estaciones; esto quiere decir que el número de días con precipitación por encima de 40 mm en general ha aumentado, lo que está estrechamente ligado con el crecimiento de las precipitaciones extremas. En la Figura No. 4-46, se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos del estudio sobre el índice NSMM (40), en las estaciones de Aeropuerto Guaymaral y Granizo, en donde se puede observar que las dos estaciones presentan una tendencia ascendente, la primera de ellas, presentan un crecimiento del orden de 0.02 día /año, mientras que la segunda presenta un crecimiento del orden de 0.07 día/año.

Los resultados de este índice muestran que la ocurrencia de estos eventos, con intensidades mayores que 40 mm/día, es mucho menor que los otros (NSPI, NSPMI, NSMM30) , y que está del orden de 1 a 3 eventos al año, más de la mitad de los eventos que pueden llegar a presentarse con intensidades menores. Sin embargo, la ocurrencia y la espacialidad de estos eventos se presenta y se sigue presentando de acuerdo con lo observado en los anteriores índices, con frecuencias más altas de ocurrencia hacia los cerros y en el norte y más bajas en el occidente y sur occidente; sin embargo, la proporción en la ocurrencia de los eventos es hasta de 1 a 3, esto quiere decir que mientras que en el occidente, al año se presenta un evento con estas características en los cerros se presentan alrededor de 3 eventos. En la Figura No. 4-47 se puede observar la distribución espacial de este índice.

Para este índice no se considera necesario útil el cálculo de CV, ya que los valores son cercanos a cero y la magnitud del mismo será muy grande, perdiendo valor estadístico. En la Figura No. 4-48 se presenta la distribución espacial de la tendencia de este índice, encontrado que solo una estación tiene una tendencia negativa, La estación Sta María de

Usme, sin embargo, la tendencia positiva se sigue presentando con mayor intensidad en el centro y norte de la ciudad, como se observó en los anteriores 3 índices.



**Figura No. 4-46. Ejemplo de los resultados para el índice NSMM (40).**  
 (La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)

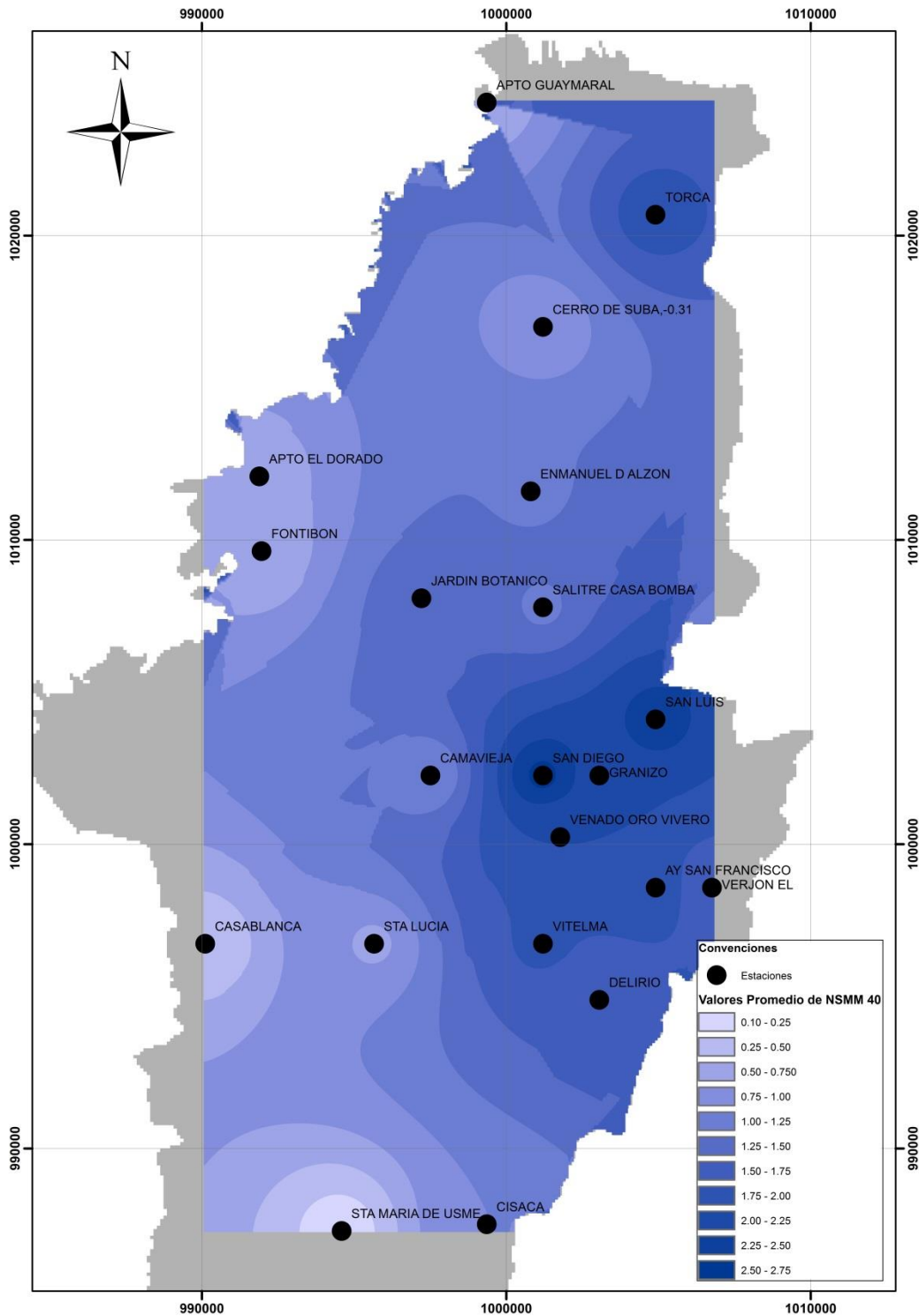


Figura No. 4-47. Distribución Espacial Promedio del Índice NSPM 40.

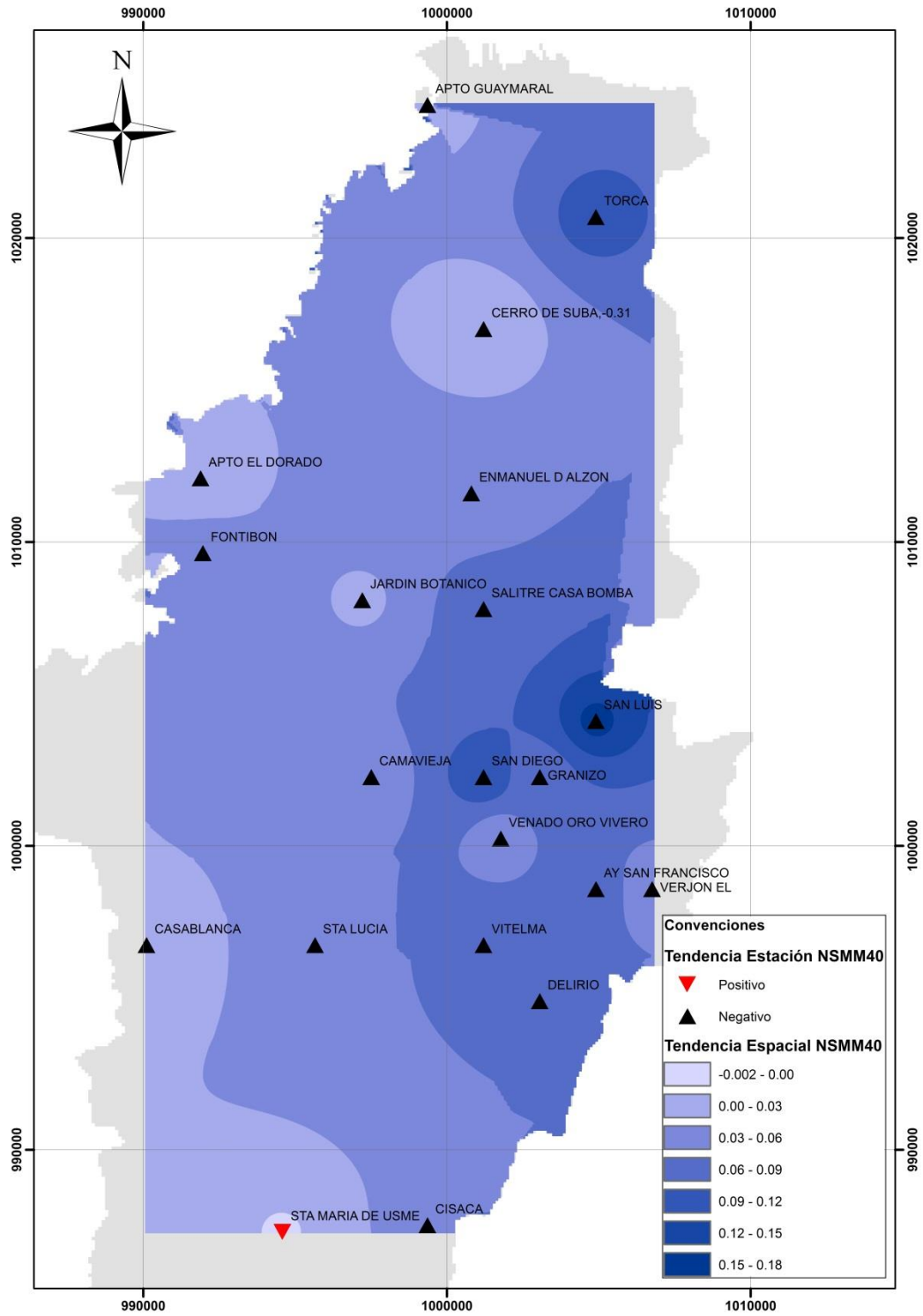
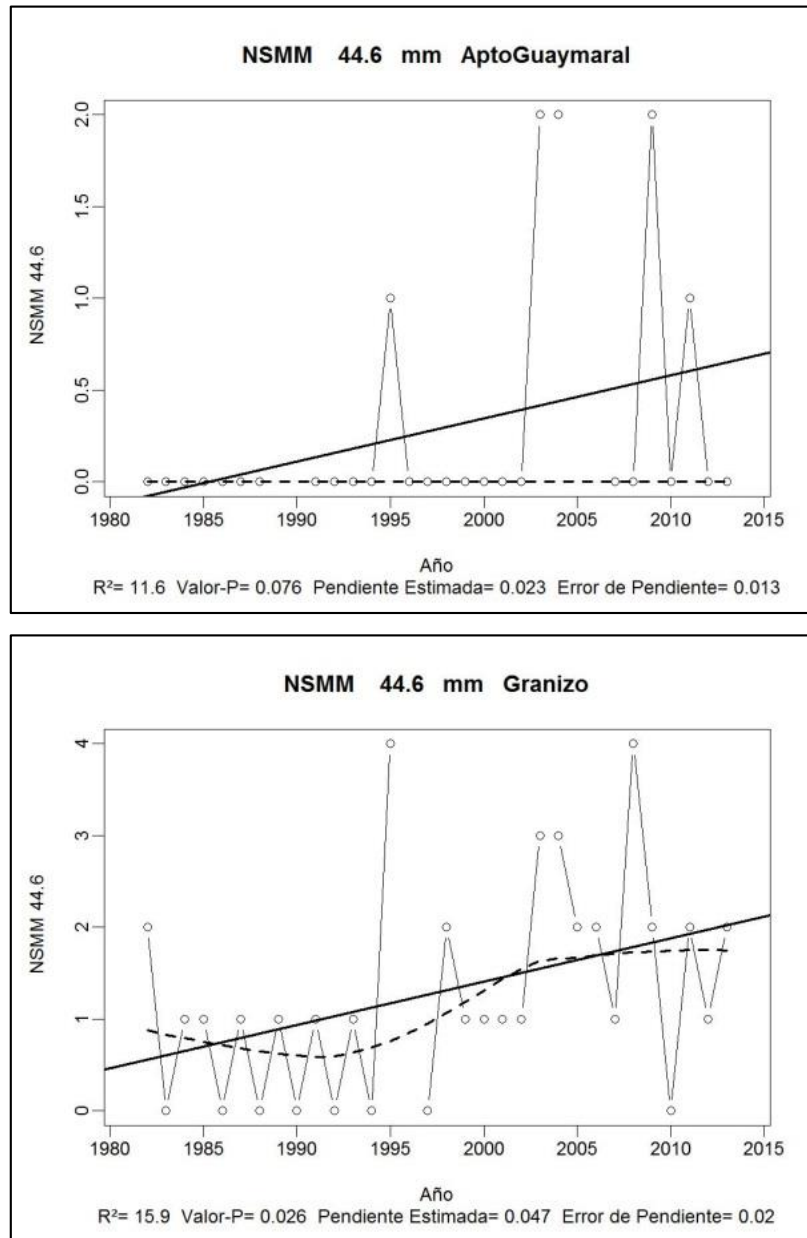


Figura No. 4-48. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice NSMM 40.

El duodécimo índice es el **número de días con precipitación muy intensa** (NSMM (44.6)). Este índice examina el comportamiento de la precipitación por encima de 44.6 mm. De acuerdo con el ajuste realizado se observa (ver Tabla No. 4-3) que en general hay una tendencia mixta, con predominancia a crecimiento, con una tendencia regional de 0.037 día/año, con rangos de crecimiento entre -0.003 y 0.110 día/año. Si bien existen tres estaciones con tendencia negativa (aproximadamente el 10 % de las estaciones, lo que se considera bajo), las restantes 18 estaciones presentan tendencia positiva, con valores de crecimiento mucho mayores a los valores de decrecimiento, por lo cual se puede decir que en general la mayoría de las estaciones presentan una tendencia positiva, esto quiere decir que el número de días con precipitación por encima de 44.6 mm en general ha aumentado, lo que está estrechamente ligado con el crecimiento de las precipitaciones extremas. En la Figura No. 4-49, se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos del estudio sobre el índice NSMM (44.6), en las estaciones de Aeropuerto Guaymaral y Granizo, donde se puede observar que las dos estaciones presentan una tendencia ascendente, la primera de ellas presentan un crecimiento del orden de 0.023 día/año, mientras que la segunda presenta un crecimiento del orden de 0.047 día/año.

