

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PARÁMETROS C_1 , X_0 , C_2 DE LAS
CURVAS INTENSIDAD, DURACIÓN Y FRECUENCIA EN COLOMBIA.**

INFORME FINAL

PRESENTADO POR:

**MARÍA JOSÉ ÁLVAREZ TURIZO
TANIA XIMENA DUARTE MORENO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERAS
CIVILES**

DIRECTOR

ING. DIEGO ALEJANDRO GUZMÁN ARIAS. PhD

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2020**

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios por acompañarnos y guiarnos a lo largo de nuestra carrera y a lo largo de nuestra vida, por ser nuestro motor y brindarnos la oportunidad de poder estudiar, acompañándonos en todos los momentos vividos, sin Dios no somos nada.

A nuestro gran director el Ingeniero Diego Alejandro Guzmán Arias por su apoyo, su entrega, compromiso y tiempo dedicado a este trabajo de grado, gracias Ingeniero por confiar en nosotras. Lo apreciamos y muchas gracias por permitirnos crecer de manera personal y profesional, Dios lo bendiga siempre.

A nuestros profesores a lo largo de nuestra carrera por su entrega, compromiso y todas las enseñanzas que nos dejaron, gracias por compartir sus conocimientos, su apoyo y tiempo dedicado.

A nuestra alma mater la Universidad Pontificia Bolivariana por acogernos y ser parte de este logro.

Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por la información suministrada para el desarrollo de este trabajo de grado.

María José:

Gracias infinitas a mis padres Mayra y Edgardo por el apoyo incondicional que me han brindado, por sus enseñanzas y valores inculcados, por siempre creer en mí, y por sus valiosos consejos. Gracias por haberme dado la oportunidad y el privilegio de poder estudiar y poder alcanzar mis sueños, sin Dios y ustedes esto no sería posible. Gracias a mis hermanos por apoyarme y por estar conmigo en todos los momentos e impulsarme a cumplir mis metas. Los amo y esta tesis se la dedico a ustedes con todo mi amor.

A mi familia en general por sus oraciones, consejos y apoyo brindando a lo largo de mi vida. A mi compañera Tania por trabajar de la mano conmigo para alcanzar esta meta.

Gracias a todas las personas que me brindaron su apoyo, su cariño y me dieron ánimo en el transcurso de mi carrera y en todo mi proceso para poder alcanzar este logro.

Tania:

Esta tesis es el resultado de varios años de estudio y esfuerzo la dedico con todo mi amor a mi abuela Mercedes Chacón y a mi mamá Nadia Moreno quienes son mi mayor motor y mejor ejemplo de superación, a ustedes dos les debo todo lo que soy hoy en día, gracias por todo el amor y cariño que siempre me han brindado, para mí es un privilegio tenerlas en mi vida, las amo profundamente.

Quiero agradecer infinitamente a mi tío Diego Moreno por ser mi apoyo durante todo el proceso y por brindarme esta gran oportunidad de formarme como profesional, a mis tías Adriana y Andrés por sus enseñanzas, comprensión y cariño, a mi abuelo Leonardo Moreno, a mi hermana Dary Alejandra, a Elkin Delgado, demás familia, amigos y seres queridos, cada uno de ustedes hace parte de este logro y estoy segura que sin ustedes y sin la bendición de Dios esto no hubiese sido posible.

Agradezco a mi compañera María José, por su entrega, compromiso y apoyo para culminar este trabajo de grado, gracias Majo por todo el esfuerzo y dedicación.

TABLA DE CONTENIDO

1. OBJETIVOS.....	12
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2. RESUMEN.....	13
3. INTRODUCCIÓN.....	15
4. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
5. MARCO TEÓRICO.....	18
5.1 PRECIPITACIÓN.....	18
5.2 INUNDACIONES.....	18
5.3 CURVAS IDF.....	21
5.4 APROXIMACIONES DE CURVAS IDF.....	25
5.4.1 Elaboración de curvas IDF sintéticas regionalizadas (Rodrigo Vargas, Mario Diaz Granados).....	25
5.4.2 Elaboración curvas IDF, estaciones: Cintera villa Olga y santa Isabel-municipio de Cúcuta- Colombia.....	29
5.4.3 Regionalización de ecuaciones para el cálculo de curvas de intensidad, duración y frecuencia mediante mapas de isolíneas en el departamento de Boyacá.....	31
5.4.4 Análisis de confiabilidad de metodologías para la estimación de curvas sintéticas regionalizadas de intensidad, duración y frecuencia, para el departamento de Boyacá Colombia.....	33
5.4.5 Cálculo de curvas intensidad-duración-frecuencia empleando métodos estadísticos y probabilísticos sobre información pluviográfica de las estaciones el cardón y Sena, correspondientes al área operativa de la red meteorológica del IDEAM en el departamento de Boyacá.....	36
5.5 INTERPOLACIÓN ESPACIAL.....	38
5.5.1 Vecino más cercano (Nearest Neighbor).....	39
5.5.2 Interpolación IDW (Inverse Distance Weighting).....	39
5.5.3 Interpolación TIN.....	40
5.5.4 Interpolación mediante Spline.....	40
5.5.5 Kriging.....	40
5.5.6 Interpolación Trend.....	41
5.5.7 Interpolación topo to raster.....	42
6. ALCANCE.....	43
7. ANTECEDENTES.....	44
8. METODOLOGÍA.....	51

9. RESULTADOS	53
9.1 Zonas	53
9.2 Estaciones pluviográficas por regiones en Colombia	53
9.2.1 Región Andina	53
9.2.2 Región Caribe	55
9.2.3 Región Pacífico	55
9.2.4 Región Orinoquía	56
9.2.5 Región Amazonía	56
9.3 Grafica de las curvas IDF por regiones	58
9.4 Análisis de dispersión para los parámetros c_1, x_0, c_2.	59
9.4.1 Análisis para C_1:	59
9.4.2 Análisis para X_0:	73
9.4.3 Análisis para C_2:	86
9.5 Variación de las curvas IDF al reemplazar c_1, x_0, c_2 por valores aleatorios	100
9.6 Influencia del cambio climático en los valores de intensidad	101
9.6.1 Influencia del cambio climático en los valores de intensidad para la Región Andina.	109
9.6.2 Influencia del cambio climático en los valores de intensidad para la Región Caribe.	110
9.6.3 Influencia del cambio climático en los valores de intensidad para la Región Pacífico.	111
9.6.4 Influencia del cambio climático en los valores de intensidad para la Región Orinoquía.	112
9.6.5 Influencia del cambio climático en los valores de intensidad para la Región Amazonía.	113
9.7 Comportamiento hidrológico en cada región de estudio de Colombia.	113
9.7.1 Región Andina:	114
9.7.2 Región Caribe:	114
9.7.3 Región Pacífico:	114
9.7.4 Región Orinoquía:	114
9.7.5 Región Amazonía:	114
9.8 Correlación múltiple	116
9.9 Interpolación espacial	119
9.9.1 Interpolación por el método IDW	119
9.9.2 Interpolación por el método TIN	122
9.10 Validación cruzada	134

10. CONCLUSIONES	147
11. RECOMENDACIONES	150
12. BIBLIOGRAFÍA	151
13. ANEXOS	154
13.1 Estaciones pluviométricas del IDEAM en Colombia	154
13.2 Análisis estadístico para C_1:	155
13.3 Análisis estadístico para X_0:	158
13.4 Análisis estadístico para C_2:	160
13.5 Diagrama de caja y bigotes para C_1:	162
13.6 Diagrama de caja y bigotes para X_0:	162
13.7 Diagrama de caja y bigotes para C_2:	162
13.8 Correlación Múltiple.	164
10.9 Anexos digitales	178

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Mapas de amenaza por inundación, cabeceras municipales.	19
Tabla 2. Mapas de amenaza por inundación, corregimientos.....	20
Tabla 3. Valores obtenidos de los parámetros para las 165 curvas analizadas.	28
Tabla 4. Valores de los parámetros para cada duración, en la estación Santa Isabel.	29
Tabla 5. Valores de los parámetros para cada duración, en la estación Cinera-Villa Olga.	30
Tabla 6. Estaciones meteorológicas empleadas para el estudio.	31
Tabla 7. Revisión bibliográfica.	44
Tabla 8. Estaciones Región Andina.	53
Tabla 9. Estaciones Región Caribe.....	55
Tabla 10. Estaciones Región Pacífico.	55
Tabla 11. Estaciones Región Orinoquía.	56
Tabla 12. Estaciones Región Amazonía.....	56
Tabla 13. Parámetros C_1 , X_0 , C_2 , estación Cañasgordas.	58
Tabla 14. Intensidad calculada para cada periodo de retorno, en la estación Cañasgordas.	58
Tabla 15. Valores de C_1 estación Landázuri.	60
Tabla 16. Valores de C_1 estación Mocarí.	60
Tabla 17. Valores de C_1 estación Universidad del Valle.....	61
Tabla 18. Valores de C_1 estación Salinas de Upin.	61
Tabla 19. Valores de C_1 estación A. Vásquez Cobo.	62
Tabla 20. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C_1 en la región Andina.....	64
Tabla 21. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C_1 en la región Caribe.	66
Tabla 22. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C_1 en la región Pacífico.	68

Tabla 23. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C1 en la región Orinoquía.....	70
Tabla 24. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C ₁ en la región Amazonía.....	72
Tabla 25. Variación de X ₀ estación Jabalcón.....	73
Tabla 26. Variación X ₀ estación Apto A. Padilla.....	74
Tabla 27. Variación X ₀ estación Universidad del Valle.....	74
Tabla 28. Variación X ₀ estación Salinas de Upin.....	75
Tabla 29. Variación X ₀ estación A. Vásquez Cobo.....	75
Tabla 30. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro X ₀ en la región Andina.....	77
Tabla 31. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro X ₀ en la región Caribe.....	79
Tabla 32. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro X ₀ en la región Pacífico.....	81
Tabla 33. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro X ₀ en la región Orinoquía.....	83
Tabla 34. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro X ₀ en la región Amazonía.....	85
Tabla 35. Variación de C ₂ estación Landázuri.....	86
Tabla 36. Variación de C ₂ estación Mocarí.....	87
Tabla 37. Variación C ₂ estación Universidad del Valle.....	87
Tabla 38. Variación C ₂ estación Salinas de Upin.....	88
Tabla 39. Variación C ₂ estación A. Vásquez Cobo.....	88
Tabla 40. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C ₂ en la región Andina.....	90
Tabla 41. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C ₂ en la región Caribe.....	92
Tabla 42. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C ₂ en la región Pacífico.....	94
Tabla 43. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C ₂ en la región Orinoquía.....	96
Tabla 44. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C ₂ en la región Amazonía.....	98
Tabla 45. Cambios en porcentaje de la precipitación para el periodo 2011-2040 en cada departamento de Colombia.....	103
Tabla 46. Cambios en porcentaje de la precipitación para el periodo 2041-2070 en cada departamento de Colombia.....	103
Tabla 47. Cambios en porcentaje de la precipitación para el periodo 2071-2100 en cada departamento de Colombia.....	104
Tabla 48. Variación de C1 para cada escenario (RCP).....	106
Tabla 49. Intensidades estación Cañasgordas para el escenario RCP 2,6 en cada periodo de retorno.....	107
Tabla 50. Intensidades estación Cañasgordas para el escenario RCP 4,5 en cada periodo de retorno.....	108
Tabla 51. Intensidades estación Cañasgordas para el escenario RCP 8,5 en cada periodo de retorno.....	108

Tabla 52. Correlación Múltiple.....	118
Tabla 53. Validación cruzada para el parámetro C1.	139
Tabla 54. Análisis estadístico de la validación cruzada para el parámetro C1.....	140
Tabla 55. Diferencia en % entre el valor inicial del parámetro C1 y cada método analizado.	140
Tabla 56. Validación cruzada para el parámetro X0.	142
Tabla 57. Análisis estadístico de la validación cruzada para el parámetro X0.	143
Tabla 58. Diferencia en % entre el valor inicial del parámetro X0 y cada método analizado.	143
Tabla 59. Validación cruzada para el parámetro C2.	145
Tabla 60. Análisis estadístico de la validación cruzada para el parámetro C2.....	146
Tabla 61. Diferencia en % entre el valor inicial del parámetro C2 y cada método analizado.	146
Tabla 62. Estaciones pluviométricas del IDEAM en Colombia.	154
Tabla 63. Análisis estadístico de C_1 para diversos periodos de retorno.....	156
Tabla 64. Análisis estadístico para X0 en diversos periodos de retorno	158
Tabla 65. Análisis estadístico para C2 para diversos periodos de retorno.....	160
Tabla 66. Variables Correlación Múltiple.	164
Tabla 67. Correlación Múltiple C1 Tr= 2 años con Altura.....	169
Tabla 68. Correlación Múltiple C1 Tr= 2 años con Precipitación máxima anual promedio.	169
Tabla 69. Correlación Múltiple C1 Tr= 2 años con Precipitación promedio anual.	169
Tabla 70. Correlación Múltiple C1 Tr= 50 años con Altura.....	170
Tabla 71. Correlación Múltiple C1 Tr= 50 años con Precipitación máxima anual promedio.	170
Tabla 72. Correlación Múltiple C1 Tr= 50 años con Precipitación promedio anual.	170
Tabla 73. Correlación Múltiple C1 Tr= 100 años con Altura.	171
Tabla 74. Correlación Múltiple C1 Tr= 100 años con Precipitación máxima anual promedio.	171
Tabla 75. Correlación Múltiple C1 Tr= 100 años con Precipitación promedio anual.	171
Tabla 76. Correlación Múltiple X0 Tr= 2 años con Altura.....	172
Tabla 77. Correlación Múltiple X0 Tr= 2 años con Precipitación máxima anual promedio.	172
Tabla 78. Correlación Múltiple X0 Tr= 2 años con Precipitación promedio anual.	172
Tabla 79. Correlación Múltiple X0 Tr= 50 años con Altura.....	173
Tabla 80. Correlación Múltiple X0 Tr= 50 años con Precipitación máxima anual promedio.	173
Tabla 81. Correlación Múltiple X0 Tr= 50 años con Precipitación promedio anual.	173
Tabla 82. Correlación Múltiple X0 Tr= 100 años con Altura.....	174
Tabla 83. Correlación Múltiple X0 Tr= 100 años con Precipitación máxima anual promedio.	174
Tabla 84. Correlación Múltiple X0 Tr= 100 años con Precipitación promedio anual.	174
Tabla 85. Correlación Múltiple C2 Tr= 2 años con Altura.....	175
Tabla 86. Correlación Múltiple C2 Tr= 2 años con Precipitación máxima anual promedio.	175
Tabla 87. Correlación Múltiple C2 Tr= 2 años con Precipitación promedio anual.	175
Tabla 88. Correlación Múltiple C2 Tr= 50 años con Altura.....	176

Tabla 89. Correlación Múltiple C2 Tr= 50 años con Precipitación máxima anual promedio.	176
Tabla 90. Correlación Múltiple C2 Tr= 50 años con Precipitación promedio anual.	176
Tabla 91. Correlación Múltiple C2 Tr= 100 años con Altura.	177
Tabla 92. Correlación Múltiple C2 Tr= 100 años con Precipitación máxima anual promedio	177
Tabla 93. Correlación Múltiple C2 TR= 100 años con Precipitación promedio anual	177

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicaciones curvas IDF en Colombia.	22
Ilustración 2. Curva IDF ejemplo.	23
Ilustración 3. Curvas IDF estación Santa Isabel.	31
Ilustración 4. Curvas IDF obtenidas estación Cardón (Socotá).	38
Ilustración 5. Interpolación TIN.	40
Ilustración 6. Mapa de Colombia con estaciones meteorológicas.	43
Ilustración 7. Concentración por regiones de las estaciones en Colombia.	57
Ilustración 8. Grafica curvas IDF estación Cañasgordas.	59
Ilustración 9. Variación C ₁ , región Andina.	63
Ilustración 10. Variación C ₁ región Caribe.	65
Ilustración 11. Variación C ₁ región Pacífico.	67
Ilustración 12. Variación C ₁ región Orinoquía.	69
Ilustración 13. Variación C ₁ región Amazonía.	71
Ilustración 14. Mayores valores de C ₁ en todo el territorio.	73
Ilustración 15. Variación X ₀ región Andina.	76
Ilustración 16. Variación X ₀ región Caribe.	78
Ilustración 17. Variación X ₀ región Pacífico.	80
Ilustración 18. Variación X ₀ región Orinoquía.	82
Ilustración 19. Variación X ₀ región Amazonía.	84
Ilustración 20. Mayores valores de X ₀ en todo el territorio.	86
Ilustración 21. Variación C ₂ región Andina.	89
Ilustración 22. Variación C ₂ región Caribe.	91
Ilustración 23. Variación C ₂ región Pacífico.	93
Ilustración 24. Variación C ₂ región Orinoquía.	95
Ilustración 25. Variación C ₂ región Amazonía.	97
Ilustración 26. Mayores valores de C ₂ en todo el territorio.	98
Ilustración 27. Variación del parámetro C ₁ en las regiones de estudio.	99
Ilustración 28. Variación del parámetro X ₀ en las regiones de estudio.	99
Ilustración 29. Variación del parámetro C ₂ en las regiones de estudio.	100
Ilustración 30. Variación de la intensidad debido al cambio climático para la región Andina en cada escenario.	110
Ilustración 31. Variación de la intensidad debido al cambio climático para la región Caribe en cada escenario.	111
Ilustración 32. Variación de la intensidad debido al cambio climático para la región pacífico en cada escenario.	112
Ilustración 33. Variación de la intensidad debido al cambio climático para la región Orinoquía en cada escenario.	112

Ilustración 34. Variación de la intensidad debido al cambio climático para la región Amazonía en cada escenario.....	113
Ilustración 35. Mapa hidrológico de Colombia.....	115
Ilustración 36. C1 Tr=2 años IDW.....	125
Ilustración 37. C1 Tr=50 años IDW.....	125
Ilustración 38. C1 Tr=100 años IDW.....	126
Ilustración 39. C2 Tr=2 años IDW.....	126
Ilustración 40. C2 Tr=50 años IDW.....	127
Ilustración 41. C2 Tr=100 años IDW.....	127
Ilustración 42. X0 Tr=2 años IDW.....	128
Ilustración 43. X0 Tr=50 años IDW.....	128
Ilustración 44. X0 Tr=100 años IDW.....	129
Ilustración 45. C1 Tr=2 años TIN.....	129
Ilustración 46. C1 Tr=50 años TIN.....	130
Ilustración 47. C1 Tr=100 años TIN.....	130
Ilustración 48. C2 Tr=2 años TIN.....	131
Ilustración 49. C2 Tr=50 años TIN.....	131
Ilustración 50. C2 Tr=100 años TIN.....	132
Ilustración 51. X0 Tr=2 años TIN.....	132
Ilustración 52. X0 Tr=50 años TIN.....	133
Ilustración 53. X0 Tr=100 años TIN.....	133
Ilustración 54. Validación Cruzada 1ras estaciones.....	136
Ilustración 55. Validación Cruzada 2das estaciones.....	137
Ilustración 56. Validación Cruzada 3ras estaciones.....	138
Ilustración 57. Diagrama de caja y bigotes para el parámetro C1.....	162
Ilustración 58. Diagrama de caja y bigotes para el parámetro X0.....	162
Ilustración 59. Diagrama de caja y bigotes para el parámetro C2.....	163

LISTADO DE ESQUEMAS

Esquema 1. Métodos de interpolación. ArcGIS.....	41
Esquema 2. Metodología aplicada para el desarrollo del proyecto.....	52

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación generalizada para el cálculo de la intensidad.....	24
Ecuación 2. Ecuación general Bernard 1932.....	25
Ecuación 3. Ecuación de Powell 1932.....	26
Ecuación 4. Estimación de curvas con base al nivel horario P2,60.....	26
Ecuación 5. Ecuación generalizada de Chen para curvas IDF.....	26
Ecuación 6. Estimación de curvas IDF Kothyari y Garde en 1992.....	27
Ecuación 7. Ecuación generalizada Kothyari y Garde.....	27
Ecuación 8. Ecuación generalizada calibrada.....	27
Ecuación 9. Ecuación generalizada Kathyari y Garde modificada.....	27
Ecuación 10. Ecuación con parámetro N.....	28
Ecuación 11. Ecuación con $r^2=0.92$	28
Ecuación 12. Ecuación con el parámetro PT'.....	28
Ecuación 13. Ecuación con el parámetro ELEV'.....	28

Ecuación 14.Variable reducida YT.....	30
Ecuación 15.Magnitud del evento máximo.	30
Ecuación 16.Intensidad máxima multianual.	32
Ecuación 17.Intensidad de precipitación máxima.	32
Ecuación 18.Intensidad propuesta por Bernard.	34
Ecuación 19.Intensidad propuesta por Kothyari y Garde.....	34
Ecuación 20.Intensidad propuesta por Bell.	34
Ecuación 21.Ecuación adicional para determinar la intensidad.	35
Ecuación 22. Ecuación adicional para determinar la intensidad.	35
Ecuación 23.Intensidad máxima de precipitación.....	36
Ecuación 24.Intensidad máxima de precipitación (mm/h).	37
Ecuación 25. Intensidad estación el Cardón.	38
Ecuación 26. Intensidad estación Sena.....	38
Ecuación 27. Estructura matemática método IDW.....	39
Ecuación 28. Fórmula general Método IDW, Método Kriging.	40

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la distribución espacial de los parámetros en las funciones de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia sobre el territorio colombiano para establecer las potenciales alteraciones producidas por el cambio climático.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las aproximaciones teóricas y empíricas utilizadas para construcción de las curvas IDF a nivel nacional.
- Identificar los métodos de interpolación para la espacialización de los parámetros C_1 , X_0 , C_2 de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia desarrolladas por el IDEAM.
- Analizar la posible influencia del cambio climático sobre los parámetros C_1 , X_0 y C_2 de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia a partir de las proyecciones de clima del IDEAM.