El comportamiento espacial de esta variable es muy parecido al del undécimo índice; se puede observar una mayor frecuencia en la ocurrencia de estos eventos en el oriente de la ciudad en comparación con el occidente y sur occidente. En la Figura No. 4-50 se muestra el comportamiento espacial de este índice. Es importante aclarar que para este índice no se calculó el coeficiente de variación, debido a que hay puntos donde la ocurrencia en promedio de estos eventos es casi cero, y esto generaría valores muy altos y poco representativos de la dispersión o no de las muestras. Sin embargo, y de acuerdo con los resultados obtenidos del coeficiente de variación, se puede deducir que la dispersión de los datos para este índice puede llegar a ser grande. Figura No. 4-51 se presenta la distribución espacial de la tendencia de este índice, encontrado una tendencia de crecimiento hacia todo el sector oriental de la ciudad, mientras que hacia el sur occidente de la ciudad, la tendencia es de decrecimiento, finalmente, hacia el occidente se observa un ligero crecimiento del índice.



**Figura No. 4-49. Ejemplo de los resultados para el índice NPMM (44.6).**  
 (La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)

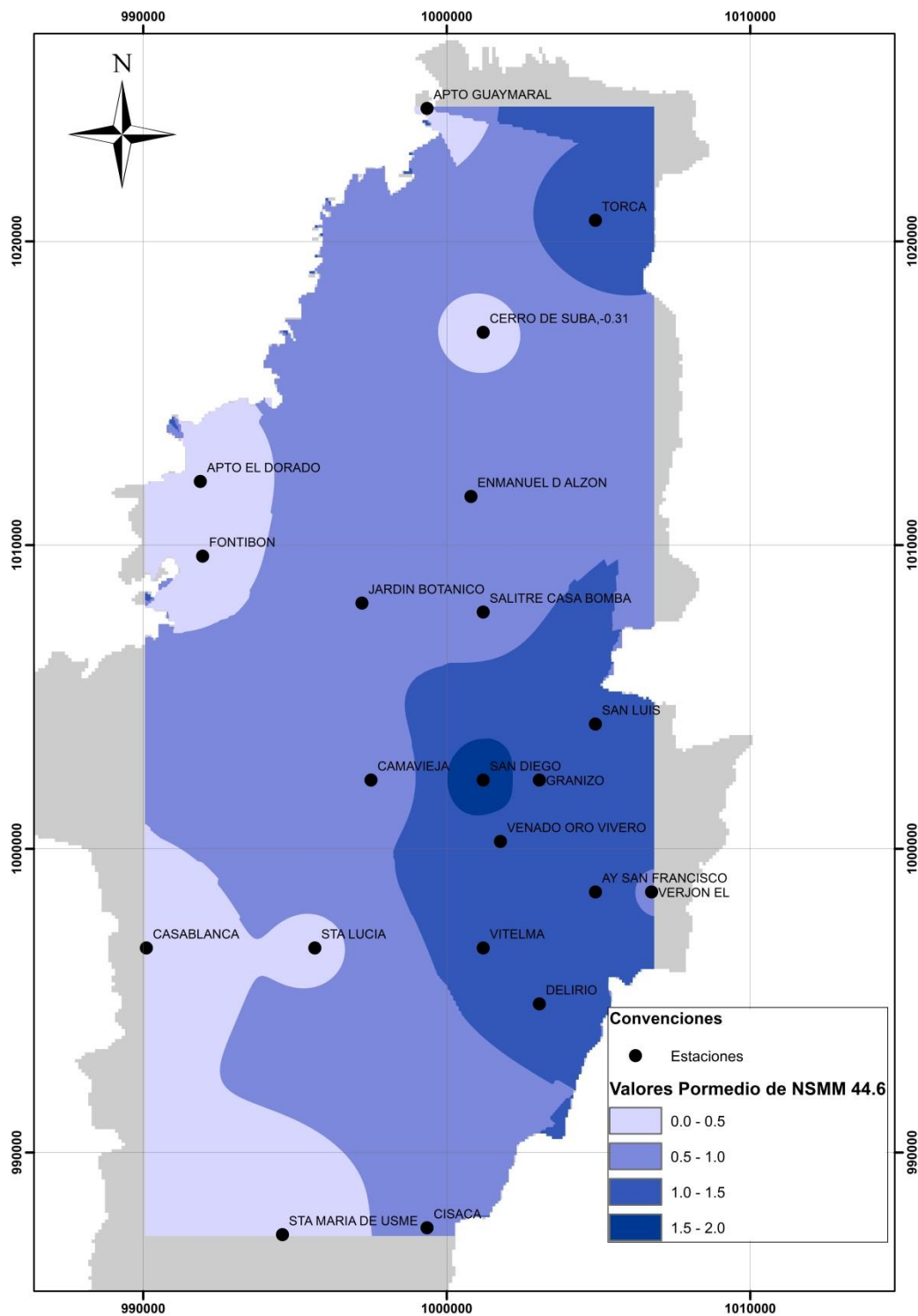


Figura No. 4-50. Distribución Espacial Promedio del Índice NSMM 44.6.



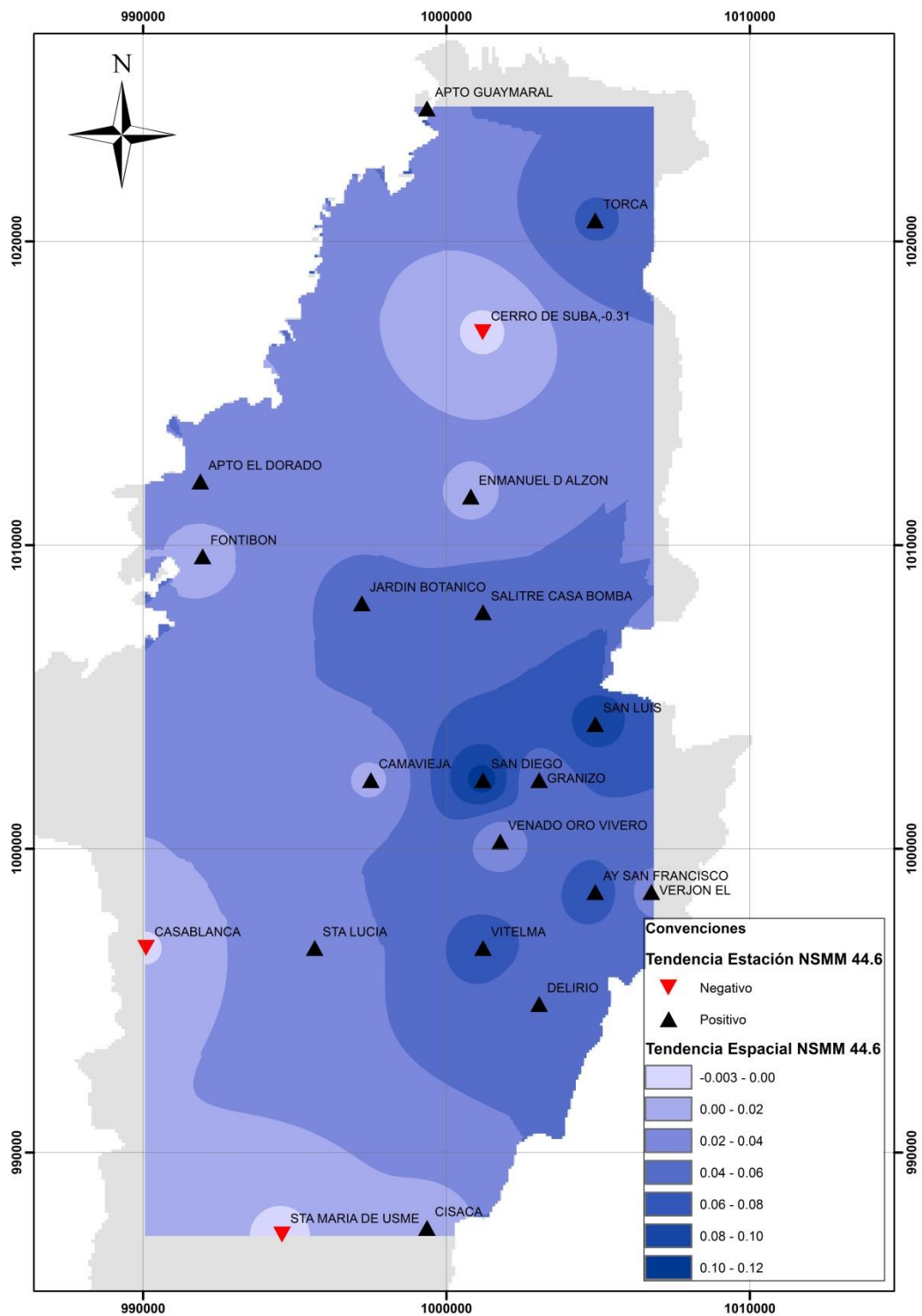
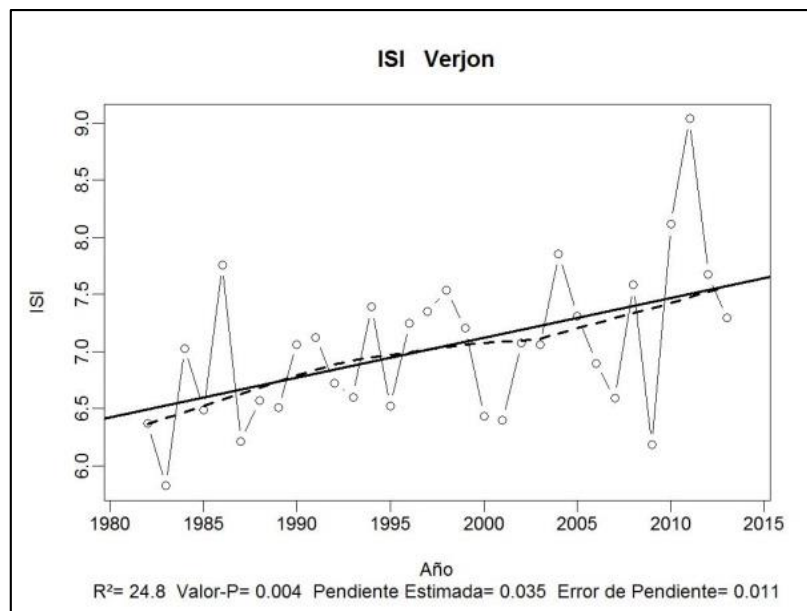
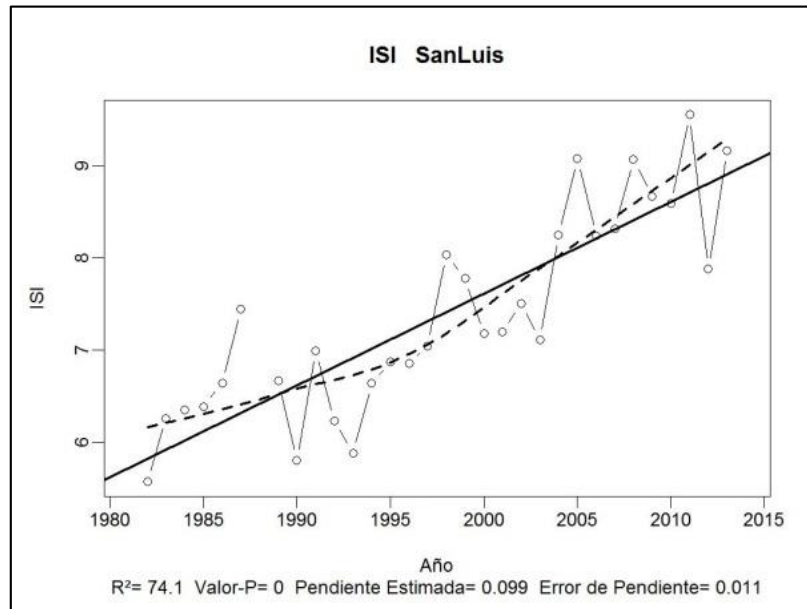


Figura No. 4-51. Distribución Espacial de la Tendencia del Índice NSMM 44.6.

El último índice analizado es la **precipitación anual total dividida entre el número de días húmedos (definidos por  $PRCP \geq 1.0\text{mm}$ ) (ISI)**, este índice evalúa cómo ha sido el comportamiento de la precipitación promedio diaria en días húmedos. De acuerdo con el ajuste realizado se observa (ver Tabla No. 4-3) que hay una tendencia positiva en todas las estaciones, con una tendencia regional de  $0.062 \text{ mm//día/año}$ , con rangos de crecimiento entre  $0.035$  y  $0.125 \text{ mm/día/año}$ . Adicionalmente se observa que todas las estaciones presentan una tendencia positiva, esto quiere decir que la precipitación promedio en días húmedos ha aumentado. En la Figura No. 4-52, se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos del estudio sobre el índice ISI, en las estaciones de Aeropuerto Guaymaral y Granizo, en donde se puede observar que las dos estaciones presentan una tendencia ascendente, la primera de ellas, presenta un crecimiento del orden de  $0.023 \text{ mm/día/año}$ , mientras que la segunda presenta un crecimiento del orden de  $0.047 \text{ mm/día/año}$ .