2. RESUMEN

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PARÁMETROS C1, X0, C2 DE LAS CURVAS INTENSIDAD, DURACIÓN Y FRECUENCIA EN COLOMBIA

AUTOR(ES): MARÍA JOSÉ ÁLVAREZ TURIZO TANIA
XIMENA DUARTE MORENO

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): ING. DIEGO ALEJANDRO GUZMÁN ARIAS

RESUMEN

Con el fin de prevenir problemáticas generadas por la acumulación de agua lluvia en la superficie como; inundaciones, aumento del nivel de agua en la superficie que puede afectar directamente el diseño y funcionamiento de diversas obras civiles conllevando a desastres, pérdidas materiales, afectaciones en las estructuras, es indispensable conocer el comportamiento hidrológico de la zona de estudio, brinda información histórica de intensidades de precipitación para diversos periodos de retorno. Una manera de representar esta información es por medio de las curvas IDF, integran la intensidad media de precipitación en función de la duración y la frecuencia. Esta investigación cuenta con una metodología de evaluación de métodos de interpolación para espacializar los parámetros C1, X0 Y C2 propuestos por el IDEAM en la ecuación de la intensidad, conocer la variación de estos parámetros en las curvas IDF para cualquier punto en todo el territorio colombiano incluyendo zonas con escasa información pluviográfica. A partir de proyecciones de cambio climático se analiza el comportamiento de los parámetros C1, X0, C2 teniendo en cuenta la posible influencia del aumento de las lluvias intensas en la variación de la intensidad y la posible alteración de las curvas IDF. El método mejor adaptado a los datos de estudio es el método TIN, por el contrario, el método KRIGING presentó poca adaptación a los datos de estudio, generando imágenes poco legibles. Se encontró que el cambio climático si influye en los parámetros de estudio, pero esta influencia no predomina en las curvas IDF debido a que no afecta directamente a la intensidad. En base a información bibliográfica realizada se encontró que en Colombia han realizado investigaciones relacionadas con determinación de las curvas IDF basándose en diferentes variables, sin embargo, los parámetros de estudio de esta investigación se encontraron en la ecuación general de intensidad propuesta por el IDEAM.

PALABRAS CLAVE:

Interpolación, IDF, Precipitación, Cambio climático, Parámetros, Intensidad

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: SPATIAL DISTRIBUTION OF THE PARAMETERS C1, X0, C2 OF THE CURVES INTENSITY, DURATION AND FREQUENCY IN COLOMBIA

AUTHOR(S): MARÍA JOSÉ ÁLVAREZ TURIZO TANIA
XIMENA DUARTE MORENO

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: ING. DIEGO ALEJANDRO GUZMÁN ARIAS

ABSTRACT

In order to prevent problems generated by the accumulation of rainwater on the surface such as; floods, increased water level on the surface that can directly affect the design and operation of various civil works leading to disasters, material losses, damage to structures, it is essential to know the hydrological behavior of the study area, provides historical information on precipitation intensities for various return periods. One way to represent this information is by means of IDF curves, they integrate the average intensity of precipitation as a function of duration and frequency. This research has a methodology for evaluating interpolation methods to spatialize the parameters C1, X0 and C2 proposed by IDEAM in the intensity equation, to know the variation of these parameters in the IDF curves for any point in the entire Colombian territory including areas with scarce rainfall information. Based on climate change projections, the behavior of parameters C1, X0, C2 is analyzed, taking into account the possible influence of increased heavy rains on the variation of intensity and the possible alteration of the IDF curves. The method best adapted to the study data is the TIN method, on the contrary, the KRIGING method presented little adaptation to the study data, generating poorly legible images. It was found that climate change does influence the study parameters, but this influence does not predominate in the IDF curves because it does not directly affect intensity. Based on bibliographic information, it was found that in Colombia they have carried out investigations related to the determination of IDF curves based on different variables, however, the study parameters of this investigation were found in the general intensity equation proposed by IDEAM.

KEYWORDS:

Interpolation, IDF, Precipitation, Climate change, Parameters, Intensity.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

3. INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones son un parámetro dinámico de los sistemas naturales que interactúan en un gran número de procesos, proveen agua dulce en la superficie terrestre beneficiando la vida de los animales, vegetales, seres vivos en general que requieran agua para subsistir, su formación hace parte de la segunda etapa del ciclo hidrológico en la cual debido a la gravedad el agua acumulada en las nubes desciende. La acumulación de esta agua lluvia en la superficie desencadena un gran número de problemas, entre los cuales se destacan las inundaciones afectando regiones o sectores limitados; un aumento del nivel de agua en la superficie puede afectar directamente el diseño y funcionamiento de diversas obras civiles conllevando a desastres y pérdidas materiales. [1]

Con el fin de prevenir este tipo de afectaciones en las estructuras, es indispensable conocer y entender el comportamiento hidrológico de la zona de estudio, el cual brinda información histórica en cuanto a intensidades de precipitación para diversos periodos de retorno. Una manera de representar esta información es por medio de las curvas IDF, las cuales integran la intensidad media de precipitación en función de la duración y la frecuencia; finalmente, con base a estos datos es posible determinar el caudal de diseño el cual establece la magnitud de la obra hidráulica a diseñar. [2]

La hipótesis de esta tesis supone una metodología para discretar la intensidad de la lluvia de diseño para obras hidráulicas mediante la evaluación de métodos de interpolación para la espacialización de los parámetros C_1 , X_0 Y C_2 propuestos por el IDEAM en la ecuación de la intensidad, donde X_0 se conoce como la duración de la lluvia en minutos, C_1 y C_2 , son parámetros de la ecuación de mejor ajuste por el método de los mínimos cuadrados. Actualmente se conoce un estudio de cinco grandes regiones de Colombia (Andina, Caribe, Pacífico, Orinoquia, Amazonía) en los cuales se determina la intensidad, teniendo como base de estudio las curvas IDF. (Díaz Granados, Rodrigo Vargas M).

Sin embargo, este proyecto abarca un campo más amplio, ya que tiene como finalidad conocer la variación de los parámetros mencionados anteriormente en las curvas de intensidad, duración y frecuencia para cualquier punto en todo el territorio Colombiano, incluyendo aquellas zonas donde no se cuente con información pluviográfica debido a la falta de estaciones y al bajo cubrimiento disponible, esto permitirá tener información de gran importancia y vital a la hora de diseñar cualquier obra hidráulica, representando así un mayor grado de certeza, para esto se examinarán y evaluarán diferentes métodos de espacialización, y de esta manera se determinará cual se adaptó mejor a los datos a estudiar.

Las curvas IDF podrían ser alteradas por aumentos de las lluvias intensas causadas por el cambio climático. En la actualidad, los fenómenos climáticos son cada vez más graves, frecuentes y extremos, lo que conlleva a cuestionarse ¿cómo diseñar y preparar una infraestructura que sea segura y haga frente a los cambios climáticos?, es aquí donde se analiza cómo influyen estos cambios extremos en las curvas IDF, de este modo, se tendrá en cuenta la posible influencia del cambio climático en la variación de la intensidad, analizando el comportamiento de los parámetros C_1 , X_0 , C_2 a partir de las proyecciones de cambio climático en la precipitación por regiones en el territorio colombiano, poder analizar esto comportamiento en relación al clima y su influencia en la zona donde se encuentren

complementará la escasez de información y de datos para aquellas regiones donde no cuenten con suficientes estaciones meteorológicas, tal y como se mencionaba anteriormente, con el fin de obtener mejores diseños y desarrollos en la estimación de obras de drenaje y de estructuras hidráulicas a realizar en un futuro.

4. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

La acumulación de las aguas lluvias sobre la superficie genera un gran número de problemas donde se resalta la afectación en diseño y funcionamiento de diversas obras civiles, es por esto por lo que una manera de prevenir este tipo de afectaciones se basa en conocer inicialmente el comportamiento hidrológico de la zona, posteriormente esta información se representa por medio de las curvas IDF las cuales integran la intensidad media de precipitación en función de la duración y la frecuencia; actualmente existen un gran número de ecuaciones y metodologías para determinar lo anteriormente mencionado dependiendo de los parámetros de interés. [3]

En Colombia, diversas instituciones se han encargado de establecer ecuaciones con el fin de determinar los valores de intensidad, cada una de ellas con variables de interés diferentes, pero con resultados similares, sin embargo, este trabajo de grado tiene como finalidad conocer la variación de los parámetros C_1 , X_0 , C_2 en las curvas de intensidad, duración y frecuencia para cualquier punto en todo el territorio Colombiano, estos parámetros hacen parte de la ecuación general propuesta por el IDEAM: para lograr lo anterior, se examinarán y evaluarán diferentes métodos de espacialización (TIN-IDW) y se tendrá en cuenta la influencia del cambio climático en la variación de la intensidad por regiones en el territorio colombiano.

5. MARCO TEÓRICO

A continuación, se realiza una descripción general de conceptos, formulas e información tenida en cuenta para la elaboración y desarrollo de este proyecto, se debe remitir a las referencias bibliográficas correspondientes.

5.1 PRECIPITACIÓN

La precipitación en la hidrología es una de las variables más estudiadas, son un parámetro dinámico de los sistemas naturales que interactúan en un gran número de procesos, proveen agua dulce en la superficie terrestre beneficiando la vida de los animales, vegetales, seres vivos en general que requieran agua para subsistir, establecen la calidad de vida de las cuencas y son relacionadas a cualquier forma de agua que cae del cielo, por ejemplo, la humedad que descansa en la superficie terrestre y posteriormente desciende a la tierra, conformando así la segunda etapa del ciclo hidrológico. [4]

La acumulación de esta agua lluvia en la superficie desencadena un gran número de problemas, entre los cuales se destacan las inundaciones que afectan regiones o sectores limitados; un aumento del nivel de agua en la superficie puede afectar directamente el diseño y funcionamiento de diversas obras civiles conllevando a desastres.

Para la formación de las precipitaciones es necesaria la humedad atmosférica, radiación solar y mecanismos de enfriamiento del aire, así mismo se debe contar con la presencia de núcleos higroscópicos para que se realice la condensación. [5]

Existen diferentes tipos de precipitación tales como: Las precipitaciones convectivas, se dan cuando se calientan las masas de aire bajas y son acompañadas por vientos fríos superiores, esto conlleva a una descompensación de fuerzas de empuje y flotación, dando lugar a la condensación rápida. Las precipitaciones orográficas, hacen referencia al choque de las corrientes de aire húmedo que circula en los valles contra las montañas, ocasionando la condensación súbita del vapor de agua, debido al momento en el que pueden chocar estratos fríos y secos. Por último, la precipitación por convergencia hace referencia al choque entre sí de dos masas de aire en movimiento que presentan diferente temperatura.

5.2 INUNDACIONES

Son fenómenos hidrológicos con un gran potencial destructivo que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Son eventos extremos causados por altas precipitaciones, lluvias persistentes y generalizadas que ocasionan un aumento del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce, superando así la altura de las orillas ya sean naturales o artificiales, esto conlleva a un desbordamiento natural y dispersión de los ríos a los cursos de agua normalmente no sumergidas. [6]

El IDEAM actualmente cuenta con mapas de amenaza por inundación, tanto nacionales como locales para algunas áreas piloto seleccionadas, a continuación, se puede observar la lista de las zonas que cuentan con mapas disponibles tanto para cabeceras municipales como para los corregimientos a lo largo del territorio colombiano (*Ver Tabla 1 y 2*):

Tabla 1. Mapas de amenaza por inundación, cabeceras municipales.

CABECERAS MUNICIPALES	
MUNICIPIO	DEPARTAMENTO
Fundación	Magdalena
Aracataca	
Plato	
Girón	Santander
La Victoria	Valle del Cauca
Cartago	
El Dovio	
Tuluá	
La Virginia	Risaralda
Momil	Córdoba
Paipa	Boyacá
Aquitania	
Moniquirá	
Toca	
Tunja	
Puerto Boyacá	
Aipe	Huila
Neiva	
Villa vieja	
Pitalito	
Ayapel	Córdoba
Montelíbano	Sucre
San Benito Abad	
Caimito	
Majagual	
San Marcos	
Sucre	
Guaranda	Magdalena
Guamal	
San Zenón	Bolívar
Magangué	
Cantagallo	
Mompós	Antioquia
Caucasia	
Puerto Berrío	
Puerto Nare	
Puerto Triunfo	
Nechí	

Achí	Bolívar
Pinillos	
San Jacinto del Cauca	
Supía	Caldas
Girardot	Cundinamarca
Guataquí	
Ricaurte	
Ambalema	Tolima
Flandes	
Honda	
Natagaima	
Purificación	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Mapas de amenaza por inundación, corregimientos

CORREGIMIENTOS	
Buenavista	Achí – Bolívar
Barbosa	Magangué – Bolívar
El retiro	
Guazo	
Madrid	
Palmarito	
Panseguita	
Pueblo Nuevo	Cicuco – Bolívar
San Francisco de Loba	Mompós – Bolívar
Playa de Coco	
San Ignacio	
Santa Cruz	
Santa Rosa	Pinillos – Bolívar
Palomino	
Palenquito	Caucasia – Antioquia
Colorados	Puerto Nare - Antioquia
La Sierra	Puerto Triuno – Antioquia
Puerto Perales	Puerto Boyacá – Boyacá
Puerto Serviez	Guaduas – Cundinamarca
Puerto Bogotá	Cimitarra – Santander
Puerto Olaya	Piedras – Tolima
Guataquisito	

Fuente: Elaboración propia

Existe una clasificación de los tipos de inundaciones donde se resaltan las inundaciones lentas y las inundaciones crecientes súbitas, las primeras mencionadas son las que ocurren en zonas planas de los ríos y con valles aluviales extensos, los incrementos de nivel diario son del orden de centímetros, generan afectaciones de grandes extensiones, generalmente pocas pérdidas de vidas humanas, un ejemplo claro de este tipo de inundaciones es en la región de la Mojana. Por otra parte, las inundaciones crecientes súbitas, presentan áreas con afectaciones menores pero su poder destructivo es extremadamente mayor y cobran el mayor número de vidas cuando se presentan, generalmente se presentan en todas las cuencas de alta pendiente, principalmente de la región andina. [6]

5.3 CURVAS IDF

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, también conocidas como curvas IDF conforman un insumo básico para cualquier tipo de infraestructura, tales como; drenaje, estructuras de control de erosión, carreteras, alcantarillado, cubiertas, embalses de canales; diques y en general todo lo relacionado en la planeación de infraestructura civil donde se necesite llevar a cabo estudios hidrológicos, así mismo, son importantes para controlar inundaciones superficiales y prevenir daños en las obras hidráulicas, las cuales desencadenan problemáticas sociales. De esta forma se garantiza un buen planeamiento, diseño y operación de un proyecto a realizar. [7]

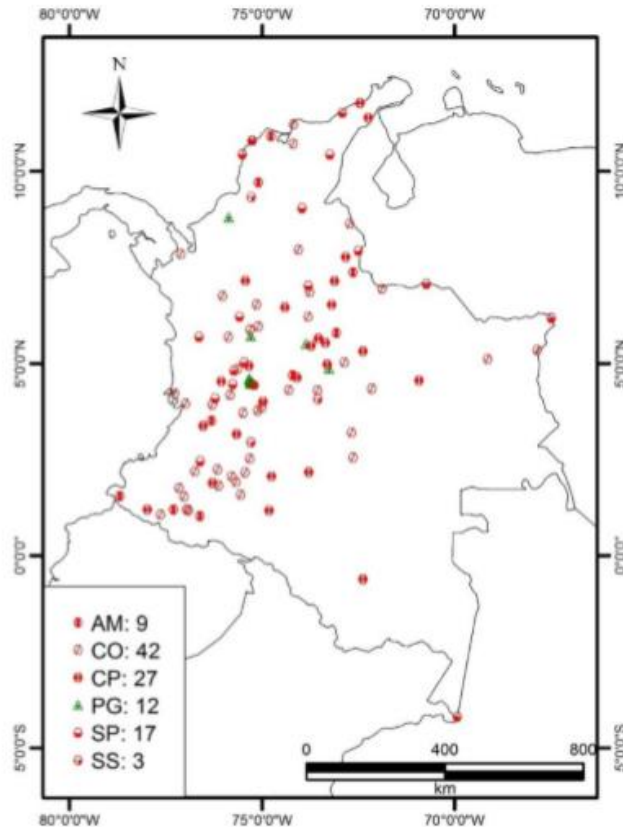
Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiente a una misma frecuencia o periodo de retorno. Estas curvas se consideran una herramienta fundamental para el diseño de estructuras hidráulicas basadas en modelación lluvia-escorrentía. Sintetizan información del comportamiento pluvial de una zona, es por esto la importancia de su estimación. Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), presentan la probabilidad (inverso, período de retorno) de que una lluvia con su intensidad y duración dadas ocurran. [1] Para el diseño y construcción de una obra hidráulica es necesario realizar un estudio hidrológico de la zona donde se llevará a cabo el proyecto, es importante conocer información en cuanto a la ubicación geográfica, promedio del valor máximo anual de precipitación diaria, número de días con lluvia al año, precipitación media anual, elevación sobre el nivel del mar, y el clima. [8]

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales más conocido como el IDEAM, posee un gran número de estaciones pluviométricas encargadas de medir la precipitación en un determinado periodo de tiempo, con base a esta información el instituto se encargó de realizar diferentes curvas IDF a nivel nacional. En este momento Colombia posee un total de 110 estaciones a lo largo del territorio colombiano, y sus respectivas curvas IDF actualizadas en el 2016 empleando la información disponible hasta 2010, estas constan de un proceso semi-empírico con base a información pluviográfica, a partir de esto identifican para cada año en el período de análisis el mayor número posible de eventos extremos de tormenta, se establecen profundidades e intensidades máximas de precipitación para duraciones establecidas, se construye una serie anual de excedencias de estas intensidades para cada duración, y mediante un análisis tradicional de frecuencias se ajustan diversas distribuciones de probabilidad, ya sea; Gumbel, GEV Generalized Extreme Value, Gamma, Log Normal de tres parámetros (LN3), Pearson tipo 3 (P3), Log-Pearson tipo 3 (LP3), Exponencial, Pareto, etc. En el caso del IDEAM trabajan las Curvas IDF con Gumbel, posteriormente se realiza un ajuste en el que se utilizan diferentes métodos para la estimación de los parámetros de estas distribuciones (momentos,

momentos ponderados por probabilidad o L-momentos, máxima verosimilitud, entre otros más), y de esta forma se verifica el ajuste tanto de forma visual como de forma estadística, implementan pruebas como la de Kolmogorov-Smirnov (K-S) y la Chi cuadrado, de este ajuste se obtienen intensidades para las duraciones establecidas y los diversos períodos de retorno analizados (2,3,5,10,25,50 y 100 años). [9]

En la siguiente imagen (*ver ilustración 1*) se muestra la ubicación de las 110 estaciones de las curvas IDF a lo largo del territorio colombiano, incluyendo el tipo de estación:

Ilustración 1. Ubicaciones curvas IDF en Colombia.