De acuerdo con la Figura No. 4-53, se puede observar que en los cerros la precipitación promedio para un día húmedo es mayor que en el norte de la ciudad, sin embargo, y a diferencia de lo observado para los otros índices, se puede afirmar que este tipo de precipitaciones son mayores en el centro oriente de la ciudad. Sin embargo, se observa que la diferencia entre un sector y el otro es muy pequeña. Mientras que en el norte el valor del índice ISI, está en el orden de 6, en el centro oriente de la ciudad alcanza valores de 8 y 9, si bien es 1.5 veces más grande, en términos absolutos, solo es de  $3 \text{ mm/día húmedo}$ .

Por otro lado, en la Figura No. 4-54 se presentan el coeficiente de variación, que nos muestra que la estación Camavieja, presentan una mayor dispersión que los otros índices, encontrando estaciones con una precisión aceptable, como es el caso de la estaciones Jardín Botánico, Ay San Francisco y El Verjón, otras con precisión regular, como el resto de la estaciones, con coeficientes de variación hasta del 20%. Los que quiere decir que los valores acá encontrados, pueden servir para encontrar un valor determinístico del crecimiento de este índice, sin embargo, debe manejarse con precaución.



**Figura No. 4-52. Ejemplo de los resultados para el índice ISI.**  
 (La línea negra continua corresponde a la regresión lineal, la línea negra discontinua representa el comportamiento que ha tenido la variable)

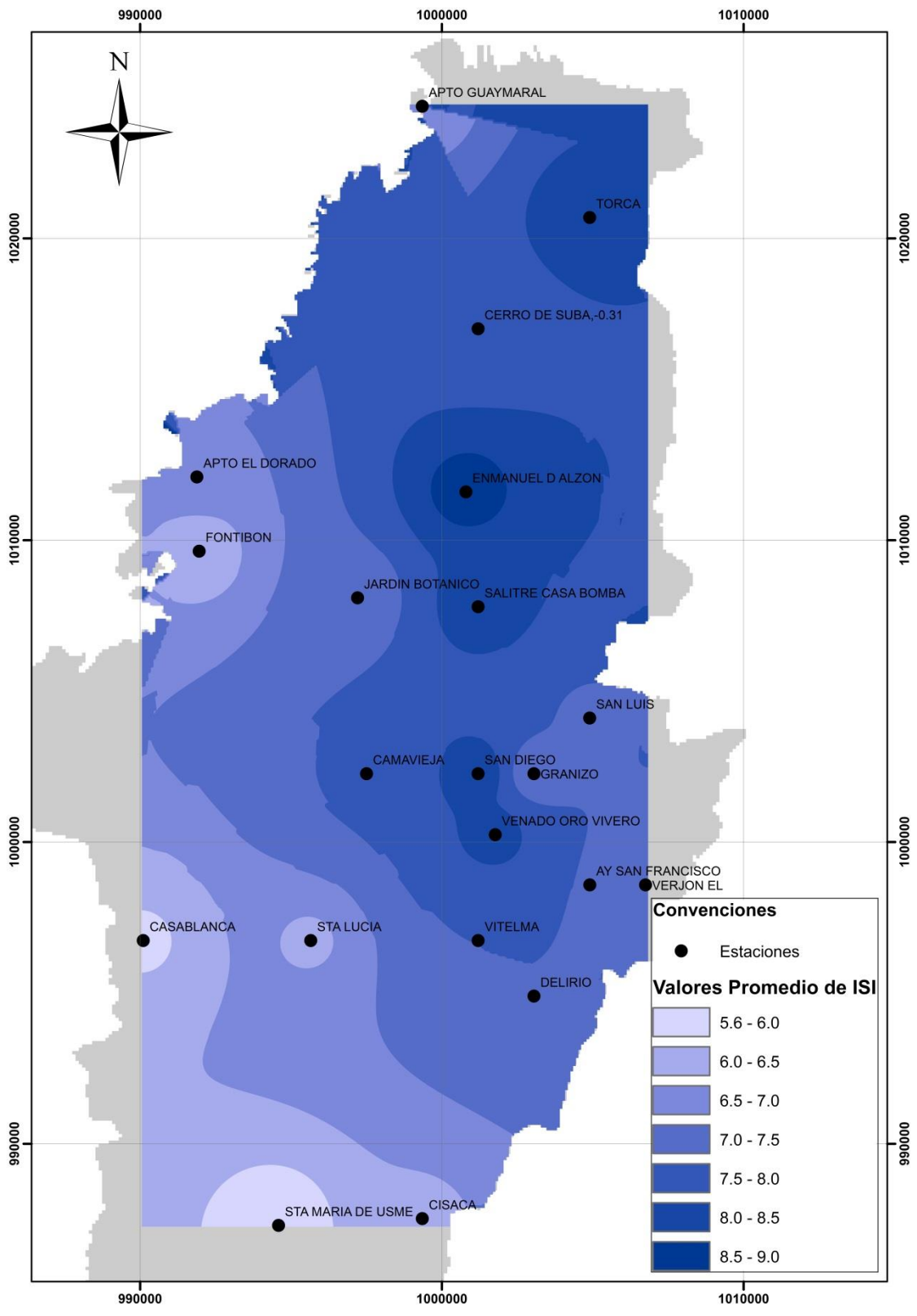
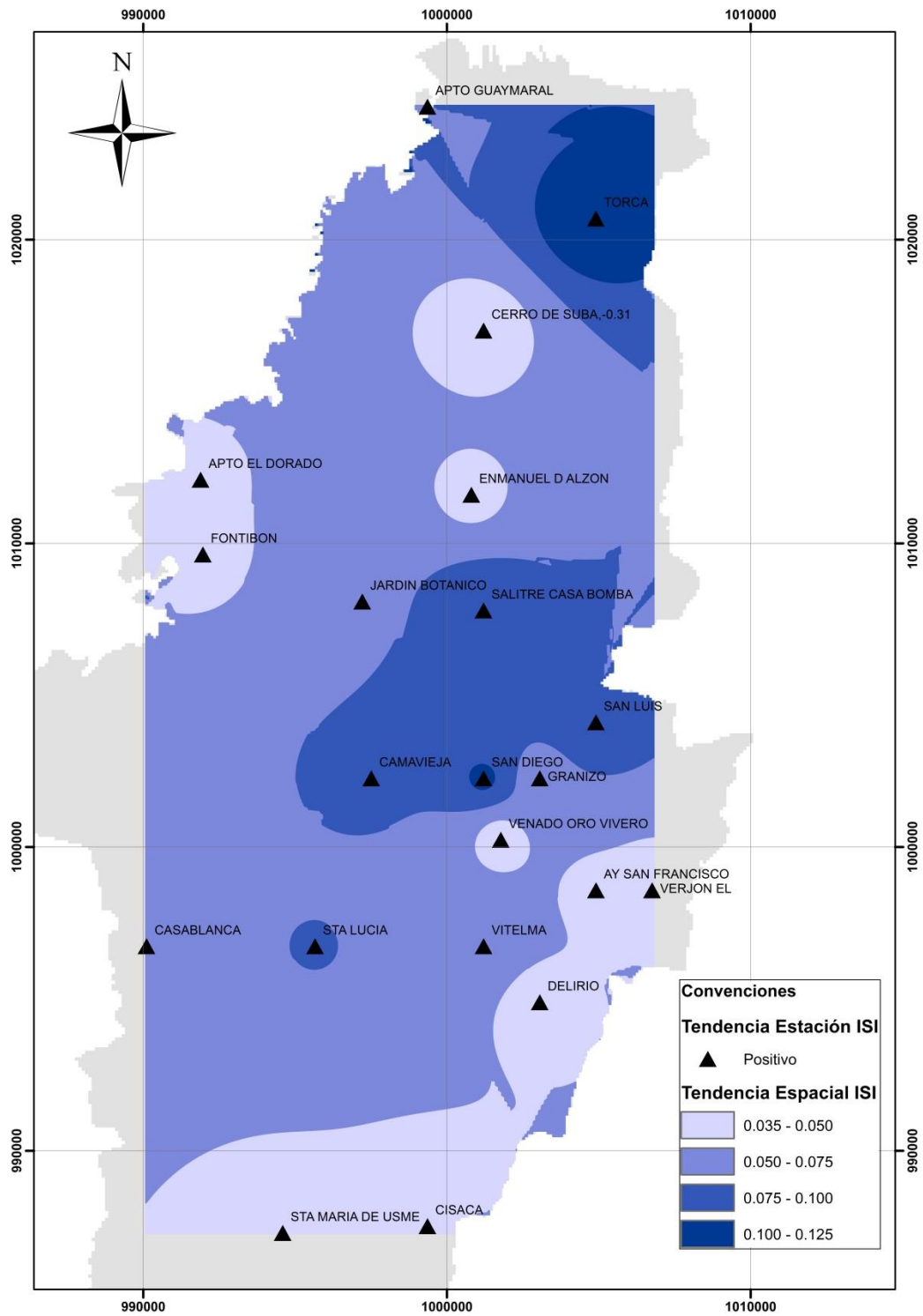


Figura No. 4-53. Distribución Espacial Promedio del Índice ISI



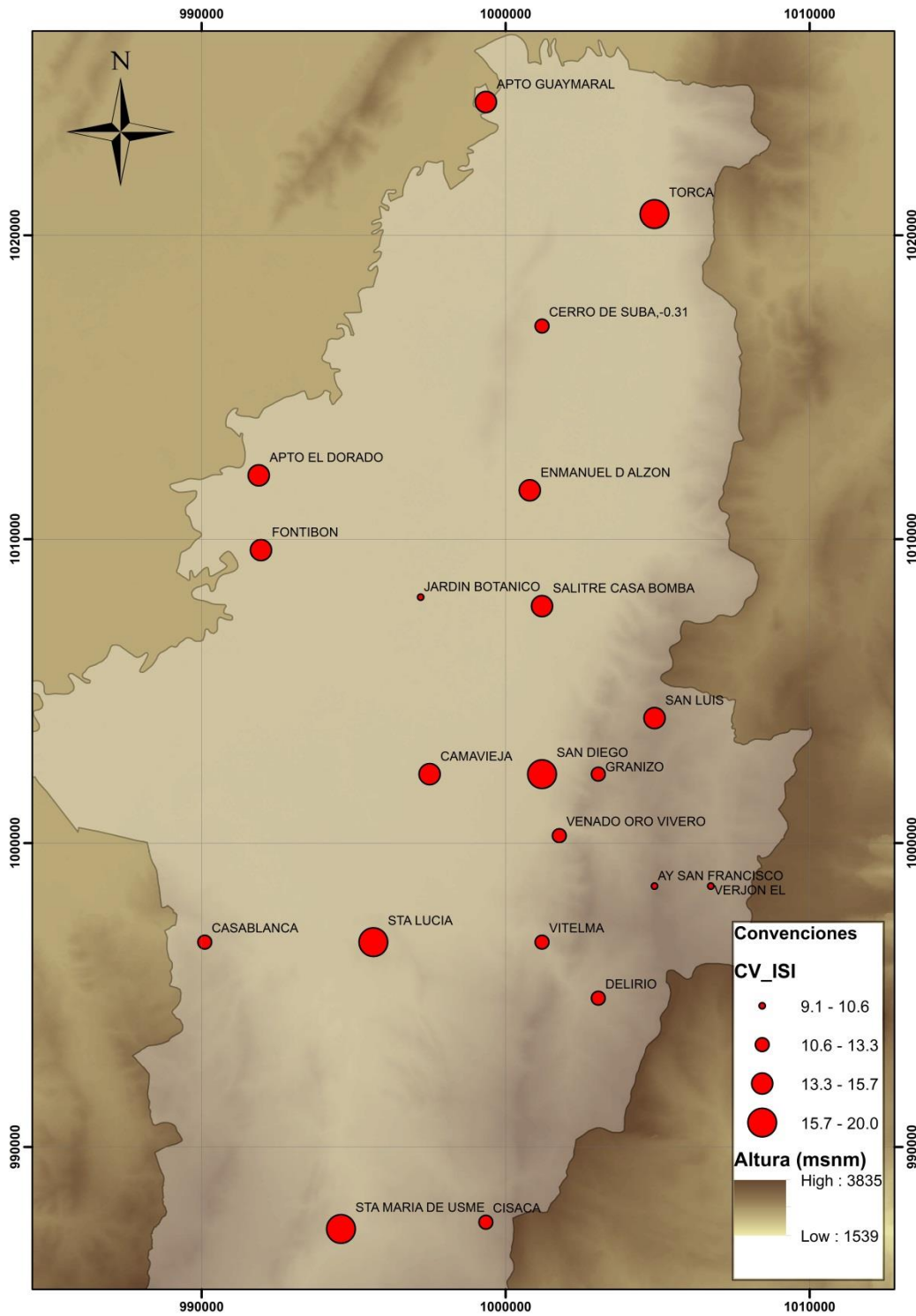


Figura No. 4-54. Coeficiente de Variación para el Índice ISI.

Las tendencias arriba descritas se han basado en regresiones lineales asumiendo una distribución normal (de la series obtenidas para los índices, las cuales son diferentes de las series de las estaciones) para calcular el valor de Probabilidad para cada una de las funciones estudiadas. En el Anexo F se presentan los resultados obtenidos para todos los índices en cada estación, mientras que en el Anexo G, se presenta las gráficas obtenidas para todos los índices en todas las estaciones.