Fuente: IDEAM

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia disponibles en la página del IDEAM, contienen la representación gráfica de las mismas mostrando las intensidades de precipitación para diferentes duraciones y los siguientes periodos de retorno; 2,3,5,10,25,50 y 100 años, así mismo incluye información de los coeficientes C_1 , X_0 y C_2 para la ecuación de las intensidades evaluadas en los diferentes periodos de retorno analizados, información técnica de la curva IDF como los métodos empleados para su estimación, distribución espacial, periodo de registro, entre otros. También, incluye información de las intensidades máximas de precipitación para diferentes duraciones de lluvia y para los diferentes periodos de retorno de análisis mencionados anteriormente, datos básicos de la estación, datos complementarios, ecuación utilizada, entre otra más información. En la siguiente imagen (*ver ilustración 2*) se muestra el contenido de una curva IDF del IDEAM.

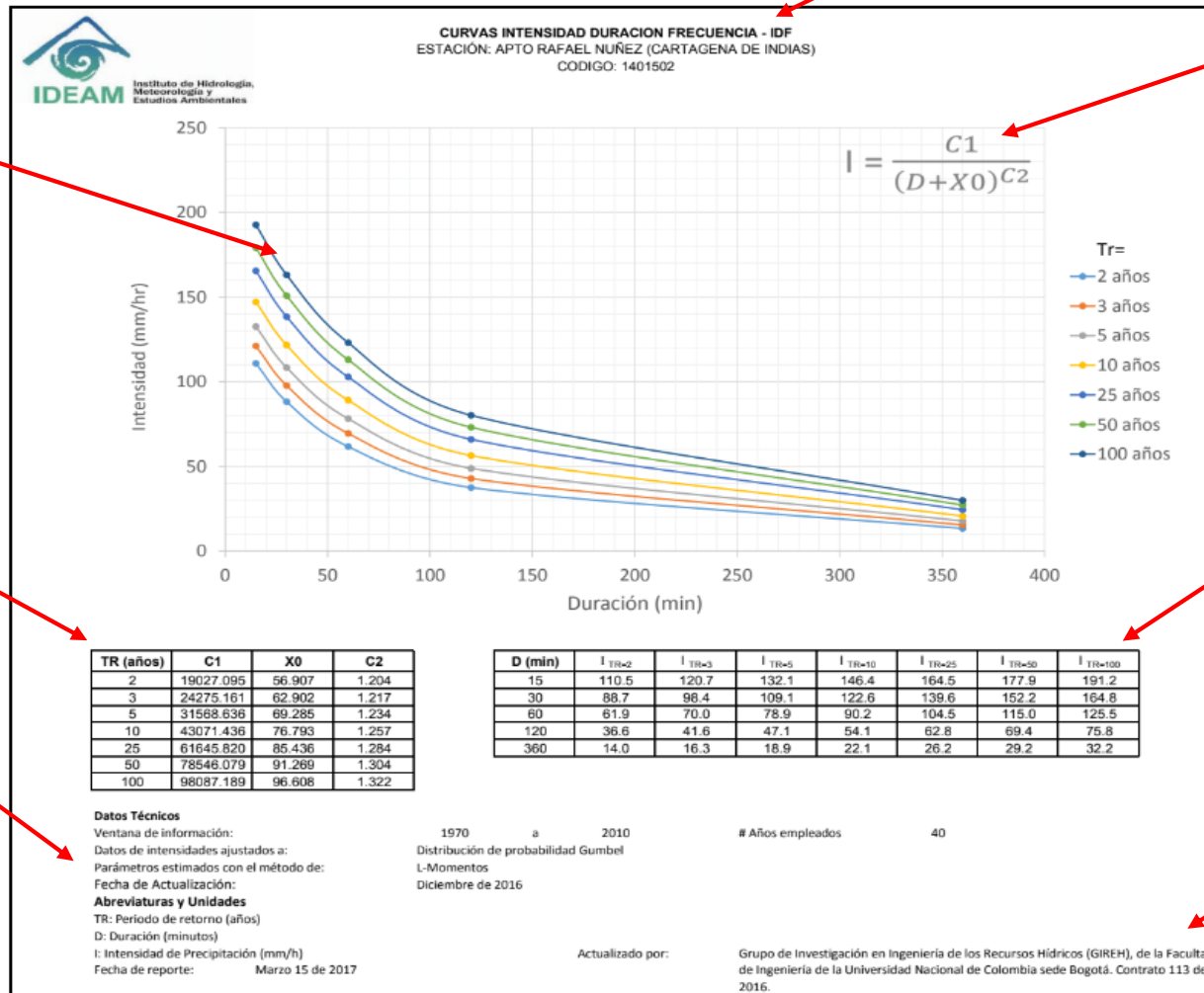
Datos básicos de la estación, datos complementarios pueden encontrarse en el Catálogo de estaciones del IDEAM

Representación gráfica de las curvas Intensidad Duración, Frecuencia, indicando las intensidades de precipitación para diferentes duraciones y periodos de retorno.

Coeficientes para la ecuación de Intensidades, para diferentes periodos de retorno.

Información técnica referente a la IDF; como periodo de registro empleado, distribución de probabilidad empleada para el ajuste de los datos, método de cálculo

Ilustración 2. Curva IDF ejemplo.



Ecuación generalizada para calcular la Intensidad, en función de los coeficientes y la Duración requerida.

Tabla de intensidades máximas de precipitación para diferentes duraciones de la lluvia y diferentes periodos de retorno.

Información relacionada con la actualización de los datos de la curva IDF y año en que se actualizó la información.

Fuente: IDEAM

La ecuación utilizada para el cálculo de la intensidad en las curvas Intensidad, Duración y Frecuencia del IDEAM, está dada en función de los coeficientes C_1 , X_0 , C_2 y de la duración que se requiera (Ver ecuación 1). [10]

Ecuación 1. Ecuación generalizada para el cálculo de la intensidad.

$$I = \frac{C_1}{(D + X_0)^{C_2}}$$

Donde:

I: Es la Intensidad en mm/h.

D: Es la Duración de la precipitación en minutos.

X_0, C_1, C_2 : Parámetros usados en la ecuación de la intensidad.

Los parámetros C_1 , X_0 y C_2 de la ecuación para el cálculo de la intensidad, dependen de la probabilidad de ocurrencia de una precipitación o su periodo de retorno, así mismo de la ubicación de la estación, a esto se debe la variación de los valores para cada uno de los parámetros mencionados. Estos parámetros son importantes porque permiten caracterizar la intensidad de una lluvia en la espacialización y permiten observar su variación a lo largo del territorio colombiano, así mismo su comportamiento. De esta forma, se permite analizar cómo es la influencia de los cambios de estos valores, para cada uno de los parámetros de acuerdo con su ubicación.

Las curvas IDF podrían ser alteradas por aumentos de las lluvias intensas causadas por el cambio climático. En la actualidad los fenómenos climáticos son cada vez más graves, frecuentes y extremos, lo que conlleva a cuestionarse ¿cómo diseñar y preparar una infraestructura que sea segura y hacerles frente a todos estos cambios climáticos?, es aquí donde comienza a hacer un análisis de cómo influyen estos cambios extremos en las curvas IDF, cómo afecta, que cambios hay y como es el comportamiento, entre otras incógnitas más.

Durante muchos años este factor no se ha tenido en cuenta ya que se hablaba de precipitaciones estacionarias que no varían a través del tiempo, sin embargo, con el pasar de los años y en vista de la problemática ambiental que se vive actualmente, este parámetro ha tomado gran importancia en los estudios a realizar para un correcto diseño de estructuras hidráulicas. Según diferentes estudios realizados la no inclusión de la variación del clima en la estimación de curvas IDF subestima hasta en un 60% los resultados. [11]

Los eventos extremos que han ocurrido en el país, como los invernales del 2010 y 2011, el fenómeno de la niña, los desastres ambientales y las afectaciones sobre la población evidencian la problemática y vulnerabilidad de las infraestructuras de drenaje, estructuras de transporte terrestre, el deficiente manejo de las cuencas hidrográficas, entre otras infraestructuras que se han visto afectadas ante la ocurrencia de eventos extremos, comprometiendo su integridad, evidenciando la importancia de estudiar la influencia del cambio climático sobre la curvas Intensidad-Duración-Frecuencia. [12]

5.4 APROXIMACIONES DE CURVAS IDF

El Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM), tiene a su disposición un gran número de estaciones pluviométricas a nivel nacional, con el fin de obtener datos hidrológicos para la posterior creación de las curvas IDF, así mismo este instituto tiene una ecuación de intensidad base para la construcción de estas curvas, sin embargo, diversas instituciones educativas del país han recreado las curvas IDF, empleando diversas ecuaciones para determinar la intensidad. A continuación, se presenta una recopilación de documentos encontrados a nivel nacional en donde emplean diversas ecuaciones y diversos métodos para la creación de las curvas IDF:

5.4.1 Elaboración de curvas IDF sintéticas regionalizadas (Rodrigo Vargas, Mario Diaz Granados).

Para esta investigación se recopilaron aproximadamente 250 curvas IDF para las diferentes estaciones en Colombia. La información fue tomada con base a diferentes estudios de ingeniería, artículos, entre otros, así como en el FONADE, la EAAB, la C.V.C, las EEPPI, CENICAFE, entre otras firmas principales de consultoría en Colombia. Las curvas consideradas fueron aquellas que se calcularon por medio de métodos tradicionales de análisis de frecuencia puntuales y que se pudiera conocer unos mínimos criterios de determinación. Posteriormente, se procedió a seleccionar aquellas curvas que fueron determinadas al menos con diez años de registros pluviográficos, obteniendo finalmente un total de 170 curvas IDF reales para el desarrollo de la investigación. [13]

A continuación, se muestran las ecuaciones que describen las curvas IDF:

Bernard propuso una ecuación general para las curvas Intensidad, duración frecuencias (IDF).

Ecuación 2. Ecuación general Bernard 1932

$$I = a * \frac{T^b}{t^c}$$

Donde;

I: Intensidad media en mm/h

T: Tiempo de retorno en años

t: Duración en horas

a, b y c: Constantes (Dependen del sitio/ubicación en que se encuentren)

Por otra parte, Powell propuso en ese mismo año (1932) los valores de los parámetros *b* y *c* de la ecuación de Bernard anteriormente mencionada, como *b* = 0.25 y *c* = 0.75 . Por lo tanto, la ecuación de Powell se describe como:

Ecuación 3. Ecuación de Powell 1932.

$$I = K * \frac{T^{0.25}}{t^{0.75}}$$

Donde;

K: Constante que depende del sitio/ubicación

T: Tiempo de retorno en años

t: Duración en horas

- Ecuaciones para estimar curvas IDF:

Bell en 1969 propone un método que, con base en información de Estados Unidos continental, Hawaii, Alaska, Puerto Rico, Australia, Suráfrica y Rusia, se estime curvas IDF. Así mismo, propuso una ecuación para estimar las curvas a partir de información de nivel horario ($P_{2,60}$) tal como se muestra a continuación:

Ecuación 4. Estimación de curvas con base al nivel horario $P_{2,60}$.

$$P_{T*t} = (0.35 * \ln(T) + 0.76) * (0.54 * t^{0.25} - 0.50) * P_{2,60}$$

Donde;

P_{T*t} : Profundidad de precipitación, en pulgadas, que corresponde a una precipitación con duración de *t* minutos y un periodo de retorno de *T* años.

La ecuación anterior es válida para periodos de retorno entre 2 y 100 años y entre 5 y 120 minutos. Bell propone estimar $P_{2,60}$ a partir de información a nivel diario con base a relaciones empíricas desarrolladas por Hershfield y Wilson en 1955: [13]

$$P_{2,60} = 0.17 M N^{0.33} \quad \text{Si } 0.0 < M < 2.0 \text{ pulg} \quad \text{y } 1 < N \leq 80$$

$$P_{2,60} = 0.21 M^{0.67} N^{0.33} \quad \text{Si } 2.0 < M < 4.5 \text{ pulg} \quad \text{y } 1 < N \leq 80$$

Donde;

M: Promedio del valor máximo anual de precipitación diaria

N: Número promedio anual de días con tormenta

Chen en 1983 propuso una fórmula generalizada para las curvas IDF en EEUU, a continuación, se muestra la ecuación:

Ecuación 5. Ecuación generalizada de Chen para curvas IDF.

$$I_t^T = \frac{a * I_1^{10} \log(10^{2-x} T^{x-1})}{(t + b)^c}$$

Donde;

I_t^T : Intensidad en pulg/h

T: Tiempo de retorno en años

t: Duración en horas

x : Relación R_t^{100} / R_t^{10}

a, b y c : Parámetros que dependen de la relación R_1^{10} / R_{24}^{10}

R_t^T Es la profundidad de precipitación correspondiente a una duración t y un período de retorno T .

Kothyari y Garde en 1992, realizaron un estudio para la India con 80 curvas IDF reales, con base a diferentes ecuaciones evaluadas y propuestas en la literatura ellos propusieron una nueva ecuación, tal como se muestra a continuación:

Ecuación 6. Estimación de curvas IDF Kothyari y Garde en 1992.

$$I = C \frac{T^{0.20}}{t^{0.71}} (R_{24}^2)^{0.33}$$

Donde;

I : Intensidad media en mm/h

T : Tiempo de retorno en años

t : Duración en horas

R_{24}^2 : Profundidad de precipitación en mm correspondiente a un $T= 2$ años y $t= 24$ horas.

C : Constante, depende de las estaciones analizadas.

- **Ecuaciones propuestas para Colombia (Rodrigo Vargas, Mario Diaz Granados) [13]**

Se consideró apropiado utilizar la de ecuación de Kothyari y Garde de una forma más generalizada, tal como se muestra a continuación:

Ecuación 7. Ecuación generalizada Kothyari y Garde.

$$I = a * \frac{T^b}{t^c} * (R_{24}^2)^d$$

Posteriormente, se calibró la ecuación. Los resultados de la regresión realizada indicaron que la ecuación de mejor ajuste y con un coeficiente de determinación $r^2=0.91$, se da como:

Ecuación 8. Ecuación generalizada calibrada.

$$I = 0.65 * \frac{T^{0.22}}{t^{0.62}} * (R_{24}^2)^{0.92}$$

Reemplazando el término R_{24}^2 por el promedio del valor máximo anual de precipitación diaria (M) en la ecuación 7, es:

Ecuación 9. Ecuación generalizada Kathyari y Garde modificada.

$$I = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d$$

Se realiza un ajuste de la ecuación agregando un nuevo parámetro, teniendo en cuenta así el régimen de lluvias de un sitio, se adicionó el número de días con lluvia al año a la ecuación, la ecuación es:

Ecuación 10. Ecuación con parámetro N.

$$I = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d * N^e$$

En la anterior ecuación a,b,c,d y e hacen referencia a unos coeficientes determinados mediante análisis de regresión. N es el promedio de los días con lluvia al año. Con el coeficiente de determinación $r^2=0.91$ la ecuación queda:

Ecuación 11. Ecuación con $r^2=0.92$.

$$I = 1.83 * \frac{T^{0.22}}{t^{0.62}} * M^{0.87} * N^{-0.17}$$

A continuación, se muestran 2 ecuaciones que incluyen dos nuevos parámetros, después de haber calibrado las 165 curvas y verificado las ecuaciones 9 y 10:

Ecuación 12. Ecuación con el parámetro PT'.

$$I = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d * N^e * PT'$$

DONDE; PT' hace referencia a la precipitación media anual en mm.

Ecuación 13. Ecuación con el parámetro ELEV'.

$$I = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d * N^e * PT' * ELEV^g$$

DONDE; ELEV' hace referencia a la elevación sobre el nivel del mar en msnm.

A continuación, se muestra una tabla con los valores de parámetros para las ecuaciones 9,10,11,12,13.

Tabla 3. Valores obtenidos de los parámetros para las 165 curvas analizadas.

Ecuación	A	B	C	D	E	F	g	r ²
Ec. 9	2.16	0.19	0.62	0.63				0.88
Ec. 10	2.83	0.19	0.62	0.62	-0.04			0.88
Ec. 12	3.87	0.19	0.62	0.35	-0.33	0.32		0.89
Ec. 13	3.69	0.19	0.62	0.32	-0.23	0.30	-0.03	0.89

Fuente: Rodrigo Vargas y Díaz granados.

5.4.2 Elaboración curvas IDF, estaciones: Cinera villa Olga y santa Isabel- municipio de Cúcuta- Colombia.

Para la elaboración de este estudio se llevó a cabo el convenio No. 183/03 entre la Universidad de Pamplona y el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM), en él se acordó la elaboración de las curvas IDF para las estaciones Cinera Villa Olga y Santa Isabel ubicadas en el municipio de Cúcuta. En el convenio se establece que el IDEAM se compromete a brindar información almacenada en los pluviogramas ubicados en el área de estudio, y en base a esta información la Universidad de Pamplona se compromete a la elaboración de las curvas IDF de las estaciones mencionadas anteriormente. [14]

- Metodología:

Esta investigación se basó en la metodología de distribución de valores extremos utilizando análisis de frecuencias, para esto inicialmente fue necesario compilar todos los registros pluviográficos disponibles por el IDEAM para las estaciones Cinera Villa Olga y Santa Isabel.

En base a esta información se determinaron los cinco eventos más representativos por año en cada una de las estaciones, en este caso la estación Santa Isabel presentó un total de 89 registros mientras que la estación Cinera Villa Olga presentó alrededor de 103. Es importante aclarar que los eventos más representativos hacen referencia a los registros de mayor intensidad. [14]

Estos registros de mayor intensidad permitieron determinar el volumen de precipitación por cada estación, para esta investigación el análisis se realizó cada 10 minutos, por un lapso de 6 horas, teniendo como inicio el momento en el cual empieza la lluvia; los valores de cero reportados hacen referencia a lluvias que finalizan antes de este tiempo. Con los valores adquiridos de volumen se realizaron sumatorias sucesivas para lapsos de 20, 30, 60, 120, y 360 minutos, y en base a esta información se realizó un análisis estadístico de datos para las dos estaciones de estudio. [14]

Seguido, se eligió el tipo de distribución de probabilidad a emplear, en este caso se trabajó con la distribución Gumbel o de Valor Extremo tipo I, ya que esta distribución es la que presenta un mejor comportamiento en el ajuste de los datos; de esta manera se determinaron los valores de los parámetros, necesarios para aplicar esta distribución en cada una de las estaciones, a continuación, se evidencian los valores obtenidos: [14]

Tabla 4. Valores de los parámetros para cada duración, en la estación Santa Isabel.

VALOR	DURACIÓN (min)					
	10	20	30	60	120	360
σ	3,51	4,80	7,99	13,048	21,52	32,56
μ	17,59	28,21	34,44	46,824	58,22	76,41

Fuente: (Maldonado et al. , 2015)

Tabla 5. Valores de los parámetros para cada duración, en la estación Cinera-Villa Olga.