### 4.2.3 Análisis Decadal de las Precipitaciones

El análisis decadal se realiza para tener en cuenta la estacionaridad de las series de precipitaciones analizadas, adicionalmente, nos ayuda tener puntos de comparación para poder detectar si existen cambios en el comportamiento de la variable a lo largo de toda la serie de tiempo.

El análisis decadal se realizó para los índices DMH, DEH, NSPI, NSPMI, NSMMM (30), NSMM (40) y NSMM (44.6), por ser estas las variables que están estrechamente ligadas con las precipitaciones extremas. En la Tabla No. 4-4, se presentan el promedio y la mediana de los valores (ya sea de precipitación o de números de eventos) para cada índice por década.

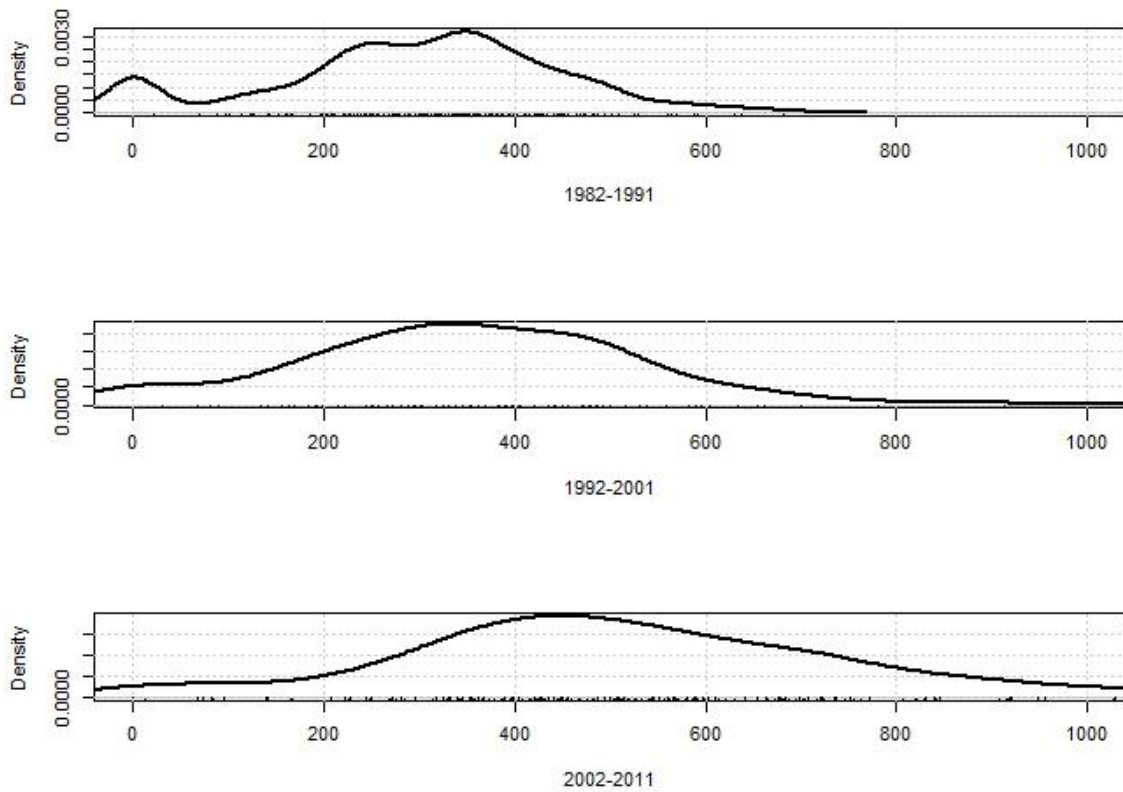
**Tabla No. 4-4. Promedio y Mediana para cada Índice investigado por Década**

índice	Unidades	Décadas					
		1982-1991		1992-2001		2002-2011	
		Prom.	Mediana	Prom.	Mediana	Prom.	Mediana
DMH	(mm)	333.13	333.90	380.20	363.35	540.10	511.50
DEH	(mm)	95.74	82.10	118.64	97.80	194.69	181.10
NSPI	(d)	22	23	25	25	34	34
NSPMI	(d)	7	7	8	8	12	11
NSMM(30)	(d)	2	2	3	2	5	4
NSMM(40)	(d)	1	0	1	1	2	2
NSMM(44.6)	(d)	0	0	1	0	1	1

El primer índice investigado a nivel decadal es el índice DMH. En la Figura No. 4-55, se puede observar que la función densidad de probabilidad para este índice, indica cómo ha ido aumentando la precipitación para lluvias mayores al percentil 95, en la primera década de estudio, entre 1982 y 1992. El índice presenta un valor promedio de 333.13 mm/año, mientras que la mediana es de 333.90 mm/año; para la década entre 1992 y 2001, el índice presenta un promedio de 380.20 mm/año y una mediana de 363.36 mm/año; para la década entre 2002 y 2011 se observa que el promedio es igual a 540.10 mm/año y la mediana es igual a 511.50 mm/año. Analizando el comportamiento de este índice, se observa que existe una tendencia de crecimiento de la precipitación por encima de percentil 95%, y que la curva de densidad se va desplazando hacia la derecha.

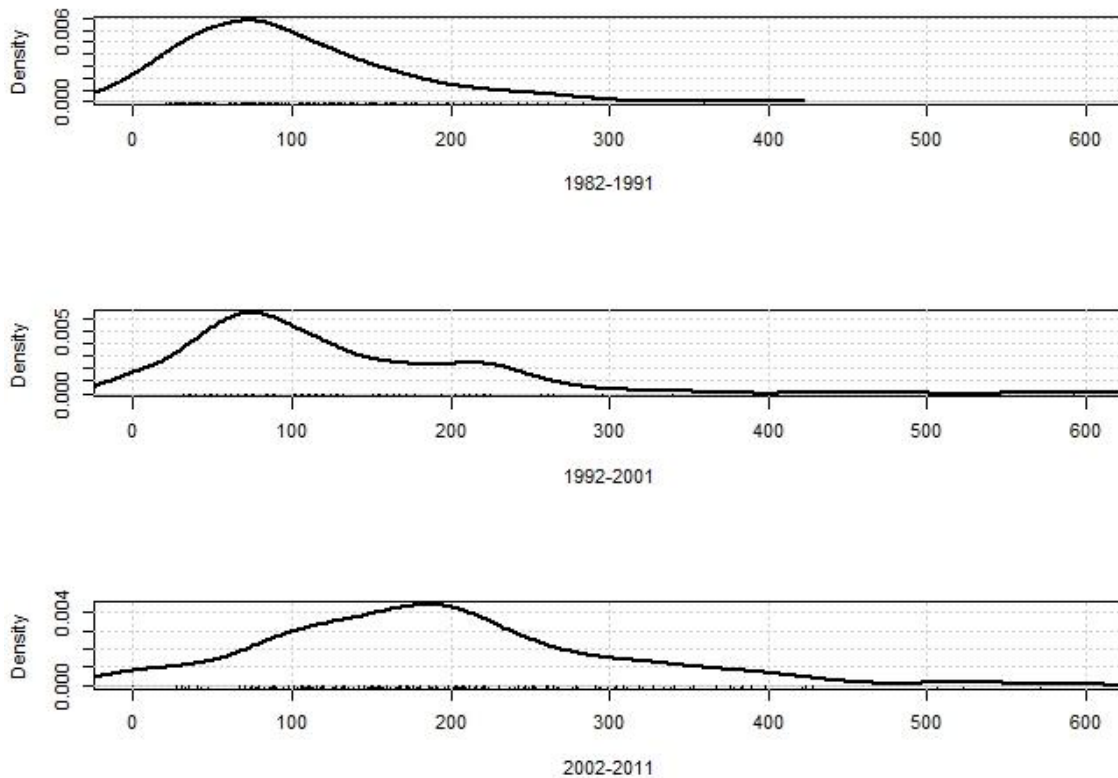
El segundo índice que se evaluó a nivel decadal es el índice DEH. En la Figura No. 4-56, se puede observar que para la década entre 1982 y 1991, el promedio del índice se encontraba igual a 95.74 mm/año, mientras que para la década ente 1992 y 2001 el promedio era igual a 118.64 mm/año, para la década entre 2002 y 2011 el promedio era igual a 181.10 mm/año, siempre en aumento.





**Figura No. 4-55. Análisis decadal de la Función de Densidad de Probabilidad para el índice DMH. (Los Valores del Eje x están en mm)**

Sin embargo, la función densidad de probabilidad decadal para este índice, mostrada en la Figura No. 4-56, no indica una clara tendencia de que las precipitaciones intensas hayan aumentado en los últimos 30 años.



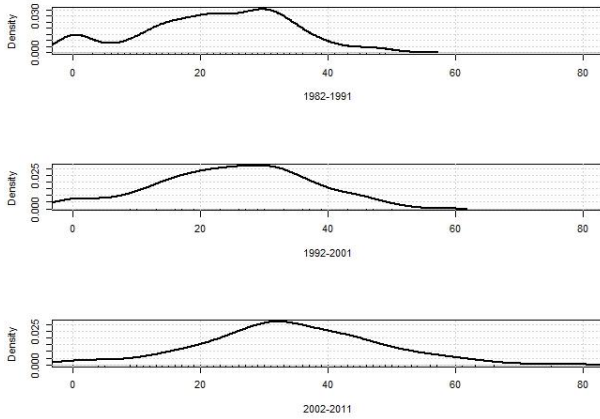
**Figura No. 4-56. Análisis decadal de la Función de Densidad de Probabilidad para el índice DEH. (Los Valores del Eje x están en mm)**

Ahora bien, si se analiza la tendencia de las curvas de la función densidad de probabilidad para el número de días con precipitaciones por encima de 10, 20, 30, 40 y 44.6 mm/d, se encuentra que la tendencia en la ocurrencia de estos eventos ha venido aumentando en las últimas décadas, tal como se puede observar en la Figura No. 4-57.

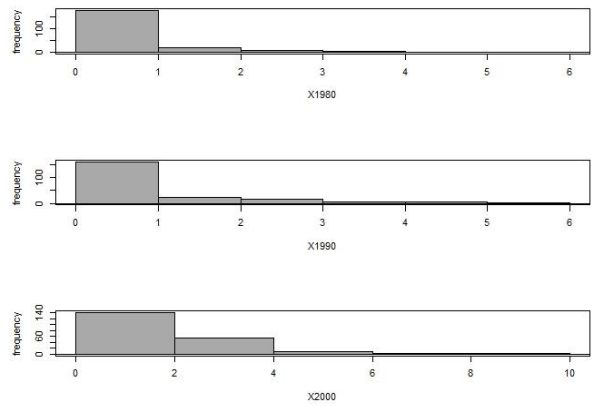
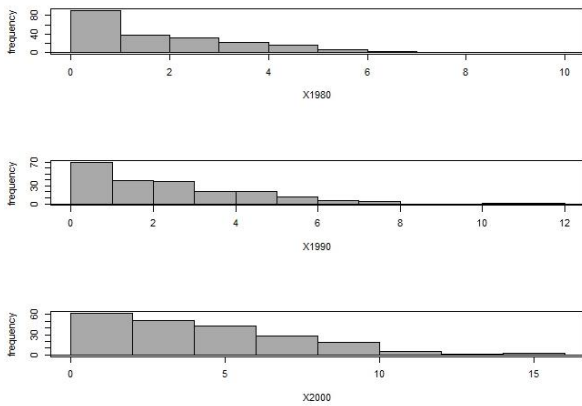
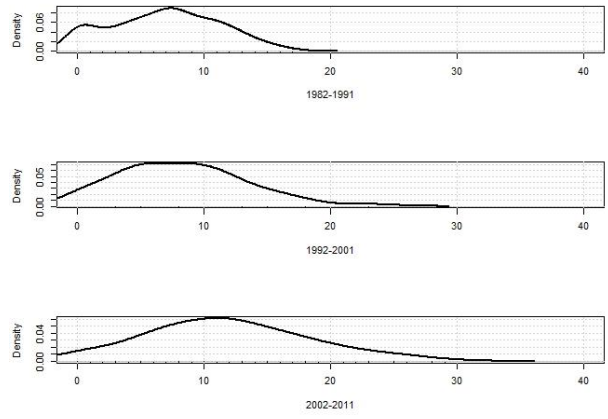
En las figuras de densidad para los índices NPSI y NPSMI, la función ha venido desplazándose hacia la derecha, lo que quiere decir que es más frecuente la ocurrencia de precipitaciones intensas en la ciudad.

En la década entre 1982 y 1991, por año se presentaban en promedio 22 días con precipitaciones por encima de los 10 mm, sin embargo para la década de 1992 a 2001, estos eventos se presentaron en promedio 25 veces.

**(a) Función de Densidad NPSI.**



**(b) Función de Densidad NPSMI.**

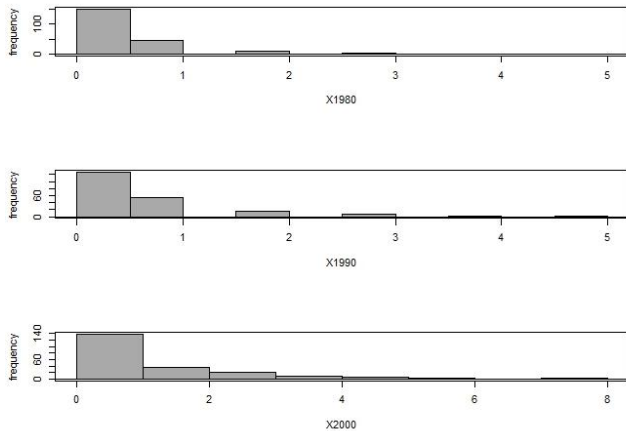


**(c) Histograma de Frecuencia Índice NSMM(30)**

**(d) Histograma de Frecuencia Índice NSMM(40)**

**Figura No. 4-57. Funciones de Densidad Para los índices NPSI y NPSMI, e Histogramas de Frecuencia para Índices NSMM (30), NSMM (40) y NSMM (44.6). (Los Valores del Eje x están en No. De días)**

**(e) Histograma de Frecuencia Índice NSMM(44.6)**



**Figura No. 4-45. (Continua)**

Para la década entre 2002 a 2011, se registraron en promedio 34 días con precipitación por encima de este valor (10 mm).

De igual manera, en la década entre 1982 y 1991, por año se presentaban en promedio 7 días de precipitaciones por encima de los 20 mm, en la década de 1992 a 2001, estos eventos se presentaron en promedio 8 veces. Para la década entre 2002 a 2011, se registraron en promedio 12 eventos de precipitación por encima de este valor.

El número de días con precipitaciones por encima de los 30 mm, en promedio fue de 2 en la década de 1982 a 1991, con una mediana de 2, en la década de 1992 a 2001, estos eventos se presentaron en promedio 3 veces con una mediana de 2. Para la década entre 2002 a 2011, se registraron en promedio 5 eventos de precipitación por encima de este valor con una mediana de 4.

En el caso de días con precipitaciones por encima de los 44.6 mm se puede observar que existe una leve tendencia a que se presenten cada vez más eventos de esta magnitud, sin que su frecuencia llegue a ser importante, sin embargo, la tendencia indica que este tipo de eventos se presentarán con mayor frecuencia.

#### 4.2.4 Análisis de tendencias de los índices por el Método de Mann Kendall

El análisis de tendencias por este método se realizó para cada índice, de cada estación, encontrando así un valor de los dos parámetros  $\tau$  y P, para cada índice de cada una de las 21 estaciones objeto de estudio.

Una vez realizado el análisis de tendencia por el método de Mann Kendall, se han obtenido los resultados para cada uno de los índices de cada estación presentados en el Anexo H, mientras que en la Tabla No. 4-5 se presentan los promedios y las medianas para cada índice, calculados a partir de los resultados de cada estación. Estos resultados sugieren que la tendencia en promedio de todos los índices es creciente, con mayor intensidad en los índices de NSPMI, NSPI y NSMM (30), que presentan los menores valores de P, lo que indica un mayor crecimiento.

**Tabla No. 4-5. Resumen de Parámetros Análisis de Tendencias en los índices seleccionados a escala decadal por el Método Mann Kendall**

Índice	Parámetro	Promedio	Mediana
DMH	Tao ( $\tau$ )	0.37	0.39
	Valor P	0.050	0.002
DEH	Tao ( $\tau$ )	0.11	0.12
	Valor P	0.298	0.181
NSPI	Tao ( $\tau$ )	0.35	0.37
	Valor P	0.072	0.004
NSPMI	Tao ( $\tau$ )	0.34	0.35
	Valor P	0.066	0.006
NSMM(30)	Tao ( $\tau$ )	0.31	0.33
	Valor P	0.086	0.013
NSMM(40)	Tao ( $\tau$ )	0.36	0.37
	Valor P	0.051	0.004
NSMM(44.6)	Tao ( $\tau$ )	0.24	0.26
	Valor P	0.222	0.079

#### 4.2.5 Análisis de tendencias de los índices por el Método de ARMA

Los resultados de la tendencia de los índices por el método ARMA, arrojaron muy malos resultados, ya que los ajustes realizados no son lo suficientemente buenos como para poder tener una idea clara de la tendencia de los índices por este método. Se puede observar en la Tabla No. 4-6, que los coeficientes de correlación obtenidos en promedio son muy bajos, del orden de 0.1. En el Anexo I se presentan todos los resultados obtenidos por este método, así como los valores del orden de ARMA ajustados a cada uno de los índices y para cada estación.

Tabla No. 4-6. Resumen de  $R^2$  Calculado por el Método ARMA

Índice	Promedio	Mediana
DMH	0.086	0.100
DEH	0.117	0.046
NSPI	0.026	0.061
NSPMI	0.155	0.190
NSMM (30)	0.070	0.000
NSMM(40)	0.180	0.192
NSMM(44.6)	0.080	0.000

#### 4.2.6 Análisis de tendencia de los índices por el Método Spearman

Al igual que para el método de Mann Kendall, se puede observar que para este método la tendencia en promedio para todos los índices analizados es positiva, con una mayor relevancia para los índices NSMM (40), NSPMI Y NSPI. Sin embargo, por este método, se encontró que el índice de NSMM (40) crece con mayor intensidad que el índice NSPMI, el cual fue el que determinó el método de Mann Kendall que era el que más crecía. En el Anexo J se presentan todos los resultados obtenidos del presente análisis, para cada una de las estaciones y para cada uno de los índices.

**Tabla No. 4-7. Resumen de Parámetros por el Método Spearman**

Índice	Parámetro	Promedio	Mediana
DMH	rho ( $\rho$ )	0.53	0.55
	Valor P	0.022	0.001
DEH	rho ( $\rho$ )	0.43	0.41
	Valor P	0.046	0.011
NSPI	rho ( $\rho$ )	0.48	0.52
	Valor P	0.034	0.001
NSPMI	rho ( $\rho$ )	0.47	0.47
	Valor P	0.032	0.003
NSMM(30)	rho ( $\rho$ )	0.42	0.41
	Valor P	0.041	0.010
NSMM(40)	rho ( $\rho$ )	0.48	0.51
	Valor P	0.024	0.002
NSMM(44.6)	rho ( $\rho$ )	0.31	0.32
	Valor P	0.155	0.035

### 4.3. Análisis de Frecuencia de la Precipitación en Bogotá

Se analizó la frecuencia en la precipitación máxima en 24 horas con el objetivo de ver el comportamiento de la precipitación para diferentes periodos de retorno, considerando diferentes décadas y de esta manera comprender las implicaciones de diseñar sin tener en cuenta la evolución y el incremento en las precipitaciones en los últimos años en la ciudad.

El análisis se hizo comparando el comportamiento de la precipitación a nivel decadal. Entre 1982-1991, 1992-2001 y 2002-2011. Adicionalmente, se analizó la frecuencia teniendo en cuenta todo el periodo de registro. El análisis de frecuencia se ajustó a las distribuciones de probabilidad Normal, Gumbel, Pearson Tipo III, Log – Pearson Tipo III, Log – Normal y EV3. A continuación se presentan los resultados obtenidos para la estación Delirio.

Tabla No. 4-8. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (1982-1991)

Tr años	NORMAL mm	GUMBEL mm	PEARSON mm	LOG-PEAR mm	LOG-NOR mm	EV3 mm
2	37.1	36.2	35.6	35.7	36.5	35.5
2.5	38.8	38.3	37.3	37.3	38.2	37.2
3.33	40.6	40.9	39.2	39.2	40.1	39.2
5	42.8	44.3	41.9	41.7	42.5	42.0
10	45.8	49.6	46.1	46.0	46.0	46.3
20	48.2	54.8	50.1	50.2	49.2	50.4
50	51.0	61.4	55.3	56.0	52.9	55.4
100	52.9	66.4	59.2	60.6	55.6	59.1
<b>chi 2</b>	<b>1.6</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>	<b>1.3</b>

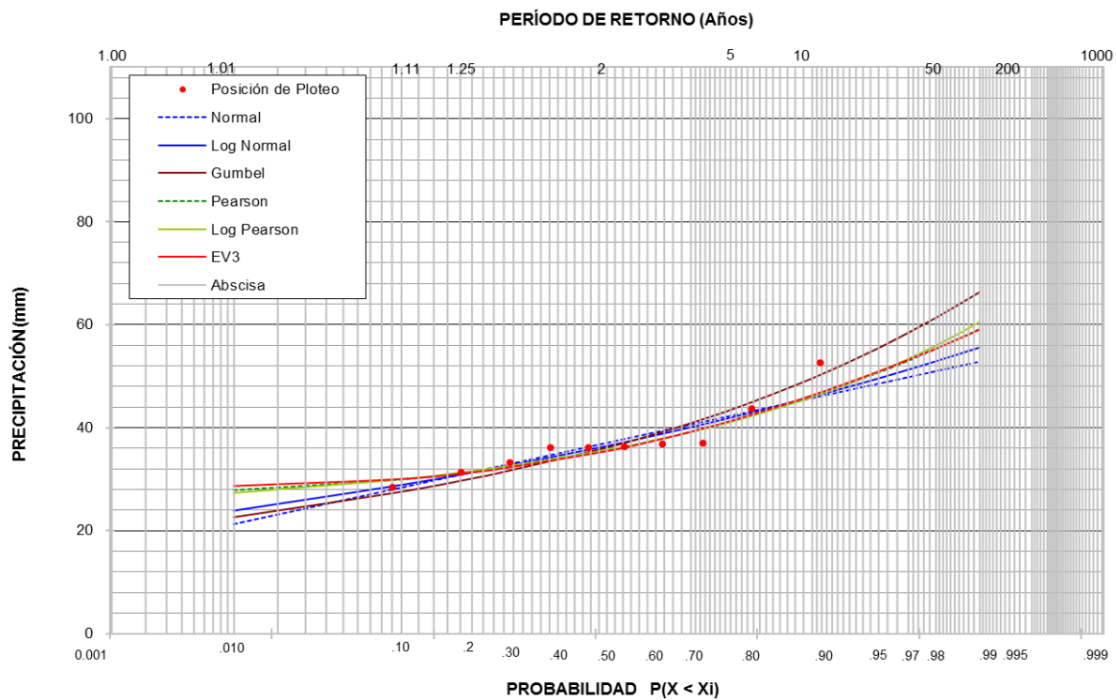


Figura No. 4-58. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (1982-1991)



Se realizó la prueba de  $\chi^2$  para identificar cual es la distribución con mejor ajuste, encontrando que la distribución Gumbel es la distribución que mejor se ajusta para todas las décadas y para todo el periodo de registro.

Tabla No. 4-9. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (1991-2001)

Tr años	NORMAL mm	GUMBEL mm	PEARSON mm	LOG-PEAR mm	LOG-NOR mm	EV3 mm
2	46.8	45.6	45.4	45.2	46.0	45.2
2.5	49.0	48.4	47.6	47.4	48.2	47.6
3.33	51.4	51.8	50.2	49.9	50.7	50.3
5	54.3	56.2	53.5	53.2	53.9	53.8
10	58.2	63.2	58.7	58.6	58.5	59.0
20	61.4	70.0	63.4	63.9	62.7	63.7
50	65.1	78.7	69.3	70.9	67.7	69.3
100	67.5	85.2	73.5	76.4	71.2	73.2
<b>chi 2</b>	<b>1.3</b>	<b>0.6</b>	<b>0.9</b>	<b>0.9</b>	<b>1.0</b>	<b>0.8</b>

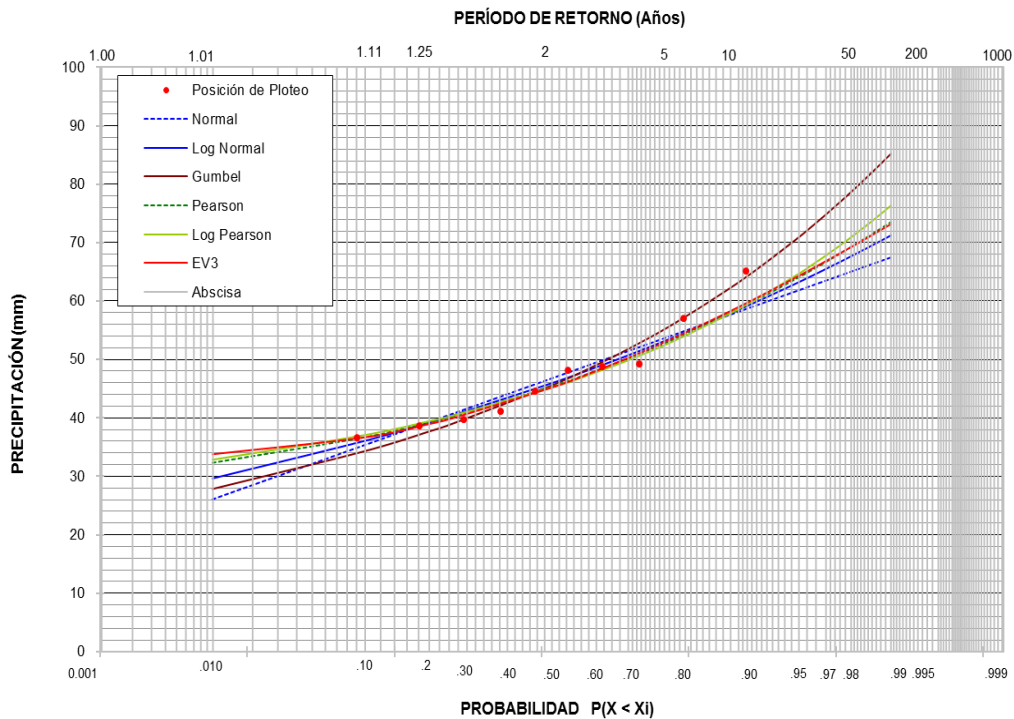


Figura No. 4-59. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (1991-2001)

Tabla No. 4-10. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (2001-2011)