VALOR	DURACIÓN (min)					
	10	20	30	60	120	360
σ	3,179	5,014	7,778	12,481	2,03	35,51
μ	18,53	30,38	40,21	56,465	74,57	85,34

Fuente: (Maldonado et al. , 2015)

Finalmente se realizaron las gráficas de las curvas IDF, para esto se seleccionaron los periodos de retorno según las indicaciones del RAS 2000, en este orden de ideas, se trabajaron periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Seguido se obtuvieron los valores de la variable reducida (YT) por cada periodo de retorno mencionado anteriormente, cabe aclarar que esta variable relaciona la magnitud del evento máximo con la función de distribución de probabilidad de Gumbel: [14]

Ecuación 14. Variable reducida YT.

$$YT = -\ln\left[\ln\left(\frac{T_r}{T-1}\right)\right]$$

Donde;

T_r : Periodo de retorno en años

Con los valores determinados anteriormente se calcula la magnitud del evento máximo (XT) para los mismos periodos de retorno, en cada una de las estaciones analizadas.

Ecuación 15. Magnitud del evento máximo.

$$XT = \mu + \sigma YT$$

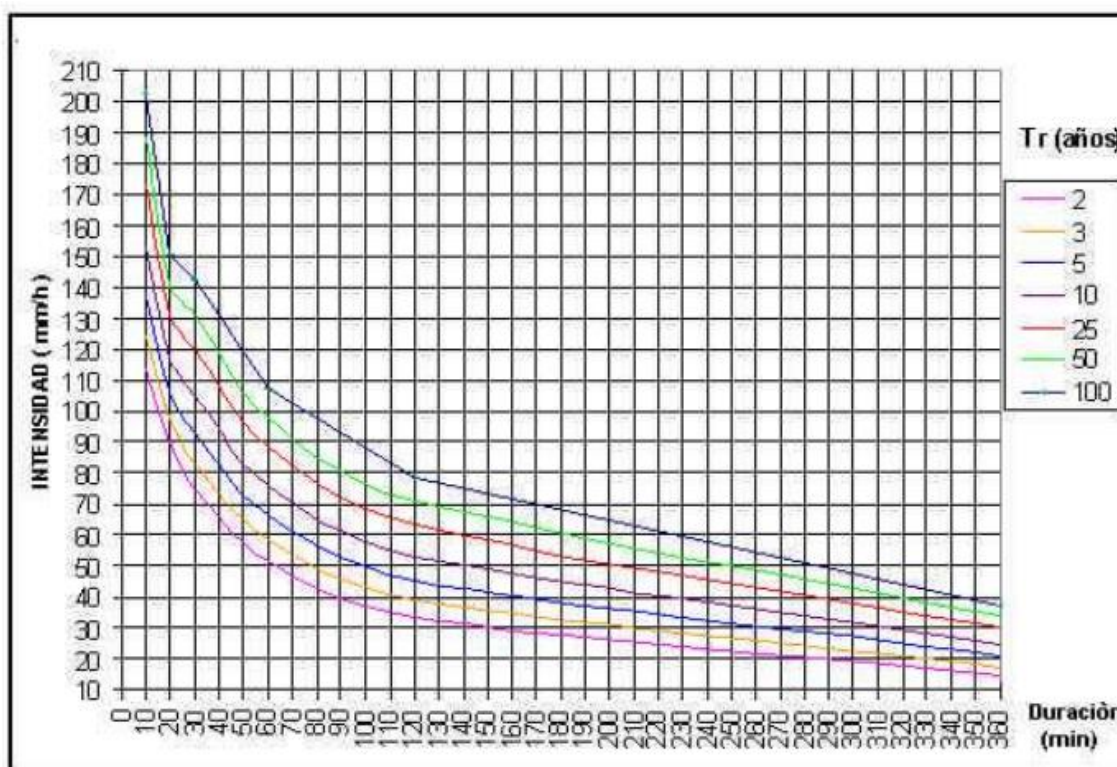
Donde;

μ, σ : Parámetros obtenidos en la función de distribución de probabilidad de Gumbel.

YT: Valor de la variable reducida.

Como último paso y en base a los datos anteriores, se procede a la elaboración de las curvas IDF mediante el método del valor extremo con análisis de frecuencias para la serie máxima anual, en donde el eje X hace referencia a las duraciones determinadas, mientras que el eje Y representa la intensidad. A continuación, se evidencian las curvas IDF obtenidas para la estación Santa Isabel: [14]

Ilustración 3. Curvas IDF estación Santa Isabel.



Fuente: (Maldonado et al. , 2015)

5.4.3 Regionalización de ecuaciones para el cálculo de curvas de intensidad, duración y frecuencia mediante mapas de isolíneas en el departamento de Boyacá.

Este artículo tiene como finalidad desarrollar un modelo que se pueda emplear como base para definir la ecuación que permita relacionar las variables IDF a partir de información relevante como las coordenadas de localización en cualquier punto relacionado al área de estudio: [15]

- Metodología:

Inicialmente se determinó el área de estudio, en este caso toda la investigación se llevó a cabo en el área comprendida por el departamento de Boyacá, específicamente el área donde se ubican las siguientes 20 estaciones que según el IDEAM poseen información pluviométrica y pluviográfica:

Tabla 6. Estaciones meteorológicas empleadas para el estudio.

NOMBRE ESTACIÓN	CÓDIGO
Almeida	35070260
Apto A Lleras	24035340
Apto Furatena	23125140
Azulejos Los	24030820

Belencito	24035150
Copa La	24035040
Garagoa	35070080
Guayata La Granja	35070110
Guican	24035070
Otanche	23125080
Páez	35085030
Potrerito	35090010
Pto. Boyacá	23115010
San Pedro Iguaque	24010830
Sativanorte	24035320
Sutatenza	35075020
Tunguavita	24035170
Villa Carmen	24015220
Villa Luisa	35075030
Vivero El	35085040

Fuente: Jorge Enrique Muñoz y Eduardo Zamudio.

En segundo lugar, se recopiló información presente en las bandas pluviográficas de la estación Páez para intervalos de 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 y 360 minutos y con base a esta información se determinó la intensidad máxima multianual empleando la siguiente ecuación: [15]

Ecuación 16. Intensidad máxima multianual.

$$i = \frac{P(mm)}{d(min)} * \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \right) = \left[\frac{mm}{h} \right]$$

Donde;

i: Intensidad $\left(\frac{mm}{h} \right)$

P: Precipitación (mm)

d: Duración (min)

Al finalizar la determinación de la intensidad máxima multianual se relaciona toda la información disponible con la función de probabilidad que mejor se ajusta a cada valor, en este caso los autores determinan que la función adecuada es la distribución de Gumbel. Posteriormente con las variables determinadas a partir de esta distribución se calcula la intensidad de precipitación máxima, empleando la siguiente ecuación: [15]

Ecuación 17. Intensidad de precipitación máxima.

$$i = \frac{K * T^m}{(d + d_0)^n}$$

Donde;

i: Intensidad de precipitación máxima mm/h

d: Duración de la lluvia (min)

d₀: Constante (min)

K, m, n: Constantes adimensionales

Como se puede observar, la ecuación 17 posee cuatro variables (K, m, d_o, n), sin embargo, al realizar un ajuste de las series se determinó la variable n presenta siempre un comportamiento con valores de 1, por tanto, la ecuación se reduce a solo tres variables (K, m, d_o), cabe aclarar que este comportamiento solo es válido para la región de estudio.

Finalmente se realiza el proceso de regionalización en el cual se decide emplear el método del mapa de isolíneas, debido a que la magnitud de las constantes está cercana unas de otras. [15]

5.4.4 Análisis de confiabilidad de metodologías para la estimación de curvas sintéticas regionalizadas de intensidad, duración y frecuencia, para el departamento de Boyacá Colombia.

Este trabajo analiza las ecuaciones empleadas por el ingeniero Mario Díaz Granados, cada una de estas ecuaciones se aplica en las 20 estaciones de estudio ubicadas en el departamento de Boyacá. Básicamente este documento presenta una recopilación y análisis de los documentos 1 y 3 planteados al inicio de esta investigación.

- Metodología:

Para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo se realizó una investigación bibliográfica en base diversos estudios relacionados con la creación de las curvas IDF. Las estaciones por analizar concuerdan con las estaciones empleadas en el artículo 3 "Regionalización de ecuaciones para el cálculo de curvas de intensidad, duración y frecuencia mediante mapas de isolíneas en el departamento de Boyacá" mencionado anteriormente.

Teniendo como base los documentos recopilados anteriormente se seleccionaron los datos de precipitación máxima para intervalos de tiempo de (10, 20, 30, 60, 120, 240, 360 minutos) para cada una de las 20 estaciones. De igual manera, se tomaron los valores de los parámetros K, m, n . y se recopiló información en cuanto a los diversos valores de precipitación disponibles en el archivo técnico hidrometeorológico del IDEAM. [16]

Con la información obtenida anteriormente se realizó una estimación de los siguientes parámetros: [16]

M: Promedio multianual del valor máximo anual de precipitación diaria (mm).

N: Promedio multianual del número de días con lluvia al año.

PT: Precipitación media anual (mm).

ELEV: Elevación sobre el nivel del mar (msnm).

Seguido por medio de la regresión lineal múltiple se calcularon los coeficientes a, b, c, d, e, f y g para cada una de las cinco ecuaciones base de este documento: [16]

Ecuación 1

Ecuación 18. Intensidad propuesta por Bernard.

$$i = a * \frac{T^b}{t^c}$$

Donde;

i: Intensidad media mm/h

T: Tiempo de retorno (años)

t: Duracion (horas)

a, b, c: Constantes que dependen del sitio.

Finalmente, mediante el análisis de regresión lineal se determinó que:

$$a = 29,33$$

$$b = 0,40$$

$$c = 0,24$$

Ecuación 2

Ecuación 19. Intensidad propuesta por Kothyari y Garde.

$$i = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d$$

Donde;

i: Intensidad media mm/h

T: Tiempo de retorno (años)

M: Valor maximo anual de precipitaion diaria (mm)

a, b, c, d: Constantes que dependen del sitio.

Finalmente, mediante el análisis de regresión lineal se determinó que:

$$a = 60,22$$

$$b = -0,14$$

$$c = 0,18$$

$$d = -0,11$$

Ecuación 3

Ecuación 20. Intensidad propuesta por Bell.

$$i = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d * N^e$$

Donde;

i: Intensidad media mm/h

T: Tiempo de retorno (años)

t: Duracion (horas)

M: Valor maximo anual de precipitaion diaria (mm)

N: Promedio del numero de dias con lluvia al año

a, b, c, d, e: Constantes que dependen del sitio

Finalmente, mediante el análisis de regresión lineal se determinó que:

$$\begin{aligned}a &= 47,84 \\b &= 0,02 \\c &= 0,20 \\d &= -0,04 \\e &= -0,03\end{aligned}$$

Ecuación 4

Ecuación 21. Ecuación adicional para determinar la intensidad.

$$i = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d * N^e * PT^f$$

Donde;

i: Intensidad media mm/h

T: Tiempo de retorno (años)

t: Duracion (horas)

M: Valor maximo anual de precipitaion diaria (mm)

N: Promedio del numero de dias con lluvia al año

PT: Precipitacion media anual (mm)

a, b, c, d, e, f: Constantes que dependen del sitio.

Finalmente, mediante el análisis de regresión lineal se determinó que:

$$\begin{aligned}a &= 45,64 \\b &= 0,07 \\c &= 0,21 \\d &= -0,02 \\e &= -0,02 \\f &= -0,02\end{aligned}$$

Ecuación 5

Ecuación 22. Ecuación adicional para determinar la intensidad.

$$i = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d * N^e * PT^f * ELEV^g$$

Donde;

i: Intensidad media mm/h

T: Tiempo de retorno (años)

t: Duracion (horas)

M: Valor maximo anual de precipitaion diaria (mm)

N: Promedio del numero de dias con lluvia al año

PT: Precipitacion media anual (mm)

ELEV: Elevacion sobre el nivel del mar (msnm)

a, b, c, d, e, f: constantes que dependen del sitio

Finalmente, mediante el análisis de regresión lineal se determinó que:

$$\begin{aligned}a &= 44,72 \\b &= 0,08\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c &= 0,21 \\
 d &= -0,02 \\
 e &= -0,01 \\
 f &= -0,01 \\
 g &= -0,01
 \end{aligned}$$

Seguido se realizó la regionalización de cada uno de los parámetros obtenidos anteriormente, al hacer este análisis se encontró que todos los parámetros relacionados con la ecuación 1 no poseen relevancia ya que desprecian información relevante como las características hidrológicas de la zona. [16]

Finalmente, se calculan diferentes tipos de intensidades según todos los datos determinados y las ecuaciones mencionadas anteriormente. Con cada uno de los resultados obtenidos se realiza una configuración de las estaciones en estudio, según la similitud, en este caso se obtiene un total de 4 regiones. Cumpliendo con esto el objetivo principal de este documento, el cual consiste en emplear estos parámetros para las zonas aledañas de estudio. [16]

5.4.5 Cálculo de curvas intensidad-duración-frecuencia empleando métodos estadísticos y probabilísticos sobre información pluviográfica de las estaciones el cardón y Sena, correspondientes al área operativa de la red meteorológica del IDEAM en el departamento de Boyacá.

Esta investigación se basó en el cálculo y construcción de las curvas IDF, teniendo como base la información pluviográfica para dos estaciones pertenecientes al IDEAM en el departamento de Boyacá: estación cardón y estación Sena; es importante mencionar que estas estaciones poseen registros de antigüedad de 40 y 20 años respectivamente. [17]

- Metodología:

De igual manera que todos los documentos mencionados anteriormente, se debe iniciar el análisis definiendo principalmente la zona de estudio, en este caso se trabajó con dos estaciones pluviográficas ubicadas en el departamento de Boyacá, específicamente en los municipios de Socotá y Sogamoso.

Seguido se evaluaron todos los registros de lluvias en rangos de 10 minutos, esto se hizo con el fin de obtener la precipitación máxima para cada intervalo (10,20,30,60,120,180,240,360 minutos) en las dos estaciones en estudio. Con los datos anteriores como referencia se procede a aplicar la fórmula de intensidad, para determinar las intensidades máximas de precipitación y posteriormente los resultados se ordenan de mayor a menor. [17]

Ecuación 23. Intensidad máxima de precipitación.

$$i = \frac{P(mm)}{t(min)} * \left(\frac{60 min}{1 h} \right)$$

Donde;

- i*: Intensidad mm/h
- P*: Precipitación (mm)
- t*: Duración (min)

Al finalizar el cálculo de intensidades se proceden a aplicar las funciones de distribución de probabilidad, en este caso se analizaron: distribución normal, Log-normal y Gumbel. En cada distribución se determinaron los parámetros necesarios a aplicar en cada una de las estaciones. [17]

Parámetros distribución normal, estación El cardón:

- $m= 23,29$
- $s= 7,23$

Parámetros distribución Log-normal, estación El cardón:

- $a= 3,11$
- $b= 0,29$

Parámetros distribución Gumbel, estación El cardón:

- $X= 23,29$
- $s= 7,23$
- $sy=0,9676$
- $my=0,4996$
- $a=0,13$
- $b=19,56$

Teniendo como referencia los datos anteriores se determina la distribución que mejor se ajusta empleando como medio la prueba de bondad de KOLMOGOROV-SMIRNOV, de igual manera se determina el error cuadrado mínimo; al culminar este análisis los autores encontraron que la distribución que mejor se ajusta es Gumbel. Teniendo esto como referencia se decide calcular las intensidades para periodos de retorno de 3,5,10,25,50 y 100 años. [17]

Finalmente se emplea la siguiente ecuación para determinar la intensidad:

Ecuación 24. Intensidad máxima de precipitación (mm/h).

$$i = \frac{K * T^m}{(t + t_0)^n}$$

Donde;

- i*: Intensidad de precipitación máxima mm/h
- t*: Duración de la lluvia (min)
- t*₀: Constante (min)
- K, m, n*: Constantes adimensionales

Para esto se determinan los parámetros *t*₀, *n*, *k*, *m* por medio del método de mínimos cuadrados y métodos de prueba error, en este orden de ideas se obtienen las siguientes ecuaciones:

Ecuación 25. Intensidad estación el Cardón.

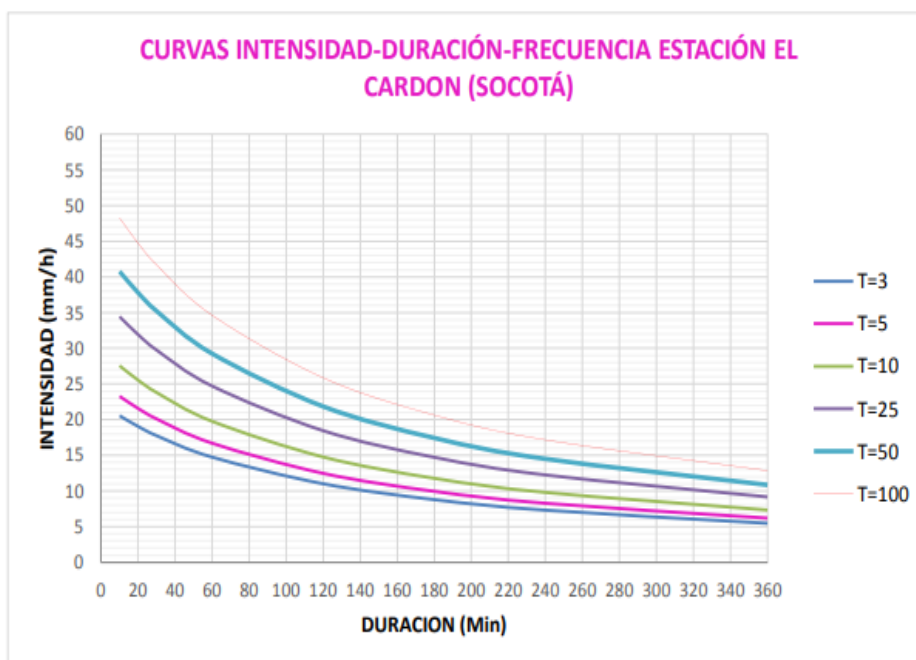
$$i = \frac{1996,81 * T^{0,2435}}{(t + 116,98)^1}$$

Ecuación 26. Intensidad estación Sena.

$$i = \frac{1014,98 * T^{0,4361}}{(t + 19,16)^1}$$

A continuación, se evidencian las curvas IDF obtenidas para la estación Cardón:

Ilustración 4. Curvas IDF obtenidas estación Cardón (Socotá).



Fuente: Marly M. Cortés.

5.5 INTERPOLACIÓN ESPACIAL

La interpolación espacial también conocida como espacialización, es un proceso clave en diferentes campos de investigación, se basa en estimar valores de localizaciones donde no se tienen medidas, a partir de otros valores conocidos. Las variables climáticas son las que requieren frecuentemente un proceso de interpolación espacial, ya que no existen ilimitadas estaciones meteorológicas que permitan conocer valores exactos de precipitación sobre todo un territorio o área de estudio. Existen diferentes métodos de interpolación espaciales y que se pueden agrupar en; determinísticos, probabilísticos, redes neuronales, artificiales, físicos e híbridos, entre otros más. [7]

Los métodos de interpolación permiten su cálculo por medio de herramientas computacionales con un gran componente espacial, permitiendo así estimaciones rápidas con información de los puntos a su alrededor. Un ejemplo de esto es el Sistema de Información Geográfica, QGIS, que presenta amplias posibilidades en sus métodos de

interpolación que pertenecen al grupo de métodos determinísticos, los principales métodos de interpolación disponibles son:

5.5.1 Vecino más cercano (Nearest Neighbor)

Este método también llamado método de Thiessen o Voroni, [7] se basa en la generación de polígonos de Voroni, constituye el método más básico y simple de interpolación vectorial, se basa en la distancia euclidiana, obviando cualquier tipo de valor asignado a los puntos de muestreo. Permite la división del espacio en áreas para cada uno de los puntos de medición registrados, los polígonos de Voroni quedan definidos por medio de líneas que delimitan la región a la que pertenece el punto más cercano. [18]

5.5.2 Interpolación IDW (Inverse Distance Weighting)

Método también conocido como ponderación inversa a la distancia, presupone que la variable cartográfica que se representa disminuirá su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. Es un método de fácil implantación, pero no calcula los errores en la predicción, no seleccionan los puntos adecuados para el cálculo, usualmente es utilizado como método en la comparación de resultados con otros métodos de interpolación. [7]

Su ecuación es la siguiente:

Ecuación 27. Estructura matemática método IDW.

$$V_e = \frac{\sum_1^n \frac{V_i}{d^p i}}{\sum_1^n \frac{1}{d^p i}}$$

Donde:

Ve : Valor a estimar

p: Potencia (p > 0)

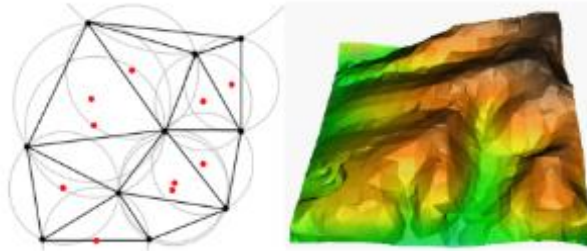
Vi, di: Valores conocidos de la variable para cada punto

La sumatoria de las ponderaciones es 1, es importante tener en cuenta que a menor distancia mayor el peso en la ponderación. [7]

5.5.3 Interpolación TIN

Este método genera una superficie de triángulos que se forman a partir de unos vértices con valores conocidos, se conectan mediante aristas y generan una red de triángulos, donde cada uno representa una zona a lo que se refiere la variable estudiada. [18]

Ilustración 5. Interpolación TIN.