Tr años	NORMAL mm	GUMBEL mm	PEARSON mm	LOG-PEAR mm	LOG-NOR mm	EV3 mm
2	57.8	56.0	55.9	55.7	56.4	55.6
2.5	61.2	60.3	59.2	58.9	59.7	59.1
3.33	64.8	65.3	63.0	62.7	63.4	63.2
5	69.0	71.9	68.0	67.7	68.2	68.3
10	74.8	82.3	75.5	75.6	75.3	76.0
20	79.7	92.4	82.5	83.3	81.8	82.9
50	85.1	105.4	91.0	93.4	89.8	91.0
100	88.7	115.2	97.2	101.1	95.5	96.6
<b>chi 2</b>	<b>1.8</b>	<b>0.7</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>	<b>1.4</b>	<b>1.2</b>

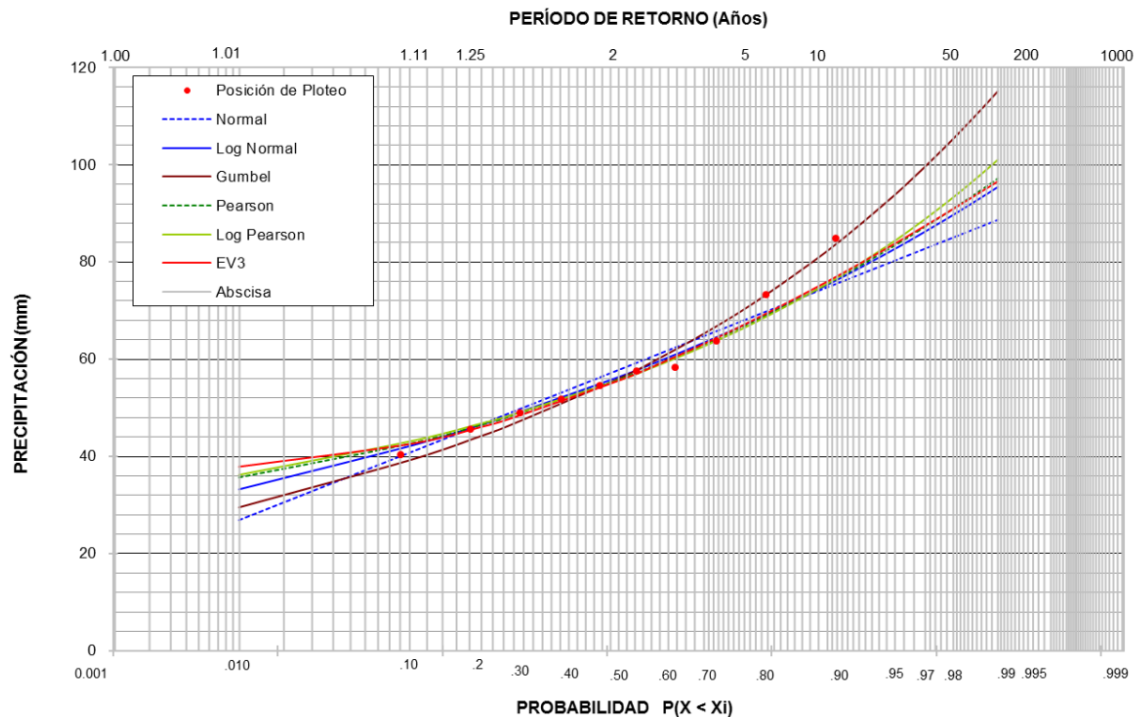


Figura No. 4-60. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (2001-2011)

Tabla No. 4-11. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (1982-2011)

Tr años	NORMAL mm	GUMBEL mm	PEARSON mm	LOG-PEAR mm	LOG-NOR mm	EV3 mm
2	47.2	45.3	45.0	44.9	45.6	44.8
2.5	50.5	48.8	48.3	48.0	48.8	48.2
3.33	54.0	53.0	52.0	51.6	52.4	52.1
5	58.1	58.5	56.9	56.4	57.1	57.2
10	63.8	67.2	64.5	64.3	64.3	65.0
20	68.5	75.6	71.6	71.9	70.9	72.0
50	73.8	86.4	80.4	82.2	79.2	80.5
100	77.4	94.5	86.9	90.1	85.2	86.4
<b>chi 2</b>	<b>7.6</b>	<b>1.7</b>	<b>2.1</b>	<b>2.0</b>	<b>2.6</b>	<b>1.9</b>

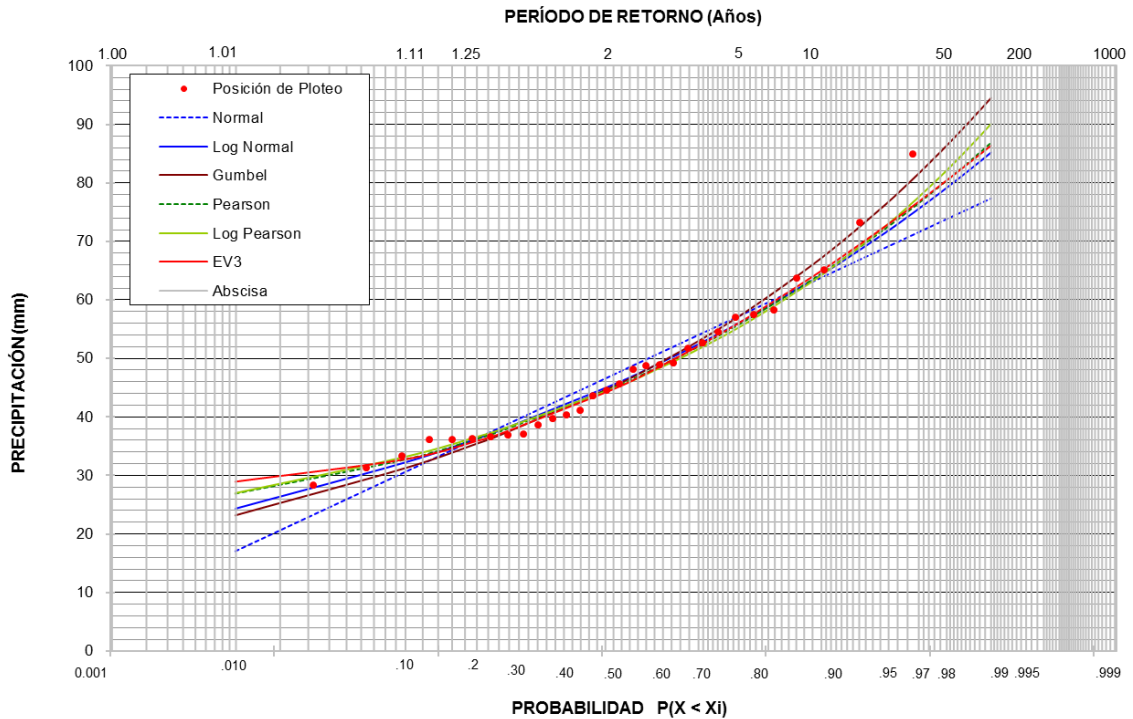


Figura No. 4-61. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación Delirio, (1982-2011)

Adicionalmente, fue posible observar que la tendencia en las frecuencias de las precipitaciones máximas en 24 horas va en aumento para todas las estaciones. En el caso concreto de la estación Delirio la precipitación aumentó, entre cada una de las décadas analizadas. Por ejemplo, para la primera década, asumiendo la distribución Gumbel, la precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años era de 66.4 mm, mientras que para la segunda década, y para el mismo periodo de retorno era igual a 85.2 mm, y finalmente, para la última década el ajuste propone una precipitación de 115.2 mm, bastante grande. Sin embargo, asumiendo todo el periodo de registro de estudio, entre 1982 y 2013, para la misma distribución probabilística y para el periodo de retorno, la precipitación es igual a 94.5 mm. De estas gráficas se puede observar que la frecuencia de las precipitaciones ha venido aumentando a una tendencia de 2.44 mm/año, una tasa de crecimiento bastante importante, y muy significativa a la hora de realizar el dimensionamiento de las estructuras de drenaje de la ciudad. En la Tabla No. 4-12, Tabla No. 4-13 y Tabla No. 4-14 se presentan los valores promedios para cada una de las décadas y para todo el periodo de registro, ponderando los resultados obtenidos para cada una de las estaciones.

**Tabla No. 4-12. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Promedio Estaciones, (1982-1991)**

Tr años	NORMAL mm	GUMBEL mm	PEARSON mm	LOG-PEAR mm	LOG-NOR mm	EV3 mm
2	40.9	39.6	40.3	40.0	39.7	40.1
2.5	43.3	42.9	42.6	42.4	42.0	42.6
3.33	45.8	46.7	45.2	45.0	44.7	45.3
5	48.9	51.7	48.4	48.4	48.1	48.6
10	53.0	59.7	53.0	53.4	53.4	53.3
20	56.5	67.3	57.1	58.0	58.2	57.4
50	60.4	77.3	62.0	63.9	64.1	62.2
100	63.0	84.7	65.4	68.2	68.5	65.4

---

Tabla No. 4-13. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Promedio Estaciones, (1991-2001)

Tr años	NORMAL mm	GUMBEL mm	PEARSON mm	LOG- PEAR mm	LOG-NOR mm	EV3 mm
2	43.8	42.2	42.3	42.0	42.2	42.2
2.5	46.7	46.0	45.1	44.7	45.0	45.1
3.33	49.8	50.5	48.4	47.9	48.3	48.5
5	53.5	56.4	52.5	52.2	52.5	52.7
10	58.6	65.8	58.8	59.1	59.0	59.1
20	62.9	74.8	64.6	65.9	65.1	64.8
50	67.6	86.5	71.8	75.4	72.7	71.8
100	70.8	95.3	77.0	83.0	78.4	76.7

Tabla No. 4-14. Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Promedio Estaciones, (2001-2011)

Tr años	NORMAL mm	GUMBEL mm	PEARSON mm	LOG- PEAR mm	LOG-NOR mm	EV3 mm
2	50.5	48.4	48.4	48.3	48.3	48.3
2.5	54.3	53.3	52.0	51.8	51.9	52.0
3.33	58.4	59.0	56.2	56.0	56.2	56.3
5	63.2	66.5	61.5	61.4	61.7	61.8
10	69.8	78.5	69.8	70.1	70.3	70.2
20	75.3	90.0	77.6	78.6	78.3	77.8
50	81.5	104.8	87.3	90.3	88.5	87.2
100	85.6	116.0	94.5	99.7	96.1	94.0

De este análisis se encontró que las intensidades en promedio entre la década de 1982-1991 a la década de 1992-2001 aumentaron en un 10%, mientras que entre la segunda década y la tercera (2002-2011) aumentaron un 18%, así mismo, se encontró que en términos generales las mejores distribuciones probabilísticas son la Gumbel y la EV3. Los resultados obtenidos para cada una de las estaciones para este análisis se presentan en el Anexo K.

**Tabla No. 4-15. Mejores Distribuciones Probabilísticas para cada Una de las Estaciones**

ESTACIÓN	DÉCADA			
	1982-1991	1992-2001	2002-2011	1982-2011
APTO_DORADO	NORMAL	EV3	EV3	LOG-PEAR
APTO_GUAYMARAL	GUMBEL	GUMBEL	EV3	NORMAL
AY_SAN_FRANCISCO	EV3	EV3	LOG-PEAR	EV3
CAMAVIEJA	GUMBEL	EV3	GUMBEL	NORMAL
CASABLANCA	GUMBEL	GUMBEL	EV3	EV3
CERRODESUBA	GUMBEL	GUMBEL	EV3	GUMBEL
CISACA	GUMBEL	GUMBEL	GUMBEL	NORMAL
DELIRIO	GUMBEL	GUMBEL	GUMBEL	GUMBEL
EMMANUELDALZON	EV3	GUMBEL	LOG-PEAR	GUMBEL
FONTIBON	GUMBEL	GUMBEL	EV3	GUMBEL
GRANIZO	EV3	GUMBEL	EV3	LOG-PEAR
JARDINBOTANICO	LOG-PEAR	EV3	EV3	GUMBEL
SALITRE	EV3	LOG-PEAR	GUMBEL	EV3
SANDIEGO	EV3	LOG-PEAR	EV3	EV3
SANLUIS	EV3	LOG-PEAR	GUMBEL	PEARSON
STALUCIA	GUMBEL	LOG-PEAR	GUMBEL	GUMBEL
STAMARIAUSME	GUMBEL	EV3	EV3	LOG-PEAR
TORCA	GUMBEL	EV3	EV3	GUMBEL
VENADO	LOG-PEAR	EV3	LOG-PEAR	LOG-NOR
VERJON	GUMBEL	EV3	GUMBEL	LOG-PEAR
VITELMA	GUMBEL	EV3	EV3	GUMBEL

**Tabla No. 4-16. . Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 Horas – Promedio Estaciones, (1982-2011)**

Tr años	NORMAL mm	GUMBEL mm	PEARSON mm	LOG-PEAR mm	LOG-NOR mm	EV3 mm
2	45.1	43.1	42.8	43.2	43.2	42.6
2.5	48.5	46.8	46.0	46.4	46.5	46.0
3.33	52.2	51.2	49.9	50.1	50.3	50.1
5	56.5	56.9	55.0	54.9	55.2	55.3
10	62.4	66.1	62.9	62.5	62.9	63.4
20	67.3	74.9	70.4	69.7	70.0	70.7
50	72.8	86.2	79.8	79.3	79.0	79.7
100	76.5	94.8	86.8	86.6	85.6	86.1

## 5. Conclusiones y recomendaciones

El objetivo del trabajo aquí presentado ha sido analizar los posibles cambios a través del tiempo en la ocurrencia, intensidad y magnitud de la precipitación para tormentas extremas sobre la ciudad de Bogotá.

Para ello, a partir de los registros diarios de precipitación sobre la ciudad de Bogotá compilados en 21 estaciones, durante el período 1982 a 2013, y una vez realizados los análisis de homogeneidad, consistencia y confiabilidad de la información disponible, se han calculado trece (13) índices de precipitación extrema seleccionados.

Igualmente, a partir de los análisis efectuados se ha establecido como umbral de tormentas extremas sobre Bogotá un valor de 20 mm. De otra forma, se han podido definir umbrales adicionales para tormentas extremas mayores a 30 mm/día, 40 mm/día y 44.6 mm/día, este último valor deducido mediante el cálculo de la función empírica de excesos medios y el agua precipitable sobre Bogotá

Los trece índices seleccionados y calculados mediante el empleo del software R y la extensión de RClimDex, fueron analizados en sus tendencias, principalmente mediante la metodología de regresión lineal y los métodos de Mann Kendall, ARMA y Spearman. Para el caso de la regresión lineal, que se analiza en detalle en el documento, se ha calculado el coeficiente de correlación  $R^2$ , la pendiente de la línea y el error estándar de este análisis para cada una de las estaciones y para todos los índices seleccionados, encontrando que esta metodología presenta coeficientes de  $R^2$  del orden de 20, un coeficiente de correlación estadísticamente bajo que quizás pudiera ser explicado por la suposición de normalidad de los datos que tiene el método y que no es del todo válida para las series de tiempo de los índices estudiados. A pesar de ello, y en confirmación con los otros métodos de análisis de tendencias implementadas, sí es claro que la

mayoría de los índices presentan una tendencia positiva. Particularmente se ha podido observar que para los índices NSPI, NSPMI, NSMM (30), NSMM (40), PATDH, PMH (ver explicación de siglas en Tabla No. 3-4), el coeficiente de correlación se encuentra por encima del promedio, del orden de 27. Por otro lado se ha encontrado que los índices con menores coeficientes de correlación fueron DS, DHC, esto es debido en gran medida a la importancia de tener series de datos continuas a lo largo del periodo de análisis, situación que no se logró debido a la calidad de la información suministrada por las entidades correspondientes (IDEAM, CAR, EAAB).

Para los resultados del análisis de tendencia lineal se ha obtenido para el índice ISI (Precipitación anual total dividida entre el número de días húmedos) un valor positivo de 0.062 mm/día/año, el cual sugiere en las tres últimas décadas un crecimiento en la precipitación importante; este índice presentó un coeficiente de correlación promedio bajo, observándose un crecimiento en todas las estaciones de análisis.

Por otro lado, y con relación a los índices que están más ligados con la precipitación extrema, tales como DMH, DEH, NSPI, NSPMI, NSMM(30), NSMM(40) Y NSMM(44.6) se realizó el análisis inter-decadal, encontrando que en promedio el índice de DMH crece 404 mm/década, mientras que el índice de DEH crece del orden de 136 mm/año. De igual manera, se encontró que el número de días con precipitaciones por encima de 10 mm/día crece en promedio 26 días/década, esto quiere decir que en cada década se presentan 26 eventos más de precipitación con estas características, mientras que los eventos de precipitación por encima de 20 aumentan 9 días/década; los eventos con precipitaciones por encima de 30 mm y 40 mm aumentan a una tasa de 3 eventos/década; finalmente, los eventos de precipitación por encima de 44.6 mm aumentan aproximadamente a una tasa de 1 evento/década.

En la década entre 1982 y 1991, por año se presentaban en promedio 22 días con precipitaciones por encima de los 10 mm, sin embargo para la década de 1992 a 2001, estos eventos se presentaron en promedio 25 veces (días) y para la década entre 2002 a 2011, se registraron en promedio 34 días con precipitación por encima de este valor (10 mm).



En la década entre 1982 y 1991, por año se presentaban en promedio 7 días con precipitaciones por encima de los 20 mm, mientras que en la década de 1992 a 2001, estos eventos se presentaron en promedio 8 veces. Finalmente en la década entre 2002 a 2011, se registraron en promedio 12 días con precipitación por encima de este valor (20 mm).

El número de días con precipitaciones por encima de los 30 mm, en promedio fue de 2 en la década de 1982 a 1991, con una mediana de 2, en la década de 1992 a 2001, estos eventos se presentaron en promedio 3 veces con una mediana de 2. Para la década entre 2002 a 2011, se registraron en promedio 5 eventos de precipitación por encima de este valor con una mediana de 4.

Con el fin de entender la variabilidad espacial de los trece (13) índices y sus tendencias, se han elaborado mapas espacializados a partir de los cálculos puntuales correspondientes. De acuerdo con este análisis cartográfico es posible afirmar que los eventos extremos presentan una mayor frecuencia en los cerros orientales y en el norte, que en el sector occidental y sur occidental de la ciudad. Sin embargo, la precipitación total anual es mayor en el norte, de acuerdo con el estudio realizado por el IDEAM para la caracterización de la cuenca del Tunjuelo y corroborada en el presente estudio, donde se encontraron precipitaciones más altas en este sector, junto con el sector del oriente, caso de las estaciones San Diego y San Luis. También, se pudo observar que se presentan aproximadamente el 24% más de eventos de días secos en los sectores sur-occidental y norte de la ciudad, que en el oriente. Por otro lado, la ocurrencia de eventos moderadamente fuertes (NSPI) es 60% menos frecuente en el sector occidental y norte, en comparación al oriente de la ciudad.

Los eventos fuertes (NSPMI) se presentan un 80% menos en el sector occidental, en comparación con los sectores orientales y norte. Esta misma proporción se mantiene para eventos muy fuertes (NSMM 30).

Las precipitaciones con intensidades superiores (moderadamente extremas (NSMM 40) y extremas (NSMM 44.6)) se presentan el doble de veces en los sectores oriental y norte, en comparación con el occidente y sur occidente de la ciudad, sin embargo, acá la

ocurrencia de eventos al año es de aproximadamente 1 a 3 eventos al año. De acuerdo con los resultados obtenidos, se encuentra que la ocurrencia de estos eventos extremos en toda la ciudad, ha venido aumentando a una tasa de aproximadamente 1 evento por año.

Teniendo en cuenta que la tendencia encontrada para el índice de número de días consecutivos secos, DS, es mixta, se encontró que las estaciones que presentan tendencia negativa, son aquella ubicadas, en su mayoría, en la parte plana de la ciudad, con una tendencia en promedio igual a  $-0.144$  días/año, mientras que las estaciones con tendencia positiva, en su mayoría son las ubicadas sobre los cerros, en donde la tendencia fue positiva de  $0.250$  días/año.

Por otro lado, y siguiendo con el análisis de estos índices, se estudiaron sus tendencias por otros 3 métodos, como es el método de ARMA, mediante el cual no se logró llegar a un buen ajuste del modelo y por ende, ninguna conclusión valiosa del método. Los otros métodos que se implementaron para el análisis de las tendencias fueron el método de Mann Kendall y Spearman, mediante los cuales se corroboró la tendencia hallada para el método de regresión lineal considerando que la tendencia en general de los índices analizados es de crecimiento, con valores estadísticamente significativos.

Es importante mencionar que se realizó el análisis de tendencias para la ciudad de Bogotá de forma decadal y para todo el periodo de registro, y se encontró que la distribución de probabilidad que mejor se ajustó a los datos fue la Gumbel, observando, como en todos los otros análisis, un crecimiento en la frecuencia de los eventos de precipitación extrema. De igual manera, se observó que las precipitaciones para iguales periodos de retorno, para diferentes décadas aumentaban del orden de un 44%, un valor nada despreciable, y muy significativo a la hora de diseñar estructuras hidráulicas.

Del análisis de frecuencias se encontró que las intensidades en promedio entre la década de 1982-1991 a la década de 1992-2001 aumentaron en un 10%, mientras que entre la segunda década y la tercera (2002-2011) aumentaron un 18%.

De acuerdo con todo lo anterior se llega a la conclusión de que efectivamente las tormentas extremas sobre la ciudad de Bogotá han venido aumentando, en cuanto a magnitud y a frecuencia, lo que implicaría la necesidad de realizar ajustes a las normas, y más precisamente, a las curvas intensidad, duración y frecuencia con las cuales se realizan todos los diseños de las estructuras hidráulicas de la ciudad. A este respecto, actualmente INGETEC se encuentra efectuando este estudio para la EAAB (en desarrollo). Adicionalmente, se observa que la problemática que vive la ciudad, en cuanto a inundaciones, y con ello, pérdidas en términos económicos y sociales es cada día más frecuente debido no solo a eventos más extremos y frecuentes, al limitado mantenimiento de las estructuras de drenaje de aguas lluvias, a la falta de cultura pero quizás también a que estas se encuentran sub dimensionadas, ayudando a que se presenten estos eventos.

Es muy importante tener en cuenta las limitaciones que se encontraron durante el desarrollo del trabajo, la principal de ellas, es la calidad de la información, en cuanto a cantidad de estaciones con un periodo de registro hidrológicamente valido, y así mismo, con información completa. Es claro que durante el desarrollo del estudio, se hicieron hacer algunas concesiones para poder abarcar la mayor cantidad de estaciones con el periodo de registro más largo.

Una de estas concesiones, fue el tener que trabajar con algunas estaciones que presentan un porcentaje de datos faltantes hasta del orden del 25% (solo una, dos de 24% y dos de 22%), lo que puede generar algunos vacíos con respecto al comportamiento de los índices en algunos años, y de este modo estar sobrevalorando y/o subvalorando la tasa de crecimiento de los índices aquí analizados. Sin embargo, es también claro, que los resultados obtenidos son concluyentes, indicando que la tendencia, en términos generales, de todos los índices es de crecimiento.

Este tipo de limitaciones generaron que los coeficientes de covarianzas, calculados para la mayoría de los índices, dieran un poco grandes, y que la precisión de estos no sea la más adecuada para encontrar valores concretos de crecimiento de los índices. Sin embargo, sí sirven para demostrar tendencias y cumplir con el objetivo del trabajo y

afirmar que efectivamente las precipitaciones extremas sobre la ciudad de Bogotá, sí han venido aumentando en los últimos 30 años, tanto en magnitud como en frecuencia (ocurrencia).

Finalmente, y con el objetivo de ampliar el conocimiento de este tipo de tormentas extremas, se recomienda a las instituciones encargadas del monitoreo de variables hidrometeorológicas continuar con el proceso de medición, intentando no retirar ninguna estación, sino por el contrario aumentar el número de estas, para contar con una mejor red meteorológica en la ciudad, que siempre será fundamental para este tipo de estudios y que fue una de las grandes limitantes en la presente investigación: la cantidad y la calidad de las series.

Una gran limitación fue el no poder contar con información de precipitaciones horaria (la cual está siendo utilizada por la empresa INGETEC y por razones contractuales no fue posible su recopilación), por lo cual, este estudio en un futuro podría complementarse con este tipo de información, mucho más precisa.

En el futuro se podría ampliar el trabajo aquí desarrollado intentando relacionar las precipitaciones extremas con otras variables climatológicas, como la temperatura y/o humedad relativa, etc. Adicionalmente, sería muy interesante intentar entender las razones de los cambios en las intensidades, si se deben a cambios en el uso del suelo, a cambio climático, o a una combinación de estos. A este respecto, las tendencias de crecimiento en la precipitación extrema sobre Bogotá se han explicado como consecuencia de la variabilidad y el cambio climático, pero sin duda son consecuencia no solo de esto sino también del fenómeno de urbanización en la ciudad.

Por otra parte, sería sumamente interesante, que este tipo de estudios se realicen en otras ciudades de Colombia, con el objetivo de conocer el comportamiento de este tipo de precipitaciones a lo largo del país, que ayudaría al entendimiento del clima de nuestro territorio.

## **A. Anexo: Información Original**

Este anexo se presenta en archivo magnético.

## **B. Anexo: Análisis de Dobles Masas**

Este anexo se presenta en archivo magnético.

## **C. Anexo: Datos Anómalos**

Este anexo se presenta en archivo magnético.

## **D. Anexo: Series Históricas sin Anómalos**

Este anexo se presenta en archivo magnético.



## **E. Anexo: Histogramas y Gráficas QQ**

Este anexo se presenta en archivo magnético.

## **F. Anexo: Resultados de los Índices en Tablas**

Este anexo se presenta en archivo magnético.

## **G. Anexo: Resultados de los Índices En Gráficas**

Este anexo se presenta en archivo magnético.

## **H. Anexo: Resultados Man Kendall**

Este anexo se presenta en archivo magnético.

# **I. Anexo: Resultados Método ARMA**

Este anexo se presenta en archivo magnético.

## **J. Anexo: Resultados Método Spearman**

Este anexo se presenta en archivo magnético.

## **K. Anexo: Resultados Análisis de Frecuencias**

Este anexo se presenta en archivo magnético.