Fuente: Mitas , L., Mitasova , H. (1999).

5.5.4 Interpolación mediante Spline

Esta herramienta utiliza un método de interpolación que estima valores por medio de una función polinómica, minimiza la curvatura de la superficie, generando una superficie de alisado partir de los puntos de entrada. [18]

Para el uso de esta herramienta es importante tener una gran cantidad de puntos para obtener una superficie más lisa.

5.5.5 Kriging

Es otro método de interpolación disponible en QGIS, pero a diferencia de los métodos anteriormente mencionados, este pertenece al grupo de modelos estadísticos, incluye la autocorrelación, permitiendo así una mayor certeza y precisión en los resultados, este método es más recomendable para trabajar con variables como la precipitación. [19]

Este método de interpolación plantea que la distancia entre los puntos de muestra hace referencia a una correlación espacial. Ajusta una función matemática a todos los puntos posibles dentro de un radio en específico, determinando el valor de salida para cada ubicación. Este método es similar a la interpolación IDW, ya que ponderan los valores circundantes medidos para el cálculo de la predicción de los valores no conocidos.

La fórmula general para ambos métodos de interpolación es la siguiente:

Ecuación 28. Fórmula general Método IDW, Método Kriging.

$$\check{Z}(S_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i)$$

Donde:

$Z(S_i)$: Valor medido en la ubicación No. 1

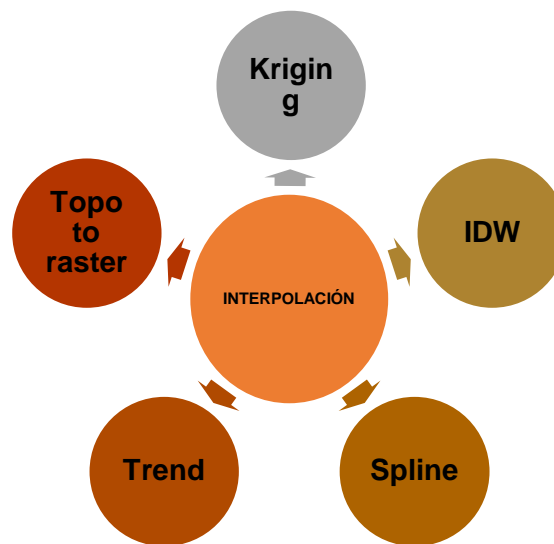
λ_i : Peso desconocido para valor medido en la ubicación No. 1

S_0 : Ubicación de predicción

N : Número de valores medidos

Otra herramienta computacional que permite la interpolación es **ArcGIS**, conjunto de softwares de los sistemas de información geográfica que permite la recopilación, organización, administración, análisis, distribución y compartir información geográfica. permite crear, compartir y utilizar mapas inteligentes, compilar información geográfica, crear y administrar bases de datos geográficas, resolver problemas relacionados con el análisis espacial, así mismo, permite crear aplicaciones basadas en mapas, dar a conocer y compartir información mediante la geografía y la visualización. El análisis espacial, es uno de los aspectos más interesantes de esta herramienta, tiene como objetivo originar a partir de los datos existentes información desconocida, esto permitirá aportar nuevas perspectivas a la toma de decisiones a la hora de analizar las variables de estudio, tomando decisiones cruciales que van más allá del alcance del simple análisis visual. [20]

Esquema 1. Métodos de interpolación. ArcGIS.



Fuente: Elaboración propia

5.5.6 Interpolación Trend

También conocida como interpolación por tendencia, es una interpolación polinómica que ajusta una superficie definida por una función matemática a los puntos de muestra de entrada, en otros términos, es tomar una porción de papel y ajustarlo entre puntos elevados, la interpolación por tendencia es un interpolador inexacto. Este método de interpolación genera una superficie suave que representa las tendencias graduales en la superficie y el área de interés. [21]

Hay dos tipos de interpolación tendencia:

- **Tendencia lineal:** Este interpolador utiliza una regresión polinómica con el fin de ajustar un plano por mínimos cuadrados al conjunto de puntos de entrada, crea un ráster de punto flotante.
- **Tendencia logística:** Es ideal para predecir la presencia o ausencia de un fenómeno dado en forma de probabilidad en un conjunto de ubicaciones (X,Y) en el espacio. El valor de la variable Z son sólo dos resultados posibles, es una variable aleatoria categorizada.

5.5.7 Interpolación topo to raster

Este método utiliza una técnica de interpolación de diferencia finita iterativa, es utilizado cuando se trabaja con datos topográficos, es diseñado específicamente para crear modelos digitales de elevación hidrológicamente correctos, es el único interpolador de ArcGIS diseñado para trabajar con entradas de curvas de nivel.

La interpolación Kriging e IDW manejan la misma información descrita en los métodos de interpolación de QGIS.

6. ALCANCE

El área de aplicación de esta investigación es el territorio nacional de la República de Colombia, aquí se encuentra distribuidas las 110 estaciones disponibles en el IDEAM a lo largo del área geográfica. Colombia se encuentra situada en la región noroccidental de América del Sur, limitada por dos océanos (el pacífico y el atlántico) y cinco países. Está conformada por 32 departamentos descentralizados y el distrito capital de Bogotá, se ubicada entre las coordenadas $12^{\circ} 30' 46''$ N y $4^{\circ} 13' 30''$ S y $66^{\circ} 50' 54''$ W y $79^{\circ} 01' 23''$ W, al este limita con Venezuela y Brasil, al sur con Ecuador y Perú, al norte con el mar Caribe, al noroeste con Panamá, y por el oeste con el Océano Pacífico. [22]

A continuación, se muestra un mapa de Colombia con la localización de las 110 estaciones meteorológicas del IDEAM a lo largo del territorio colombiano mencionadas anteriormente, cuentan con coordenadas SCR Geográfico WGS84 (EPSG: 4326). [23]

Ilustración 6. Mapa de Colombia con estaciones meteorológicas.



Fuente: Elaboración Propia.

7. ANTECEDENTES

En la siguiente tabla se encuentra un resumen de la revisión bibliográfica realizada para la elaboración de esta investigación:

Tabla 7. Revisión bibliográfica.

TITULO	AÑO	AUTORES	RESUMEN	TIPO DE DOCUMENTO
Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia.	2006	Rodrigo Vargas M. Ing. Civil, Programa Magister en Ing. Civil, Universidad de los Andes, Santafé de Bogotá, Colombia; Mario Diaz Granados O, Profesor asociado Depto. Ing. Civil y ambiental, Universidad de los Andes, Santafé de Bogotá, Colombia.	Este artículo se basó en evaluar las diferentes ecuaciones propuestas a partir de 165 curvas IDF ubicadas en diversas zonas del territorio colombiano, para esto se tuvieron en cuenta resúmenes multianuales pluviométricos de las mismas. Teniendo lo anterior como referencia se determinó la manera de constituir una alternativa para aquellas zonas donde solo se posee información de registros de lluvias a nivel diario, con base en esto los autores establecieron nuevas ecuaciones para cuatro grandes regiones de Colombia. Finalmente, se encontró que el nivel de confiabilidad de las curvas está directamente relacionado con la cantidad de información disponible para calibrar las ecuaciones correspondientes a cada región climatológica, y adicional a esto es necesario disponer de un mayor número de curvas reales para regiones como la Orinoquía y la Amazonía. [13]	Artículo de investigación.
Revisión y actualización de curvas intensidad-duración-frecuencia para el área metropolitana de Bucaramanga a partir de las series tiempo	2013	Adrián Emilio Rizo Ibáñez. Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.	Este trabajo de grado desarrolló una revisión y actualización de las curvas intensidad-duración-frecuencia para el área metropolitana de Bucaramanga, para esto se tuvo en cuenta las relaciones gráficas a partir de las series de tiempo de	Trabajo de grado.

máximos anuales y duración parcial.			máximos anuales (SMA) y duración parcial (SDP). Finalmente fue posible concluir que es recomendable el uso de las curvas IDF con base en las SDP para todo diseño de obras hidráulicas aledañas a la estación del IDEAM y Palonegro pues esto otorga una mayor confiabilidad; para zonas cercanas a la estación la Floresta, la graja y estación centro es recomendable emplear curvas con base en la SMA. [24]	
Influencia del cambio climático en las curvas IDF para el área metropolitana de Barcelona (España).	2013	Raúl Rodríguez; Xavier Navarro; M. Carmen Casas; Jaime Ribalaygua; Beniamino Russo; Laurent Pouget y Ángel Redaño.	Este artículo se enfocó en analizar la influencia del cambio climático en las precipitaciones extremas, especialmente en áreas urbanas vulnerables, densamente pobladas y con sistemas de alcantarillado complejo. Para esto se analizaron 114 series de precipitación diaria, a partir de seis estaciones termopluviométricas ubicadas en el área metropolitana de Barcelona. Como resultado se encontró una variación que depende del modelo de circulación general empleado y de la estación, adicional a esto se encontró que la precipitación diaria extrema aumentará en un 95% durante los años (2066-2099). [25]	Artículo de investigación.
Precipitación no estacionaria: Curvas intensidad-duración-frecuencia para infraestructuras de diseño en un clima cambiante.	2014	Linyin Cheng y Amir Aghkouchak. Universidad de California.	Este artículo se basó en estudiar la relación de los fenómenos climáticos extremos con las curvas IDF. Actualmente para diseñar estructuras hidráulicas se tiene en cuenta el concepto de intensidad, duración y frecuencia (IDF) a partir de precipitaciones no estacionarias; es decir, no varían estas variables con respecto al tiempo. Sin embargo, se considera que	Artículo de investigación.

			<p>las curvas IDF actuales subestiman las posibles extremas precipitaciones futuras, generando graves inundaciones. En este artículo se demostró que un clima estacionario puede subestimar un 60% de precipitación extrema, esto se fundamenta al emplear la inferencia Bayesiana. [11]</p>	
<p>El desarrollo de intensidad-duración-frecuencia (IDF) bajo incertidumbre del cambio climático: el caso de Bangkok, Tailandia.</p>	2017	<p>Ashish Shrestha; Mukand Singh Babel; Sutat Weesakul y Zoran Vojinavic.</p>	<p>Este artículo de investigación estudió la variación de la magnitud de los eventos hidrológicos en años siguientes debido al cambio climático. Las curvas IDF son medios esenciales para estudiar los sistemas de drenajes; en este trabajo se presenta un enfoque basado en la reducción de escala espacial proyectando las lluvias extremas y empleando nueve modelos de clima global. Finalmente se encontró que es necesario corregir el sesgo en la generación de IDF. [26]</p>	<p>Artículo de investigación.</p>
<p>Aplicación de diferentes metodologías para estimación de curvas intensidad-frecuencia-duración en Colombia.</p>	2002	<p>Jaime I. Vélez; Germán Poveda; Oscar Mesa; Carlos D. Hoyos; J. Freddy Mejía; Diana I. Quevedo, Luis F. Salazar y Sara C. Vieira. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.</p>	<p>En este artículo se realizó un análisis de diferentes metodologías para la estimación de las curvas intensidad, duración y frecuencia, para esto se empleó información de 51 estaciones con registros horarios de precipitación ubicados en los Andes tropicales de Colombia. Las metodologías empleadas fueron: ecuaciones paramétricas de Froehlich, Vargas y la teoría de multiescalamiento. Con esta última teoría se pudo demostrar que el coeficiente de variación es constante y posee un valor de $C_v = 0.25$. En las ecuaciones paramétricas de Vargas se encontró que al incluir la elevación no representa un aporte significativo en la</p>	<p>Artículo de investigación.</p>

			estimación de intensidades, sin embargo, se encontraron resultados relevantes al incluir otras ecuaciones. En las ecuaciones de Froehlich se encontró que el coeficiente de torrencialidad tiene una variabilidad espacial similar a la distribución de la precipitación media anual. [27]	
Análisis de confiabilidad de metodologías para la estimación de curvas sintéticas regionalizadas de intensidad, duración y frecuencia, para el departamento de Boyacá Colombia.	2016	Cristian Camilo Cuellar Tejada. Universidad distrital Francisco José de Caldas.	Este trabajo de grado analizó los métodos tradicionales para el cálculo de curvas IDF que requieren el uso de información pluviográfica, sin embargo, se consideró emplear ecuaciones que utilicen información pluviométrica para aquellas zonas donde solo se disponen registros de lluvias diarios. En este trabajo se evaluaron y analizaron los modelos de regionalización presentes en la literatura de la hidrología colombiana, se emplearon 20 estaciones hidrometeorológicas del IDEAM. Así mismo en este documento se realizó una comparación de los resultados obtenidos empleando las constantes analizadas por el ingeniero Mario Diaz granados y las ecuaciones halladas mediante el uso de información pluviométrica y pluviográfica. [8]	Trabajo de grado.
Desarrollo de un complemento de QGIS, para la estimación de curvas intensidad, duración y frecuencia a partir de datos de IDEAM.	2017	Dany Alexander Manrique López. Universidad distrital Francisco José de Caldas.	El objetivo de esta monografía se centró en la obtención de las curvas IDF para cualquier punto del territorio colombiano, a través del desarrollo de un complemento para el software QGIS. Se trabajaron temas como: análisis espacial, modelación espacial, programación orientada a objetos, ingeniería de	Monografía trabajo de grado.

			software, entre otras. Finalmente se logró crear un completo de QGIS llamado "Curvas IDF Colombia", el cual permite estimar los coeficientes de la ecuación generalizada de intensidad máxima de precipitación para diferentes duraciones y periodos de retorno. Este proyecto adicionalmente buscó contribuir al desarrollo de herramientas computacionales para la solución de problemas de ingeniería. [7]	
Evaluación de diferentes métodos de interpolación para la variable precipitación en el departamento de Caldas-Colombia.	2016	Adriana Cifuentes Carvajal. Universidad de Manizales.	El objetivo de este trabajo consistió en determinar la utilidad de diferentes métodos de interpolación en los diversos eventos climáticos en la zona andina, se emplearon los registros diarios de precipitación suministrados por la red climática de la Federación Nacional de cafeteros. El análisis se enfocó en generar superficies de datos de lluvia a escala de tiempo anual. Finalmente se comprobó que el método IDW mostró en los resultados una mayor precisión en la predicción, también es importante recalcar que para una mayor predicción en los resultados se deben emplear estaciones que contengan registros confiables con mayor número de años. [28]	Trabajo de grado.

<p>Cálculo de la precipitación media sobre la península de la Guajira usando el método de Thiessen.</p>	<p>2017</p>	<p>Neeck Sánchez Forero. Universidad militar nueva granada</p>	<p>Este artículo tuvo como base la visualización del proceso hidrológico de un territorio, en el cual se analizaron los datos de 24 estaciones meteorológicas ubicadas al norte de la península de la Guajira. El objetivo del artículo se centró en mostrar de manera gráfica los polígonos obtenidos a partir de la información dada por el IDEAM, permitiendo apreciar el comportamiento de las precipitaciones. Finalmente se obtuvo que más del 90% del área posee valores de precipitación entre medio y alto y solo el 9,73% tiene valores de lluvia bajos, asegurando que esta región del país tiene la capacidad de garantizar un adecuado flujo de precipitación. Así mismo en los lugares donde no se tenía información fue posible obtenerla gracias a los polígonos de Thiessen. [29]</p>	<p>Artículo de investigación.</p>
<p>Regionalización de curvas IDF en la sabana occidental del departamento de Cundinamarca.</p>	<p>2015</p>	<p>Jazmín Andrea Becerra Oviedo; Liza Fernanda Sánchez Mazorca. Universidad Santo Tomás.</p>	<p>El objetivo de este proyecto es abordar la regionalización de las curvas intensidad, duración y frecuencia mediante el uso de diferentes modelos hidrometeorológicos. Inicialmente se realizó el cálculo de las curvas IDF a partir de las intensidades registradas por los pluviógrafos, empleando el método de Gumbel y diferentes métodos estadísticos basados en la correlación lineal en función de las variables topográficas de la región. Seguido se utilizó la herramienta ArcGIS para obtener la interpolación de las intensidades en función de los métodos IDW, Kriging, y Spline. Finalmente se comprobó</p>	<p>Trabajo de grado.</p>

			que la regionalización de las intensidades permite conocer e interpolar la información concerniente a zonas donde no se cuenta con estaciones meteorológicas que realicen un registro sobre las precipitaciones. [30]	
Estacionalidad de las lluvias en Colombia.	2019	Viviana Urrea; Andrés Ochoa y Oscar Mesa	Este artículo explora el ciclo de lluvia anual en Colombia utilizando registros históricos de los indicadores de medición de 1706 y el conjunto de datos de precipitación del Grupo de Peligros Climáticos Infrarrojos con Datos de la Estación (CHIRPS). Hallaron cuatro tipos de regímenes de precipitación anual; unimodal, bimodal, mixto y como estacional. Los resultados encontrados permiten mejorar el diagnóstico estadístico de la variabilidad espacial de la estacionalidad de lluvias en Colombia. Este fenómeno, sin embargo, aún está lejos de ser entendido completamente en su contexto hidro climático. La migración anual de la Zona de vergencia Intertropical no es suficiente para explicar la diversidad de los regímenes de precipitación en Colombia. Los factores locales, como la topografía y la cobertura de la tierra, podrían jugar un papel importante en la ocurrencia y la duración de las temporadas de lluvia. [31]	Artículo de investigación.

Fuente: Elaboración Propia.

8. METODOLOGÍA

A continuación, se muestra una descripción detallada de los pasos a seguir para ejecutar y lograr de manera satisfactoria los objetivos planteados en el desarrollo de este proyecto; Como paso principal se realizó una revisión bibliográfica en base de datos, tesis realizadas, artículos científicos, revistas, páginas web, libros y demás fuentes confiables que sean relacionadas con los temas de esta investigación, logrando abarcar un campo más amplio en el tema de interés; posteriormente se recopiló y ordenó información relacionada con las estaciones climatológicas disponibles por el IDEAM, estas estaciones se clasificaron en las cinco regiones de Colombia (Región Andina, Región Caribe, Región Pacífico, Región Orinoquía, Región Amazonía) según la ubicación del departamento al cual pertenecen.

Finalizada esta clasificación se procedió a determinar la intensidad de lluvia por cada estación aplicando la ecuación general de intensidad propuesta por el IDEAM, para determinar estos valores se tomó como base la información suministrada por el instituto en relación con los parámetros C_1 , X_0 Y C_2 ; tomando lo anterior como referencia y por medio de diagramas de barras verticales e información estadística, se realizó el análisis de dispersión para cada parámetro.