## 6. Bibliografía

- Aguilar, E., Aziz Barry, A., Brunet, M., Ekang, L., Fernandes, A., Massoukina, M., Zhang, X. (2009). Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955–2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D2), D02115. <http://doi.org/10.1029/2008JD011010>
- Akritis, M. G., Murphy, S. A., & Lavalley, M. P. (1995). The Theil-Sen Estimator with Doubly Censored Data and Applications to Astronomy. *Journal of the American Statistical Association*, 90(429), 170–177. <http://doi.org/10.1080/01621459.1995.10476499>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (11 09). Retrieved from <http://portel.bogota.gov.co/portel/libreria/php/01.270701.html>
- Allamano, P., Claps, P., Laio, F., & Thea, C. (2009). A data-based assessment of the dependence of short-duration precipitation on elevation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(10-12), 635–641. <http://doi.org/10.1016/j.pce.2009.01.001>
- Anderson, H. W. (1955). Detecting hydrologic effects of changes in watershed conditions by double-mass analysis. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 36(1), 119–125. <http://doi.org/10.1029/TR036i001p00119>
- Bautista S., L. (1998). *Diseño de Muestreo Estadístico*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Beguiría, S., Angulo-Martínez, M., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., & El-Kenawy, A. (2011). Assessing trends in extreme precipitation events intensity and



- magnitude using non-stationary peaks-over-threshold analysis: a case study in northeast Spain from 1930 to 2006. *International Journal of Climatology*, 31(14), 2102–2114. <http://doi.org/10.1002/joc.2218>
- Boccolari, M., & Malmusi, S. (2013). Changes in temperature and precipitation extremes observed in Modena, Italy. *Atmospheric Research*, 122, 16–31. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.022>
- Bustos Molina, J. R. (2004). *Software DISPAH Versión 2.0* (Trabajo de Grado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- Carmen Muñoz Marín. (2008, July). Análisis de la Variabilidad en Series Hidrometeorológicas en una Cuenca de Cabecera del Río Segura. Retrieved from <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/738/1/pfc2752.pdf>
- Cepeda Arias, E. R. (2010). *Recopilación Histórica y Análisis Climatológico de Eventos de Granizada Ocurridos sobre Bogotá y su Relación con el Cambio Climático Global*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.
- Chang, M., & Lee, R. (1974). Objective double-mass analysis. *Water Resources Research*, 10(6), 1123–1126. <http://doi.org/10.1029/WR010i006p01123>
- Chen, F., Chen, H., & Yang, Y. (2015). Annual and seasonal changes in means and extreme events of precipitation and their connection to elevation over Yunnan Province, China. *Quaternary International*. <http://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.02.016>
- DANE. (2008, June). ESTIMACIÓN E INTERPRETACIÓN DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA ENCUESTA CONCENSAL.pdf. Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- De Lima, M. I. P., Santo, F. E., Ramos, A. M., & de Lima, J. L. M. P. (2013). Recent changes in daily precipitation and surface air temperature extremes in mainland

- Portugal, in the period 1941–2007. *Atmospheric Research*, 127, 195–209.  
<http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.001>
- Ding, B., Yang, K., Qin, J., Wang, L., Chen, Y., & He, X. (2014). The dependence of precipitation types on surface elevation and meteorological conditions and its parameterization. *Journal of Hydrology*, 513, 154–163.  
<http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.038>
- Dostal, C. B. (2006). seQUía HidrolóGica en costa rica? se Han vUuelto Más severas y frecUentes en los últiMos años? *Revista Reflexiones*, 85(1). Retrieved from <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/reflexiones/article/view/11435>
- Dr. Ron Eaglin, & Dr. Marty Wanielista. (2015). *SMADA - Stormwater Management and Design Aid*. Florida Department of Transportation. Retrieved from <http://smadaonline.com/>
- Easterling, D. R., Horton, B., Jones, P. D., Peterson, T. C., Karl, T. R., Parker, D. E., Folland, C. K. (1997). Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe. *Science*, 277(5324), 364–367. <http://doi.org/10.1126/science.277.5324.364>
- Endo, N., Matsumoto, J., & Lwin, T. (2009). Trends in Precipitation Extremes over Southeast Asia. *SOLA*, Vol. 5, 168–171.
- Estrada Porrúa, M. (2001). Cambio Climático Global: Causas y Consecuencias. *Revista de Información Y Análisis*, Núm. 16.
- Fernández-Montes, S., Seubert, S., Rodrigo, F. S., Rasilla Álvarez, D. F., Hertig, E., Esteban, P., & Philipp, A. (2014). Circulation types and extreme precipitation days in the Iberian Peninsula in the transition seasons: Spatial links and temporal changes. *Atmospheric Research*, 138, 41–58.  
<http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.10.018>

- Gilbert, R.O. (1987). *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*.
- Groisman, P. Y., Knight, R. W., Easterling, D. R., Karl, T. R., Hegerl, G. C., & Razuvaev, V. N. (2005). Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. *Journal Climate*, 18, 1326–1350. Volume 18, Issue 9.
- Groisman, P. Y., Knight, R. W., & Karl, T. R. (2011). Changes in Intense Precipitation over the Central United States. *Journal of Hydrometeorology*, 13(1), 47–66.  
<http://doi.org/10.1175/JHM-D-11-039.1>
- Hanel, M., & Buishand, T. A. (2010). On the value of hourly precipitation extremes in regional climate model simulations. *Journal of Hydrology*, 393(3-4), 265–273.  
<http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.08.024>
- IDEAM. (2009). *Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo*.
- Ingeniería de Recursos Hídricos, I. L. (1995). *Análisis y Caracterización de Tormentas en la Sabana de Bogotá*. Bogotá: Informe Final.
- INGETEC. (2004). *Estudio y Revisión de las Curvas IDF y del Análisis Espacial de las Tormentas para la Sabana de Bogotá*. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá- EAB.
- Karl, T. R., & Knight, R. W. (2010). Secular Trends of Precipitation Amount, Frequency, and Intensity in the United States. *NOAA/NESDIS/National Climatic Data Center*, Asheville, North Carolina, E.E.U.U.
- Katz, R. W., & Brown, B. G. (1992). Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Climatic Change*, 21(3), 289–302.  
<http://doi.org/10.1007/BF00139728>
- Klein Tank, A. M. G., Peterson, T. C., Quadir, D. A., Dorji, S., Zou, X., Tang, H., Spektorman, T. (2006). Changes in daily temperature and precipitation extremes

- in central and south Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D16), D16105. <http://doi.org/10.1029/2005JD006316>
- Krishnakumar, K.N., Prasada Rao, G.S.L.H.V., & Gopakumar, C.S. (2009). Rainfall trends in twentieth century over kerala, India. *Atmospheric Environment* 43, 1940–1944.
- Kysely, J., Beguería, S., Beranová, R., Gaál, L., & López-Moreno, J. I. (2012). Different patterns of climate change scenarios for short-term and multi-day precipitation extremes in the Mediterranean. *Global and Planetary Change*, 98-99, 63–72. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.06.010>
- Liu, B., Chen, J., Chen, X., Lian, Y., & Wu, L. (2013). Uncertainty in determining extreme precipitation thresholds. *Journal of Hydrology*, 503, 233–245. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.002>
- Liu, W., Zhang, M., Wang, S., Wang, B., Li, F., & Che, Y. (2013). Changes in precipitation extremes over Shaanxi Province, northwestern China, during 1960–2011. *Quaternary International*, 313-314, 118–129. <http://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.06.033>
- Lovino, M., García, N. O., & Baethgen, W. (2014). Spatiotemporal analysis of extreme precipitation events in the Northeast region of Argentina (NEA). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 140–158. <http://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.09.001>
- Mann, H.B. (1945). Non-parametric tests against trend, *Econometrica*. 13:163-171.
- M.G. Kendall. (1975). Rank Correlation Methods. Charles Griffin, 4th edition, London.
- Monsalve, G. (1995). Hidrología en la Ingeniería. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- New, M., Hewitson, B., Stephenson, D. B., Tsiga, A., Kruger, A., Manhique, A., ... Lajoie, R. (2006). Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west

- Africa. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D14), D14102.  
<http://doi.org/10.1029/2005JD006289>
- Nickerson, D., & Madsen, B. (2005). Nonlinear regression and ARIMA models for precipitation chemistry in East Central Florida from 1978 to 1997. *Environmental Pollution*, 135(3), 371–379. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.11.010>
- Oliver, M.A., & Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographic Information Systems*. Retrieved from <http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema1/Page16.html>
- Päädam, K., & Post, P. (2011). Temporal variability of precipitation extremes in Estonia 1961–2008\*. *Oceanologia*, 53, Supplement 1, 245–257. <http://doi.org/10.5697/oc.53-1-TI.245>
- Pabón, J. (2010). *El Cambio Climático en Bogotá Región*. Bogotá, Colombia: Departamento de Geografía Universidad Nacional de Colombia.
- Pal, I., & Al-Tabbaa, A. (2009). Trends in seasonal precipitation extremes – An indicator of “climate change” in Kerala, India. *Journal of Hydrology*, 367(1–2), 62–69. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.025>
- Peñaralda, V., & Obregon, N. (2012). Representación Geométrica de Registros de Precipitación Puntual en Bogotá, con el Modelo Fractal Multifractal. *Editorial Académica Española, ISBN: 978-3-8484-5411-2 v. 1*, 293–300.
- Pérez Morga, N., Kretzschmar, T., Cavazos, T., Smith, S. V., & Muñoz Arriola, F. (2013). Variability of Extreme Precipitation in Coastal River Basins of the Southern Mexican Pacific Region. *Geofísica Internacional*, 277–291.
- Peterson, T. C. (2005). Role of an international expert team (ET). *World Meteorological Organization Bulletin*, 54(2). Retrieved from <http://zimbra.inecc.gob.mx/ETCCDI/papers/WMO.Bulletin.April.2005.indices.pdf>

- Peterson, T., Folland, C., Gruza, G., Hogg, W., Mokssit, A., & Plummer, N. (2001). *Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs*. World Meteorological Organization Geneva. Retrieved from [http://eprints.soton.ac.uk/30144/1/048\\_wgcccd.pdf](http://eprints.soton.ac.uk/30144/1/048_wgcccd.pdf)
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: Una Síntesis desde la Escala Local inter-Decadal hasta la Escala Diurna. *Academica Colombiana de Ciencias*, 201–222.
- Poveda, G., Moreno, H. A., Vieira, S. C., Agudelo, P., Arias, P. A., Salazar, L. F., Guzmán, O. (2002). *Caracterización del Ciclo Diurno de la Precipitación en los Andes Tropicales de Colombia*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, UN – Centro Nacional de Investigación del Café, CENICAFE.
- Programa Chac - descargas. (n.d.). Retrieved April 4, 2015, from <http://hercules.cedex.es/Chac/>
- Ray K. Lensley, Jr., Max A. Kholer, & Joseph L.H. Paulus. (1997). *Hidrología Para Ingenieros (Segunda)*. Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill Lationamericana, S.A.
- Rodríguez, E. N., Pabón, C. J. ., Martínez, C. J., & Bernal, S. N. R. (2010). *Cambio Climático y su Relación con el Uso del Suelo en los Andes Colombianos*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo.
- Ruiz Murcia, J. F. (2010). *Cambio Climático en Temperatura, Precipitación y Humedad Relativa para Colombia Usando Modelos Meteorológicos de Alta Resolución (Panorama 2011-2100)*. Bogotá: Nota Técnica del IDEAM.
- Särndal, Carl Erik, Swenson, B., & Wretman, J. (1992). *Model Assisted Survey Sampling*. New York: Springer-Verlang.

- Scian, B., & Pierini, J. (2013). Variability and trends of extreme dry and wet seasonal precipitation in Argentina. A retrospective analysis. *Atmósfera*, 26(1), 3–26. [http://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71059-2](http://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71059-2)
- Sen Roy, S., & Rouault, M. (2013). Spatial patterns of seasonal scale trends in extreme hourly precipitation in South Africa. *Applied Geography*, 39, 151–157.
- Smith, R.A., Poveda, G., Mesa, O.J., Pérez, C.A., & Ruíz, D. (1996). En búsqueda de señales de cambio climático en Colombia. En: IV Congreso Colombiano de Meteorología. (1996:Bogotá). Memorias IV Congreso Colombiano de Meteorología. Bogotá: IDEAM, 200–2008.
- Song, X., Song, S., Sun, W., Mu, X., Wang, S., Li, J., & Li, Y. (2015). Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960–2013. *Atmospheric Research*, 157, 137–152. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.01.022>
- Tabari, H., AghaKouchak, A., & Willems, P. (2014). A perturbation approach for assessing trends in precipitation extremes across Iran. *Journal of Hydrology*, 519, Part B, 1420–1427. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.019>
- Tramblay, Y., Badi, W., Driouech, F., El Adlouni, S., Neppel, L., & Servat, E. (2012). Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. *Global and Planetary Change*, 82–83, 104–114. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.12.002>
- Universidad Nacional. (2010). Elaboración del escenarios de cambio climático para la segunda mitad del siglo XXI en diferentes regiones del territorio colombiano y de un informe de evaluación del cambio climático en Colombia que incluya entre otros las tendencias actuales y futuras y. IDEAM.

- Wang, S., Zhang, M., Wang, B., Sun, M., & Li, X. (2013). Recent changes in daily extremes of temperature and precipitation over the western Tibetan Plateau, 1973–2011. *Quaternary International*, 313–314, 110–117. <http://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.03.037>
- W. N. Venables, D. M. Smith, & the R Core Team. (2015). An Introduction to R.
- Xuebin Zhang, & Feng Yang. (2004, September 10). RClimDex (1.0) User Manual. Retrieved from <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>
- You, Q., Kang, S., Aguilar, E., Pepin, N., Flügel, W.-A., Yan, Y., Huang, J. (2010). Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961–2003. *Climate Dynamics*, 36(11-12), 2399–2417. <http://doi.org/10.1007/s00382-009-0735-0>
- Zhao, Y., Zou, X., Cao, L., & Xu, X. (2014). Changes in precipitation extremes over the Pearl River Basin, southern China, during 1960–2012. *Quaternary International*, 333, 26–39. <http://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.03.060>