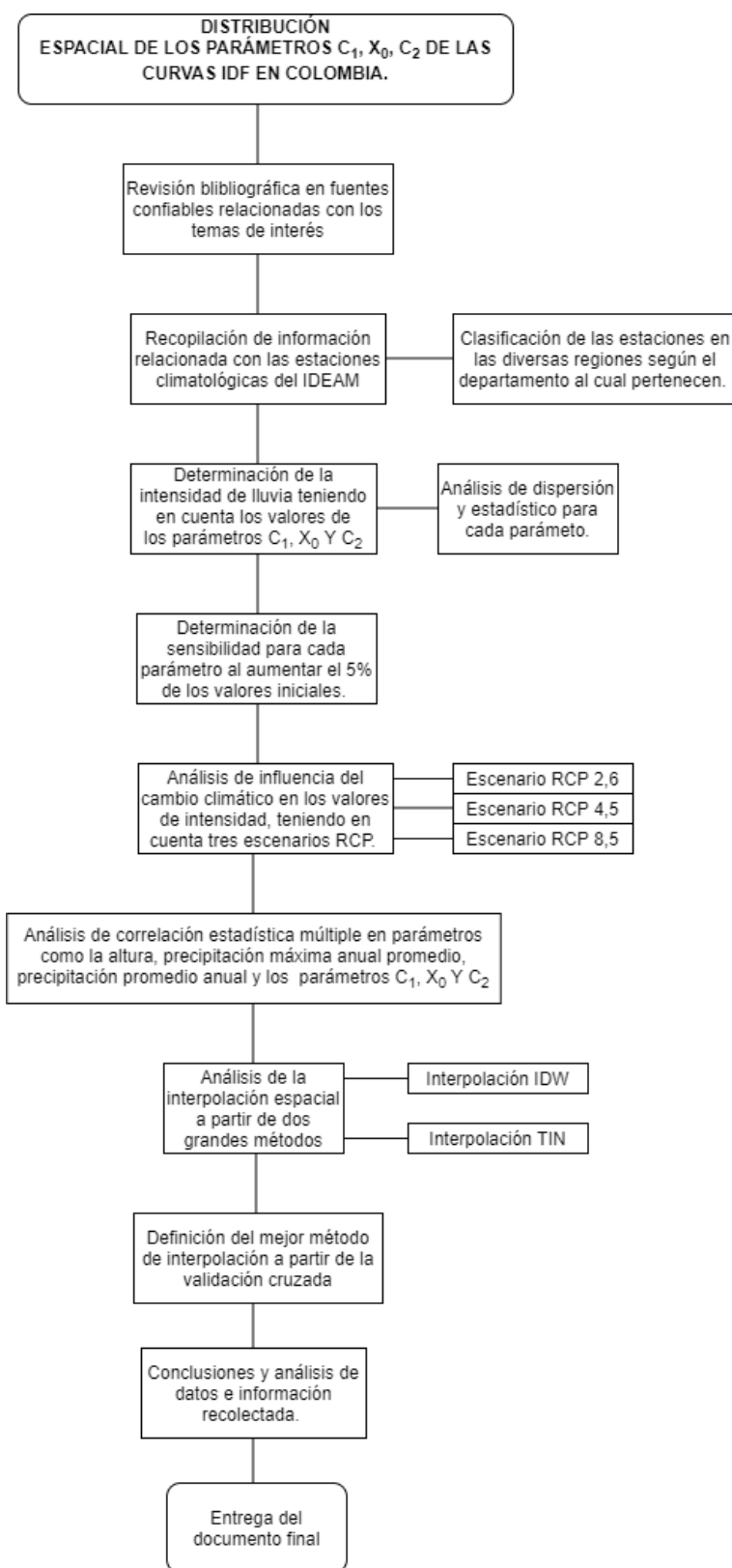
Posteriormente se determinó el parámetro más sensible al cambio, para esto se realizó un análisis de estaciones aleatorias por cada región y se afectó el valor de cada parámetro en un 5%, esto con el fin de observar el comportamiento o movimiento de las curvas, en este caso se tomó como referencia que cambios drásticos eran indicios de sensibilidad.

De igual manera se realizó un análisis de la influencia del cambio climático en los valores de intensidad, para esto se analizaron tres escenarios RCP en diferentes periodos, como resultado se obtuvo un porcentaje de influencia el cual se aplicó al parámetro relacionado con la precipitación que en este caso es C_1 y finalmente se determinaron los nuevos valores de intensidad, esta información se representó por medio de diagramas de cajas y bigotes. Así mismo, se realizó la correlación estadística múltiple, en la cual se analiza la relación y proporcionalidad de parámetros como la altura, precipitación máxima anual promedio, precipitación promedio anual y valores de los parámetros C_1 , X_0 y C_2 para periodos de retorno de 2, 50 y 100 años.

Finalmente se realizó la interpolación espacial por los métodos IDW y TIN y en base a esta información se realizó la validación cruzada, con el fin de definir el método de interpolación que mejor se adapta a los datos.

El siguiente esquema representa la metodología aplicada para el desarrollo de este proyecto:

Esquema 2. Metodología aplicada para el desarrollo del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

9. RESULTADOS

9.1 Zonas

De acuerdo con la división del territorio colombiano realizado por Diaz granados et al., 2006 y Viviana Urrea et al., 2019, optamos seguir con esta división para el desarrollo de este proyecto y poder realizar análisis de forma independientes con las estaciones que pertenezcan a una misma región. El territorio nacional se divide en las siguientes 5 grandes regiones, que posteriormente serán estudiadas y analizadas:

- Región Andina
- Región Caribe
- Región Pacífico
- Región Orinoquía
- Región Amazonia

9.2 Estaciones pluviográficas por regiones en Colombia

El instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM), posee una lista de las 110 estaciones pluviométricas a nivel nacional, sin embargo, para efectos de estudio estas estaciones se dividieron tal y como se mencionó anteriormente (región Andina, región Caribe, región Pacífico, región Orinoquía, región Amazonia), de acuerdo con esto las estaciones se encuentran distribuidas de la siguiente manera: [13] [31]

9.2.1 Región Andina

Tabla 8. Estaciones Región Andina.

REGIÓN ANDINA			
ITEM	CÓDIGO	NOMBRE DE ESTACIÓN	UBICACIÓN
1	11115020	Cañasgordas	Cañasgordas
2	16015501	Apto Camilo Daza	Cúcuta
3	16015020	Iser Pamplona	Pamplona
4	16025030	Salazar	Salazar
5	16035010	Tibú	Tibú
6	21015020	Sevilla	Pitalito
7	21015030	Parque arqueológico	San Agustín
8	21020020	Altamira	Altamira
9	21035020	Resina	Guadalupe
10	21105030	Algeciras	Algeciras
11	21115020	Apto Benito Salas	Neiva
12	21135020	Jabalcón	Saldaña
13	21135040	Media luna	Coyaima
14	21185030	Guamo	Guamo
15	21195190	Pasca	Pasca

16	21205230	Obs Met nacional	Bogotá D.C
17	21206990	Tibaitata	Mosquera
18	21210020	Las juntas	Ibagué
19	21210030	Pastales	Ibagué
20	21210080	El secreto	Ibagué
21	21210100	El rancho	Ibagué
22	21210110	El placer	Ibagué
23	21210120	La esmeralda	Ibagué
24	21210160	El Darién	Ibagué
25	21210220	El palmar	Ibagué
26	21255080	El salto	Ambalema
27	22025010	Apto Planadas	Planadas
28	22045010	Demostración GJA	Chaparral
29	23085140	San Francisco	San Francisco
30	23095010	Apto Pto Berrío	Puerto Berrío
31	23125130	Landázuri	Landázuri
32	23155030	Apto Yariguies	Barrancabermeja
33	23155040	El centro	Barrancabermeja
34	23195040	UIS	Bucaramanga
35	24010150	Simijaca	Simijaca
36	24011100	Isla del santuario	Fúquene
37	24015300	Villa de Leyva	Villa de Leyva
38	24025020	El cucharo	Pinchote
39	24035120	Surbata Bonza	Duitama
40	24035130	UPTC	Tunja
41	2612506	Apto el edén	Armenia
42	26135040	Apto Matecana	Pereira
43	26135110	Veracruz	Pereira
44	26155110	Apto la Nubia	Manizales
45	26155150	Las brisas	Villamaría
46	2618500069	Sonsón	Sonsón
47	26185020	Mesopotamia	La unión
48	26195020	ITA ANDES	Andes
49	26255020	Sta. Isabel	Valdivia
50	27015330	A. Olaya Herrera	Medellín
51	27015190	Guayabito	Santo Domingo
52	35070180	Sta. María	Santa María
53	35075040	Inst Agr Macanal	Macanal

Fuente: Elaboración propia

9.2.2 Región Caribe

Tabla 9. Estaciones Región Caribe.

REGIÓN CARIBE			
ITEM	CÓDIGO	NOMBRE DE ESTACIÓN	UBICACIÓN
1	15065160	Apto A. Padilla	Riohacha
2	13070150	Mocarí	Montería
3	14015010	Galerazamba	Santa Catalina
4	14015080	Apto Rafael Núñez	Cartagena de indias
5	15015120	Universidad tec. Magdalena	Santa Marta
6	15075030	Manaure	Manaure
7	17015020	Apto Sesquicentena	San Andrés
8	23205030	Sta. Rosa de Simití	Santa Rosa del Sur
9	25025080	Apto Rafael Barvo	Corozal
10	28025502	Apto Alfonso López	Valledupar
11	29015020	Carmen de Bolívar	El Carmen de Bolívar
12	29045190	A. E Cortissoz	Soledad
13	29045120	Las Flores	Barranquilla
14	29065020	Padelma	Zona Bananera

Fuente: Elaboración propia.

9.2.3 Región Pacífico

Tabla 10. Estaciones Región Pacífico.

REGIÓN PACÍFICO			
ITEM	CÓDIGO	NOMBRE DE ESTACIÓN	UBICACIÓN
1	11045010	Apto El Carano	Quibdó
2	21055030	Sta. Leticia	Puracé
3	26015020	Paletara	Puracé
4	26035030	Apto G. L. Valencia	Popayán
5	26055120	Universidad del Valle	Cali
6	26075010	Palmira ICA	Palmira
7	26095110	ICA Balboa	Buga
8	26105160	Apto Farfán	Tuluá
9	26125130	Cumbarco	Sevilla
10	51025090	Granja el Mira	Tumaco
11	51025020	Ricaurte	Ricaurte
12	52025030	Mercaderes	Mercaderes
13	52020100	Sierra LA	La sierra
14	52045010	Obonuco	Pasto
15	52045030	San Bernardo	San Bernardo

16	52055220	El paraíso	Túquerres
17	54075020	Bajo calima	Buenaventura
18	54075040	La misión	Buenaventura
19	26115040	Cent. Admo la unión	La unión
20	11135010	Sautata	Riosucio

Fuente: Elaboración propia.

9.2.4 Región Orinoquía

Tabla 11. Estaciones Región Orinoquía.

REGIÓN ORINOQUÍA			
ITEM	CÓDIGO	NOMBRE DE ESTACIÓN	UBICACIÓN
1	32035010	La Macarena	La Macarena
2	32095010	El viento	Mapiripán
3	34015020	Las gaviotas	Cumaribo
4	34035010	Tuparro Bocas Tomo	Cumaribo
5	34035020	El tapón	Cumaribo
6	35035010	Base aérea Apiay	Villavicencio
7	35035030	Salinas de Upin	Restrepo
8	35125010	HDA las margaritas	Puerto López
9	35190080	Tauramena	Tauramena
10	35215020	Apto Yopal	Yopal
11	37045010	Saravena	Saravena
12	37055010	Apto Arauca	Arauca
13	38015030	Apto Pto Carreño	Puerto Carreño

Fuente: Elaboración propia.

9.2.5 Región Amazonía

Tabla 12. Estaciones Región Amazonía.

REGIÓN AMAZONÍA			
ITEM	CÓDIGO	NOMBRE DE ESTACIÓN	UBICACIÓN
1	32107030	San José Guaviare	San José del Guaviare
2	44015010	Villa garzón	Villa garzón
3	44035020	Apto G. Artunduaga	Florencia
4	44147010	Araracuara	Solano
5	46015030	San Vicente Caguán	San Vicente del Caguán
6	47015030	Sibundoy	Sibundoy
7	47015040	Michoacán	Colón
8	48015050	A Vásquez Cobo	Leticia

Fuente: Elaboración propia.

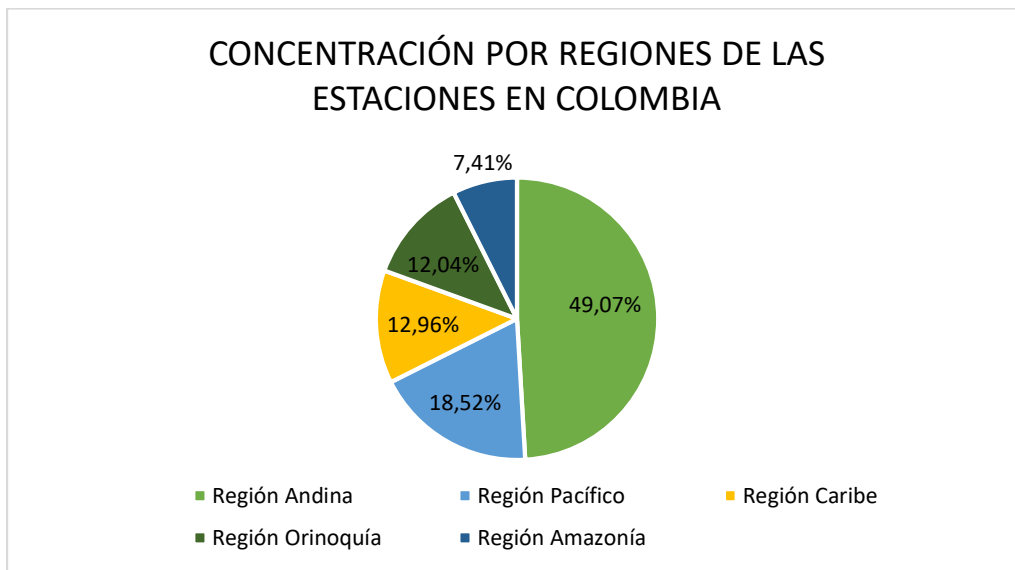
Es importante aclarar que la región Caribe cuenta con un total de 16 estaciones, sin embargo, 2 de éstas no se incluyen para el desarrollo de esta investigación, ya que no fue posible extraer información completa del parámetro C₁ debido a problemas de legibilidad en el documento PDF disponible por el IDEAM, por lo que no se pudo ver claramente los valores correspondientes. De acuerdo con lo anteriormente mencionado, las estaciones no incluidas son:

- Estación APTO MAICAO. IDF_15085010 ubicada en el municipio de Maicao.
- Estación APTO LAS FLORES. IDF_25025090 ubicada en el municipio de El banco.

Teniendo las anteriores tablas como referencia, es posible afirmar que la región Andina abarca un total de 53 estaciones, las cuales representan el 49,07% del total de las estaciones disponibles en el país, seguido por la región Pacífico con un total de 20 estaciones que corresponden al 18,52%, posteriormente se encuentra la región Caribe con un total de 14 estaciones que comprenden el 12,96%, consecutivo, se ubica la región de la Orinoquía con un total de 13 estaciones que corresponden al 12,04%, y finalmente la Amazonía Colombiana con un total de 8 estaciones que representan el 7,41%.

En la siguiente ilustración se muestra la distribución de las estaciones en Colombia, así mismo observa la gran concentración de las estaciones analizadas por regiones, por ejemplo, la región Andina abarca el mayor número de estaciones teniendo así una gran concentración en el territorio nacional, por otro lado, la región Amazonía presenta una menor concentración de estaciones en el territorio nacional.

Ilustración 7. Concentración por regiones de las estaciones en Colombia.



Fuente: Elaboración propia.

9.3 Grafica de las curvas IDF por regiones

Se realizaron las gráficas correspondientes de las curvas IDF, para esto fue necesario determinar la intensidad de cada una de ellas, teniendo en cuenta los valores de los parámetros de estudio, C_1 , X_0 y C_2 , para los periodos de retorno de 2,3,5,10,25,50 y 100 años suministrados por el IDEAM.

La gráfica de estas curvas se realizó con el fin de conocer el comportamiento y variabilidad por regiones de los parámetros anteriormente mencionados; es importante aclarar que todos los datos obtenidos fueron verificados con los establecidos en los documentos PDF disponibles en el IDEAM previamente referenciados.

A continuación, se evidencian las curvas IDF obtenidas para la estación Cañasgordas ubicada en el municipio de Cañasgordas, perteneciente a la región Andina.

Tabla 13. Parámetros C_1 , X_0 , C_2 , estación Cañasgordas.

ESTACIÓN CAÑASGORDAS			
T_R (años)	C_1	X_0	C_2
2	2765,827	28,954	0,957
3	2515,367	25,038	0,918
5	2388,599	21,965	0,887
10	2340,487	19,250	0,859
25	2367,751	16,891	0,834
50	2422,206	15,615	0,821
100	2493,519	14,610	0,810

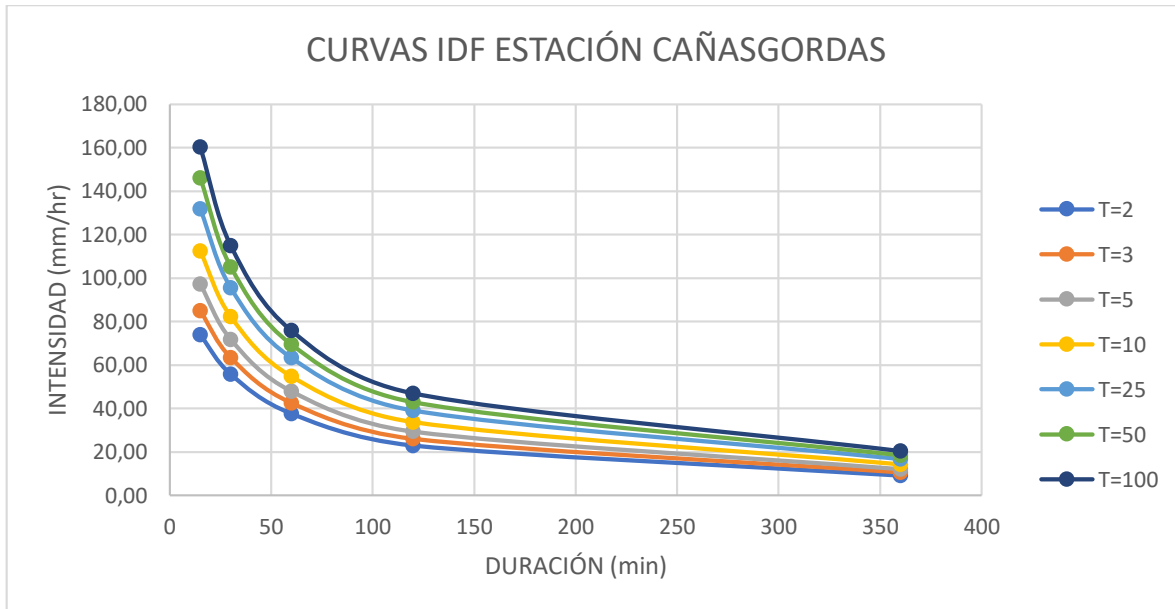
Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Intensidad calculada para cada periodo de retorno, en la estación Cañasgordas.

ESTACIÓN CAÑASGORDAS							
D(min)	$I_{T=2}$	$I_{T=3}$	$I_{T=5}$	$I_{T=10}$	$I_{T=25}$	$I_{T=50}$	$I_{T=100}$
15	74,04	85,02	97,17	112,47	131,91	145,97	160,31
30	55,90	63,49	71,83	82,32	95,64	105,22	115,02
60	37,71	42,58	47,95	54,71	63,32	69,48	75,83
120	23,03	26,08	29,45	33,71	39,14	43,01	47,02
360	9,19	10,64	12,24	14,26	16,82	18,64	20,52

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 8. Gráfica curvas IDF estación Cañasgordas.



Fuente: Elaboración propia

El proceso mencionado anteriormente se llevó a cabo para las 108 estaciones estudiadas en este documento.

9.4 Análisis de dispersión para los parámetros c_1 , x_0 , c_2 .

Debido a escasa información disponible referente a los parámetros (C_1 , X_0 , C_2), y en base a que estos mismos son el punto central de nuestro estudio, se realizó un análisis del comportamiento de cada uno de estos para las cinco (5) regiones de estudio en Colombia: Andina, Caribe, Pacífico, Orinoquía, Amazonia.

En base a esto se determinó en qué municipios de cada región se encuentran los valores más altos de cada parámetro, y posteriormente se definieron los valores más altos en todo el territorio. Para este análisis se utilizaron diagramas de barras verticales y diagramas de dispersión, sin embargo, en este documento se demuestran los resultados obtenidos por medio del diagrama de barras verticales, de igual manera, al finalizar las gráficas se encuentran las tablas resumen con información relacionada con el promedio, varianza y desviación estándar. La varianza hace referencia a la medida de dispersión de una variable, en este caso la variable es cada parámetro y como punto de referencia se determinó el promedio de valores; por otro lado, la desviación estándar indica que tan dispersos están los datos, en relación con la media; a medida que los valores de varianza y desviación estándar aumentan mayor es la dispersión de datos.

9.4.1 Análisis para C_1 :

- **Región Andina:** Esta región comprende un gran número de estaciones y de departamentos a lo largo de todo el territorio colombiano, cada uno con un relieve, clima, hidrología, entre otras características, diferentes, por tal razón se encontró

una alta dispersión de este parámetro. Así mismo, se observan valores máximos de estaciones diferentes para algunos periodos de retorno, sin embargo, predominan como máximos los valores pertenecientes a la estación Landázuri, en el municipio de Landázuri perteneciente al departamento de Santander. Los siguientes datos son los valores correspondientes de C_1 , para cada periodo de retorno de esta estación:

Tabla 15. Valores de C_1 estación Landázuri.

TR (años)	C_1 - ESTACIÓN LANDÁZURI
2	7231,845
3	13706,388
5	29396,854
10	80938,872
25	296337,05
50	328928,195
100	615639,014

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 9 se muestra el análisis realizado.

- Región Caribe:** Esta región posee un menor número de departamentos, por tanto, es un poco sencillo realizar su análisis de dispersión, en este caso se observa que los valores máximos por estaciones no difieren dependiendo del periodo de retorno, es decir, la misma estación presenta valores máximos tanto para 2,3,5,10,25,50, y 100. En este orden de ideas predomina la estación Mocarí, en el municipio de Montería capital del departamento de Córdoba. Los siguientes datos son los valores correspondientes de C_1 , para cada periodo de retorno de esta estación:

Tabla 16. Valores de C_1 estación Mocarí.

TR (años)	C_1 - ESTACIÓN MOCARI
2	21914,522
3	49504,328
5	109949,638
10	263211,725
25	386760,095
50	477248,875
100	671280,06

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 10 se observa el análisis realizado.

- Región Pacífico:** Al igual que la región Caribe, esta región posee un bajo número de departamentos, sin embargo, los valores entre cada estación difieren de manera considerable, por tanto, es fácil determinar a simple vista la estación con valores mayores ya que en cada periodo las barras correspondientes de esta estación predominan. En esta región predomina la estación Universidad del Valle, ubicada

en la ciudad de Cali, capital del departamento del Valle del Cauca, esta estación posee los siguientes datos:

Tabla 17. Valores de C1 estación Universidad del Valle.

TR (años)	C ₁ - ESTACIÓN UNIVERSIDAD DEL VALLE
2	5727,629
3	11094,053
5	22423,996
10	51428,605
25	134754,785
50	232437,504
100	399570,06

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 11 se observa el análisis realizado

- **Regio Orinoquía:** Esta región posee un menor número de estaciones; para los periodos de retorno de 2,3,5 y 10 años, se evidencian valores similares y bajos, en comparación con los registrados para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, donde se ve un aumento considerable en la mayoría de las estaciones, sin embargo, en cada uno de estos periodos los valores máximos se presentan para la estación Salinas de Upin, ubicada en el municipio de Restrepo, el cual hace parte del departamento del Meta, esta estación posee los siguientes datos:

Tabla 18. Valores de C1 estación Salinas de Upin.

TR (años)	C ₁ – ESTACIÓN SALINAS DE UPIN
2	7725,183
3	17036,7
5	46508,738
10	160232,777
25	420937,608
50	595277,742
100	923498,619

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 12 se observa el análisis realizado.

- **Región Amazonía:** A pesar de que esta región comprende gran parte del territorio colombiano, es la que menos estaciones posee, se evidencia que la estación A. Vásquez Cobo para periodos de retorno de 10,25, 50 y 100 años representa los valores mayores de este parámetro. Esta estación se encuentra ubicada en la ciudad de Leticia, capital del departamento del Amazonas, esta estación cuenta con los siguientes datos:

Tabla 19. Valores de C1 estación A. Vásquez Cobo.

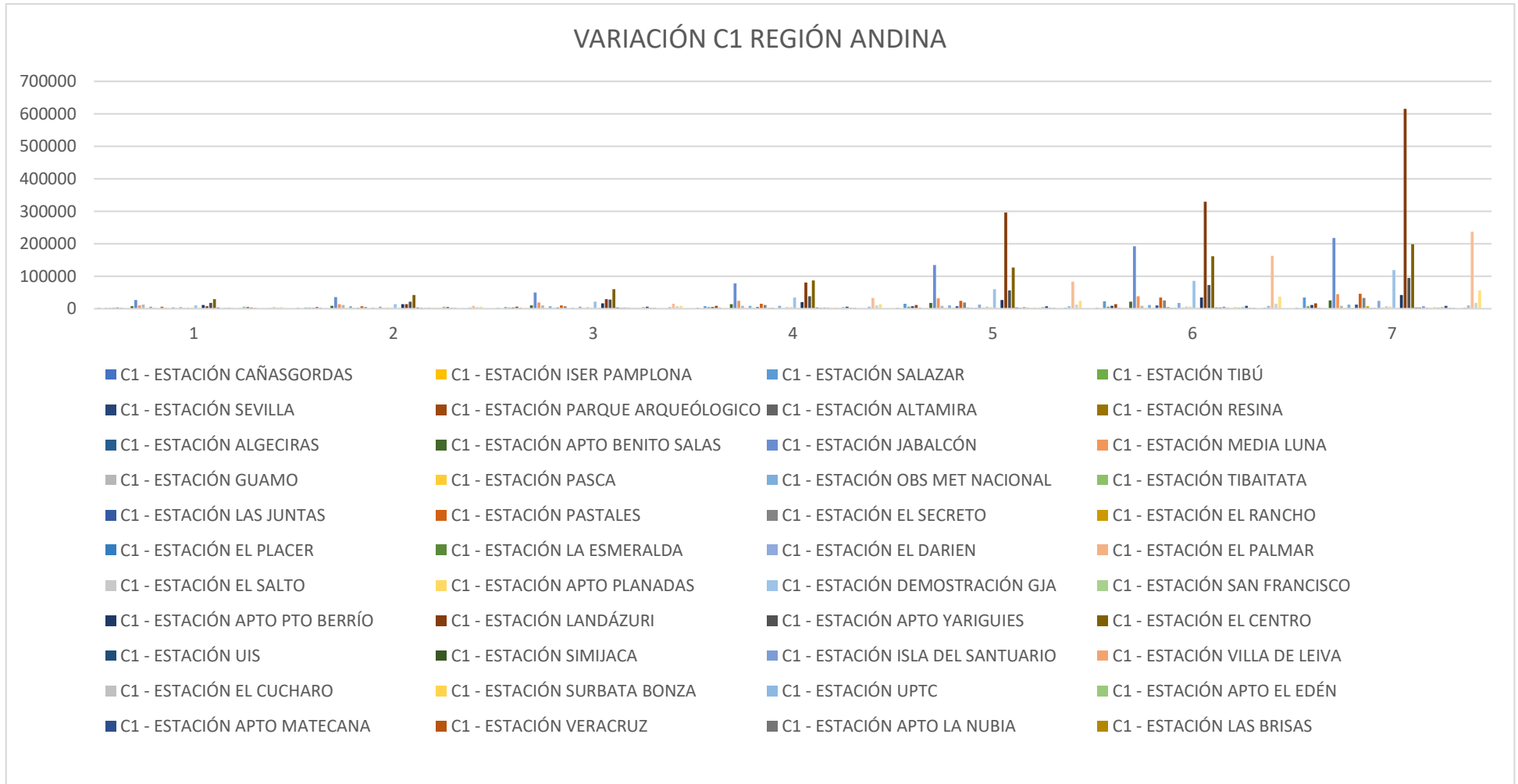
TR (años)	C1 - ESTACIÓN A. VASQUEZ COBO
2	3785,659
3	5284,24
5	7409,65
10	10840,665
25	16514,91
50	21770,296
100	27922,126

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 13 se observa el análisis realizado.

La siguiente ilustración evidencia el análisis realizado para C₁ en la región Andina, es importante mencionar que en la leyenda del gráfico no aparecen todas las estaciones, debido al tamaño.

Ilustración 9. Variación C₁, región Andina.



Fuente: Elaboración propia.

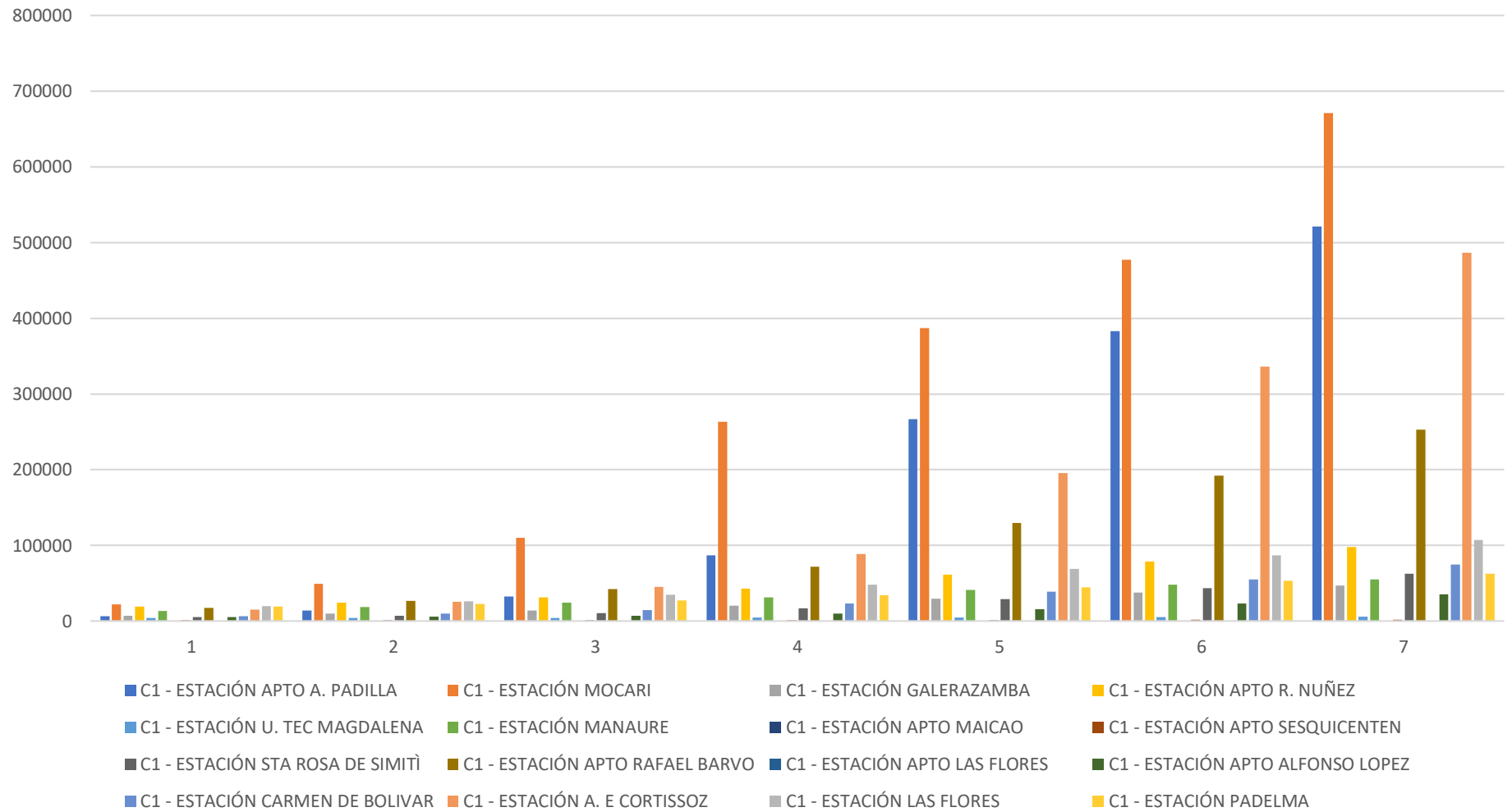
Tabla 20. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C_1 en la región Andina.

Parámetro C_1				
REGIÓN ANDINA	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
	2 años	4684,35613	32565228	5706,59513
	50 años	26569,6809	3,483E+09	59016,8807
	100 años	37481,5404	9,332E+09	96601,0105

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 10. Variación C₁ región Caribe.

VARIACIÓN C₁ REGIÓN CARIBE



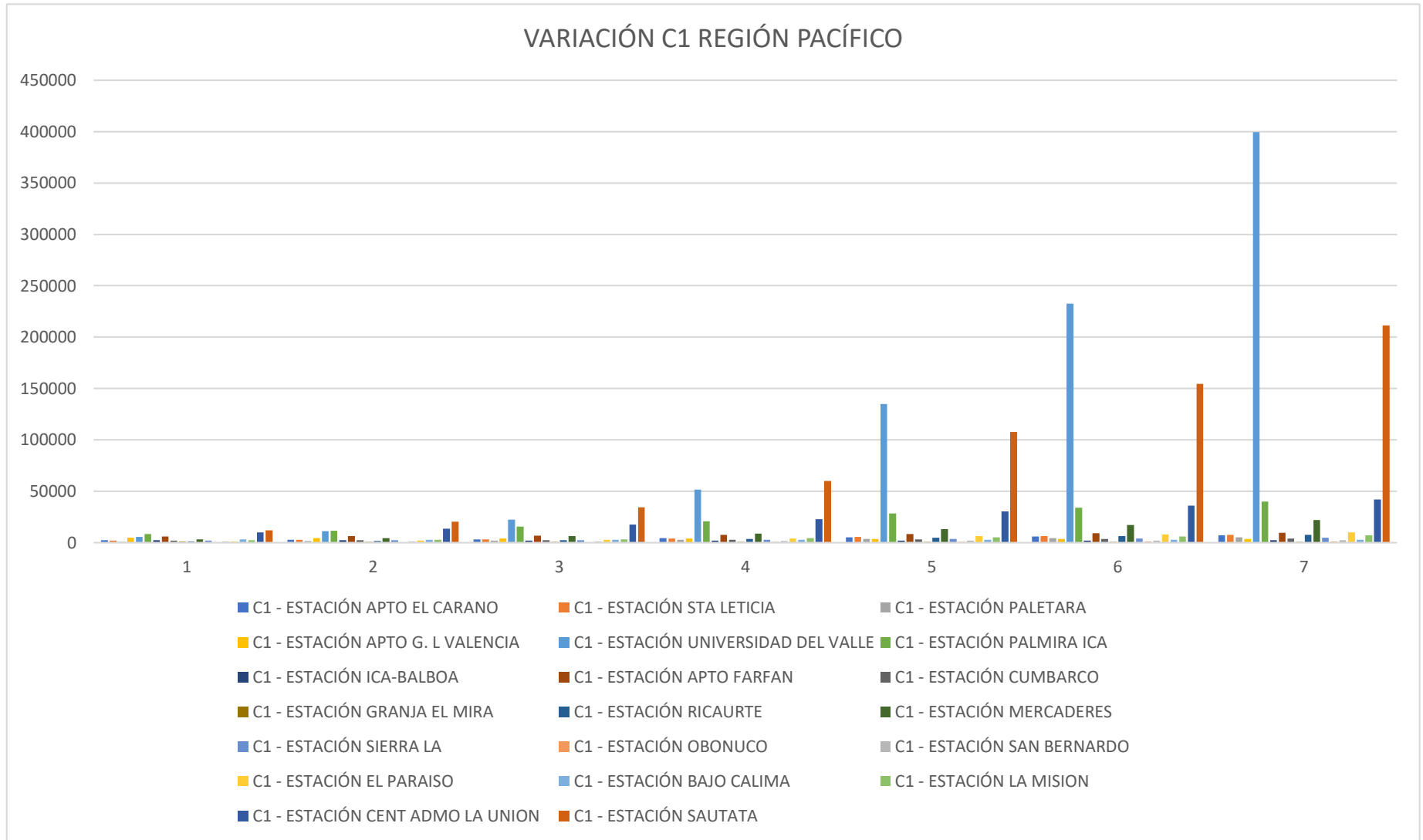
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C_1 en la región Caribe.

Parámetro C_1				
REGIÓN CARIBE	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
	2 años	10183,6031	58911925,6	7675,410452
	50 años	113902,645	2,2846E+10	151149,3314
	100 años	155165,016	4,5266E+10	212757,6233

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 11. Variación C₁ región Pacífico.



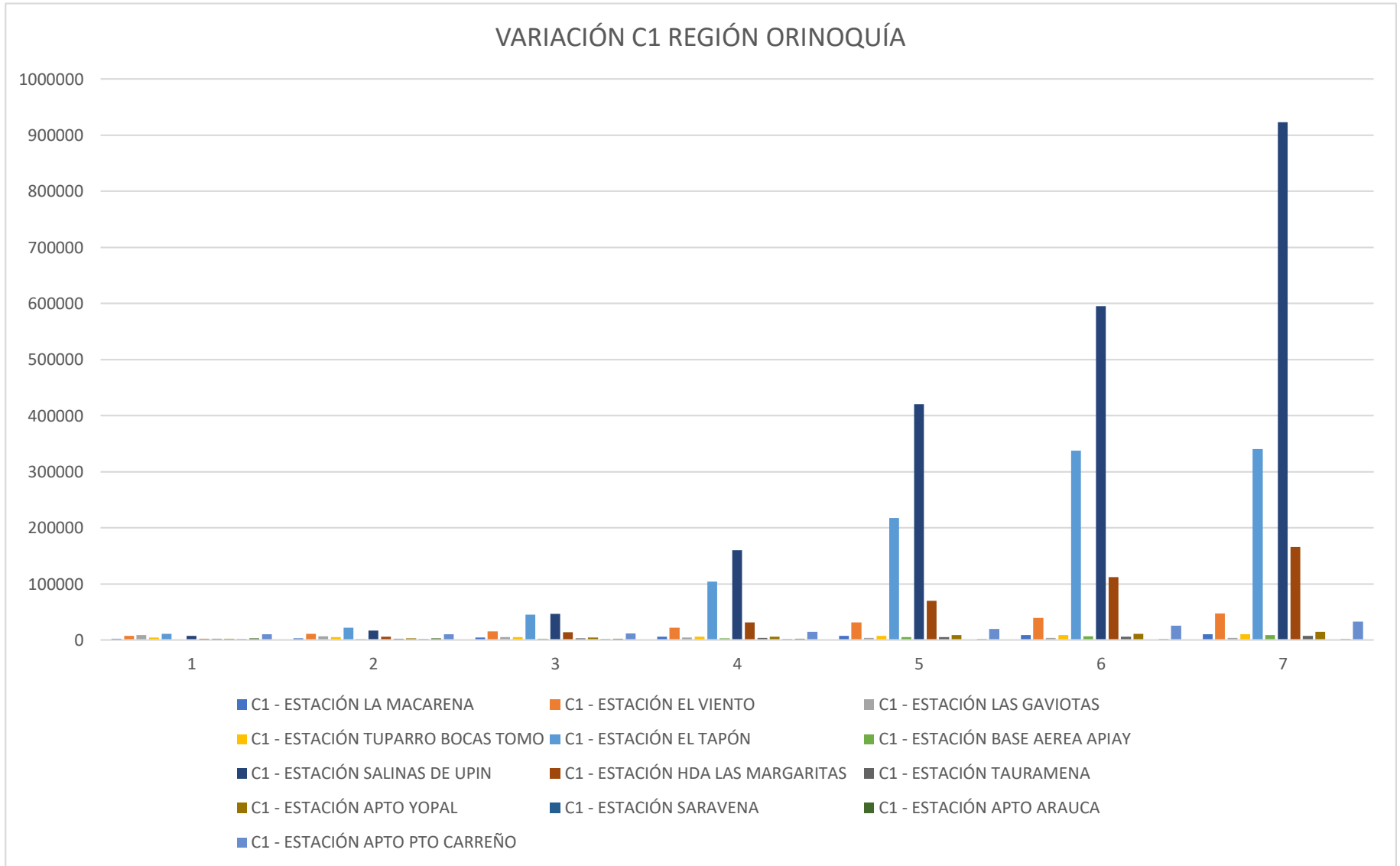
Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C_1 en la región Pacífico.

Parámetro C_1				
REGIÓN PACÍFICO	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
	2 años	3614,02195	10728994,28	3275,51435
	50 años	27016,4464	3497510276	59139,7521
	100 años	39492,1798	9344051934	96664,6364

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 12. Variación C₁ región Orinoquía.



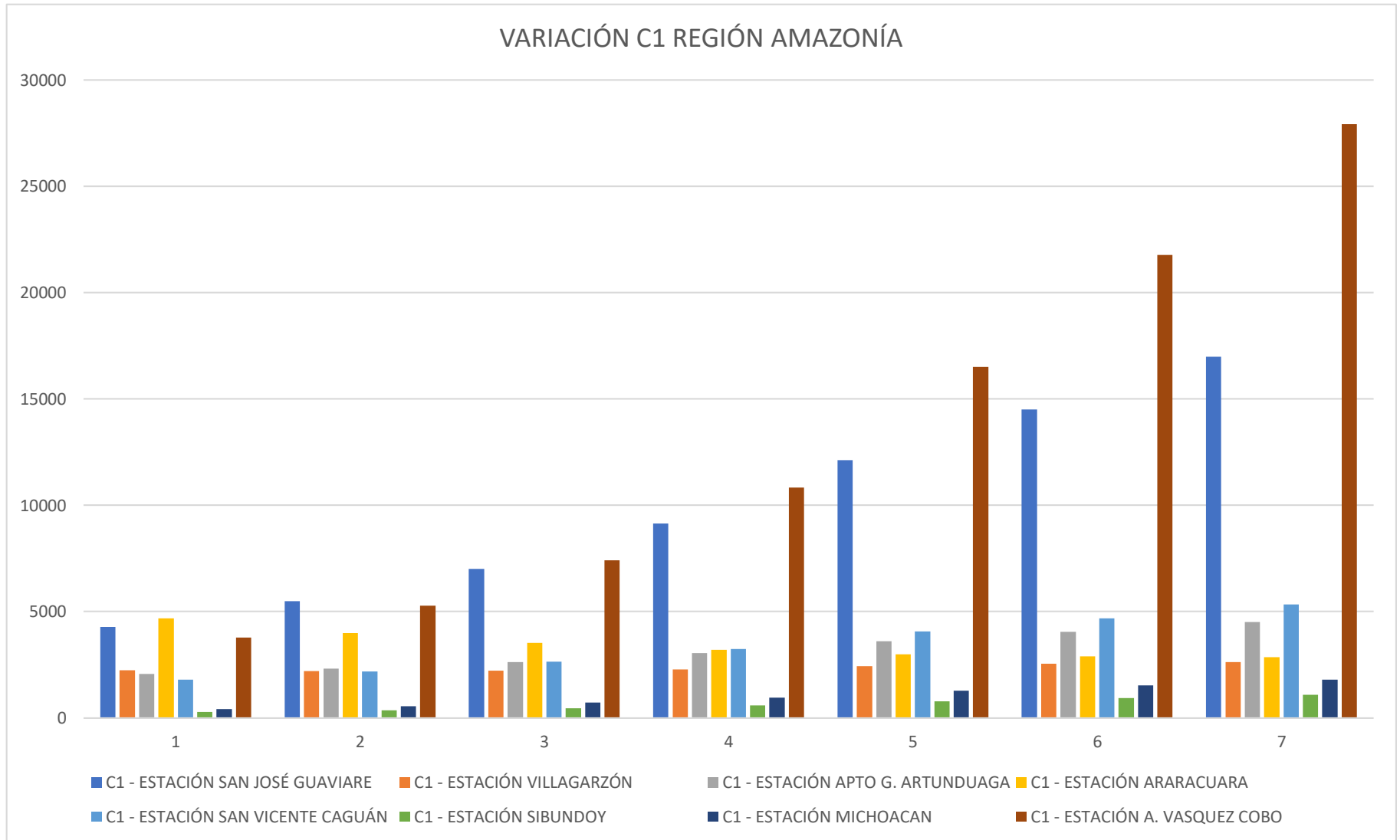
Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C1 en la región Orinoquía.

Parámetro C ₁				
REGIÓN ORINOQUÍA	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
	2 años	5163,08715	12257565	3501,08051
	50 años	89208,1934	3,166E+10	177940,534
	100 años	120749,153	6,757E+10	259949,384

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 13. Variación C₁ región Amazonía.



Fuente: Elaboración propia

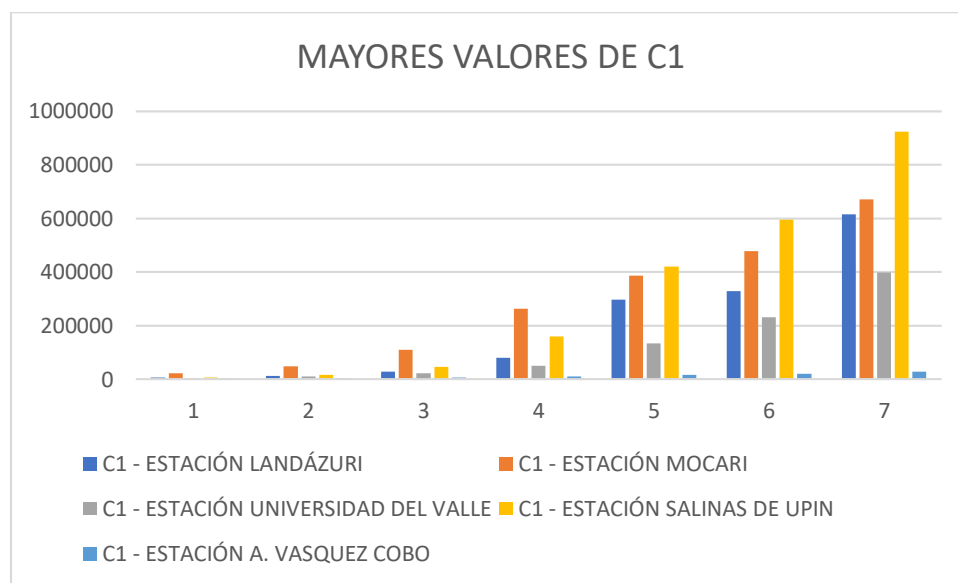
Tabla 24. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C_1 en la región Amazonía.

Parámetro C_1				
	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
REGIÓN AMAZONIA	2 años	2441,35225	2797556,19	1672,58967
	50 años	6616,25775	55811651,3	7470,7196
	100 años	7889,41663	91238371	9551,87788

Fuente: Elaboración propia.

Luego de analizar los valores del parámetro C_1 para cada región de Colombia, se determinó la estación con el valor más alto de C_1 , para esto se realizó un análisis teniendo en cuenta todos los datos de cada una de las estaciones mencionadas anteriormente (Estación Landázuri, Mocarí, Universidad del Valle, Salinas de Upin y A. Vásquez Cobo) y en base a esta información se realizó el siguiente diagrama de barras verticales, que muestra la variación del valor de este parámetro para las 5 estaciones y para los 7 periodos de retorno estudiados (2,3,5,10,25,50 y 100 años).

Ilustración 14. Mayores valores de C_1 en todo el territorio.



Fuente: Elaboración propia.

Según el gráfico anterior es posible afirmar, que los mayores valores se encuentran para la estación Salinas de Upin, en la región de la Orinoquía.

9.4.2 Análisis para X_0 :

- **Región Andina:** En comparación con el parámetro analizado anteriormente, para X_0 , no se observa gran dispersión, ni valores extremadamente distantes, sin embargo, en cada periodo de retorno se destaca la misma estación. Esta es la estación Jabalcón, la cual se encuentra en el municipio de Saldaña, ubicado en el departamento del Tolima. Los valores determinados son:

Tabla 25. Variación de X_0 estación Jabalcón.

TR (años)	X_0 - ESTACIÓN JABALCÓN
2	76,345
3	84,924
5	94,716
10	107,066
25	122,395
50	132,431

100	137,220
-----	---------

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 15 se observa el análisis realizado.

- Región Caribe:** La región caribe demuestra valores más cercanos, esto se debe a que este parámetro indica la cantidad de lluvia en mm en cada estación, por tanto, las lluvias en la región deben ser similares. Sin embargo, al momento de analizar los mayores valores, se tienen dos estaciones diferentes para diversos periodos de retorno. En los periodos de retorno de 2,3,5, y 10 años, la estación Mocarí posee los mayores valores, para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, la estación predominante es la estación Apto A. Padilla, sin embargo, para efectos de este documento, se determinó que la estación predominante es la estación Apto A. Padilla, debido a que en los últimos años se representan los valores más altos. Esta estación se encuentra ubicada en la ciudad de Riohacha, capital del departamento de La Guajira. Los valores determinados son:

Tabla 26. Variación X_0 estación Apto A. Padilla.

TR (años)	X_0 - ESTACIÓN APTO A. PADILLA
2	38,154
3	52,073
5	67,938
10	87,444
25	110,524
50	119,155
100	126,511

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 16 se observa el análisis realizado.

- Región Pacífico:** La región pacífica, al igual que la región Caribe, posee valores más cercanos, no se evidencian extremos muy lejanos, sin embargo, es posible determinar en cada periodo de retorno un valor máximo correspondiente a la misma estación, la estación Universidad del Valle, ubicada en la ciudad de Cali, los datos de esta estación son:

Tabla 27. Variación X_0 estación Universidad del Valle.

TR (años)	X_0 - ESTACIÓN UNIVERSIDAD DEL VALLE
2	45,495
3	57,901
5	71,651
10	88,452
25	108,571
50	120,481

100	132,323
-----	---------

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 17 se observa el análisis realizado.

- **Región Orinoquía:** Para X_0 la región de la Orinoquía presenta un comportamiento similar a la región pacífico, esta región posee valores más cercanos, no se evidencian extremos muy lejanos, es posible determinar en cada periodo de retorno un valor máximo, correspondiente a la misma estación, la estación Salinas de Upin ubicada en el municipio de Restrepo, los datos de esta estación son:

Tabla 28. Variación X_0 estación Salinas de Upin.

TR (años)	X_0 - ESTACIÓN SALINAS DE UPIN
2	58,278
3	80,604
5	110,574
10	150,773
25	188,889
50	207,215
100	227,799

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 18 se observa el análisis realizado.

- **Región Amazonía:** Para X_0 , en esta región se evidencian dos escenarios, la mayoría de las estaciones poseen valores altos, sin embargo, hay dos que se destacan por tener valores muy bajos en comparación con los demás, estas son: estación Sibundoy y estación Michoacán. Durante los periodos de retorno de 2 y 3 años la estación predominante es la estación Araracuara, sin embargo, a partir del periodo de retorno para 5 años, la estación que predomina es la estación A. Vásquez Cobo, la cual se encuentra en la ciudad de Leticia. A continuación, se demuestran los valores encontrados:

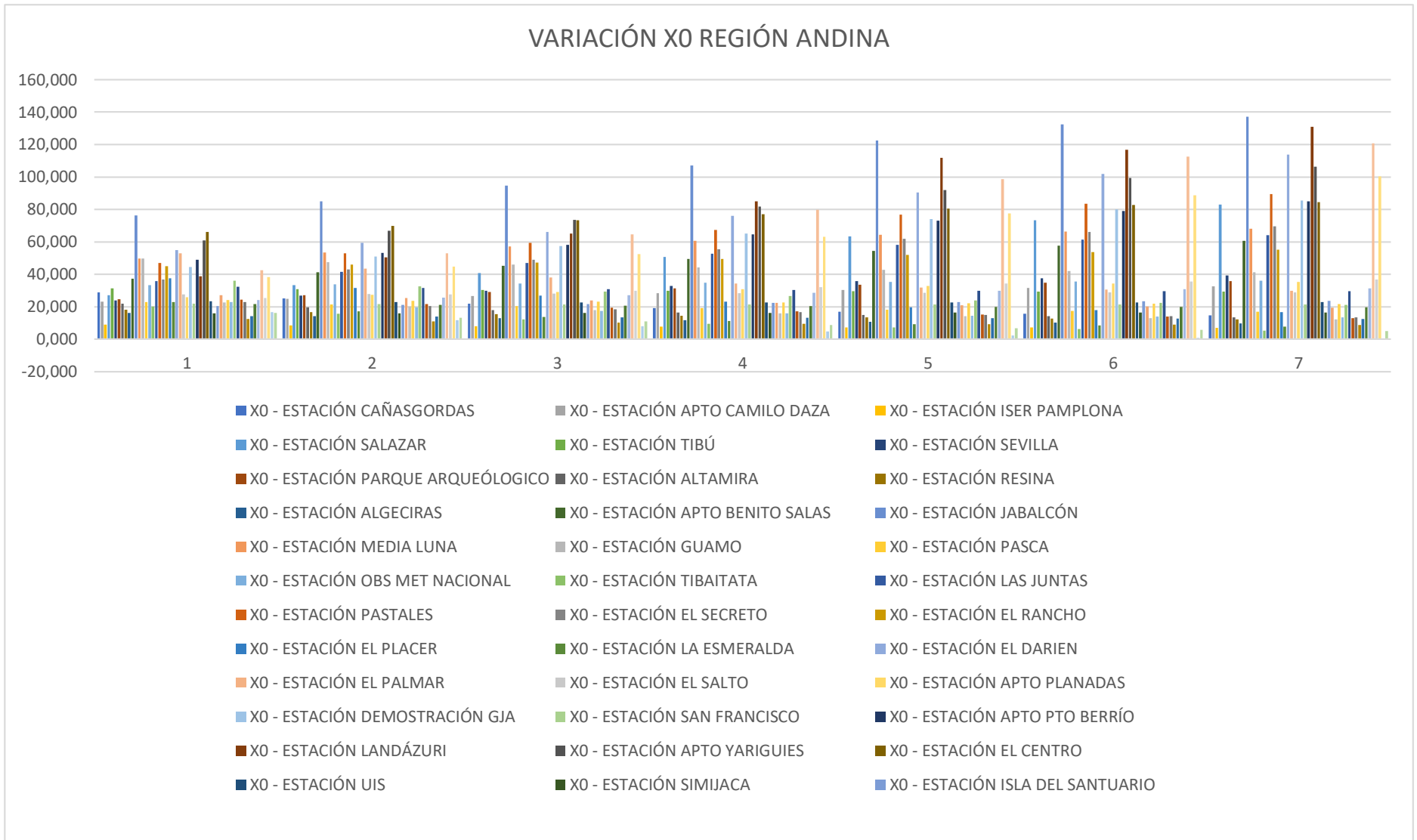
Tabla 29. Variación X_0 estación A. Vásquez Cobo.

TR (años)	X_0 - ESTACIÓN A. VASQUEZ COBO
2	28,277
3	33,636
5	39,243
10	45,740
25	53,124
50	58,064
100	62,568

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 19 se observa el análisis realizado.

Ilustración 15. Variación X₀ región Andina.



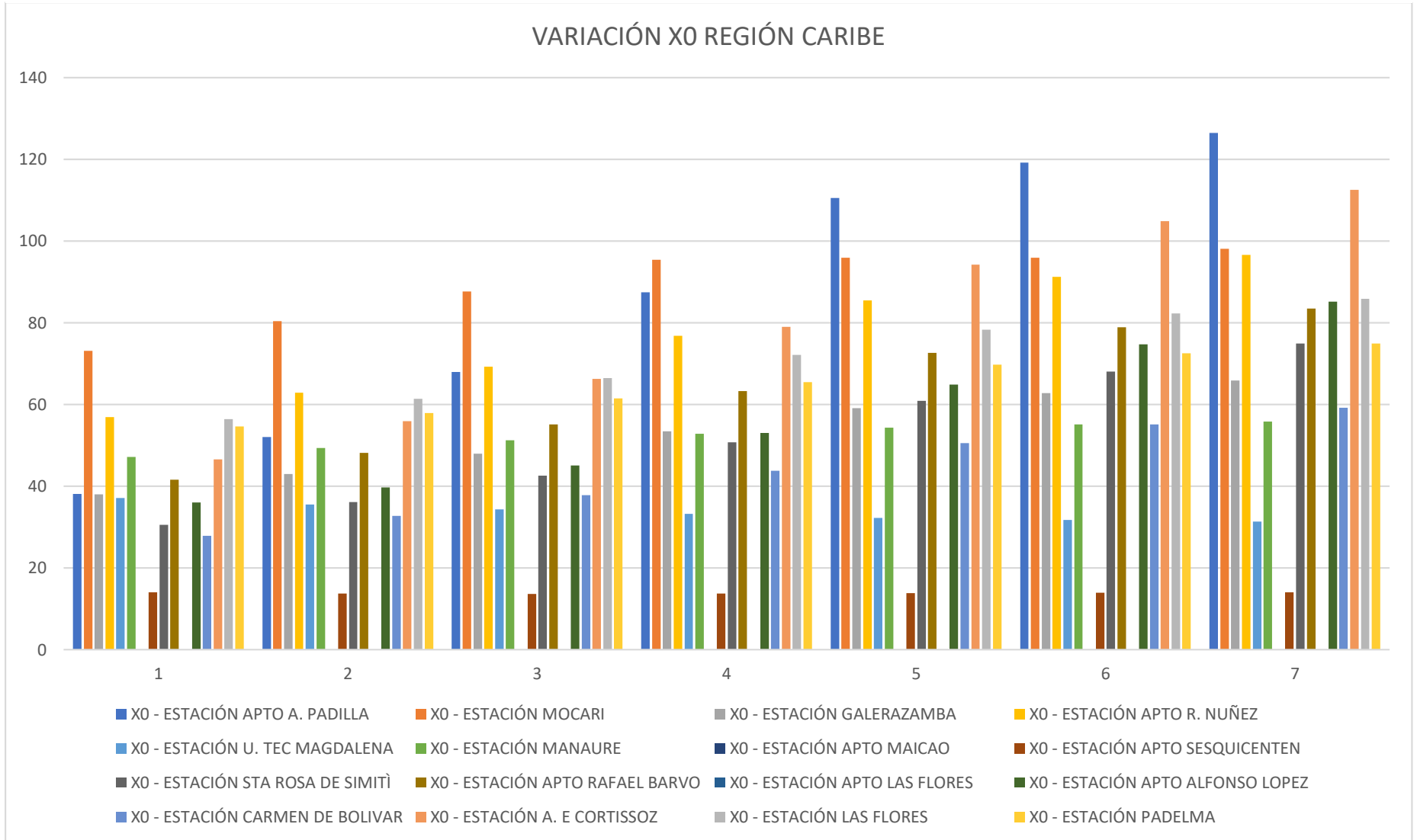
Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro X_0 en la región Andina.

Parámetro X_0				
REGIÓN ANDINA	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
	2 años	31,4450566	206,24294	14,361161
	50 años	39,971	1106,9911	33,2714763
	100 años	41,7023962	1334,3206	36,5283532

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 16. Variación X₀ región Caribe.



Fuente: Elaboración propia

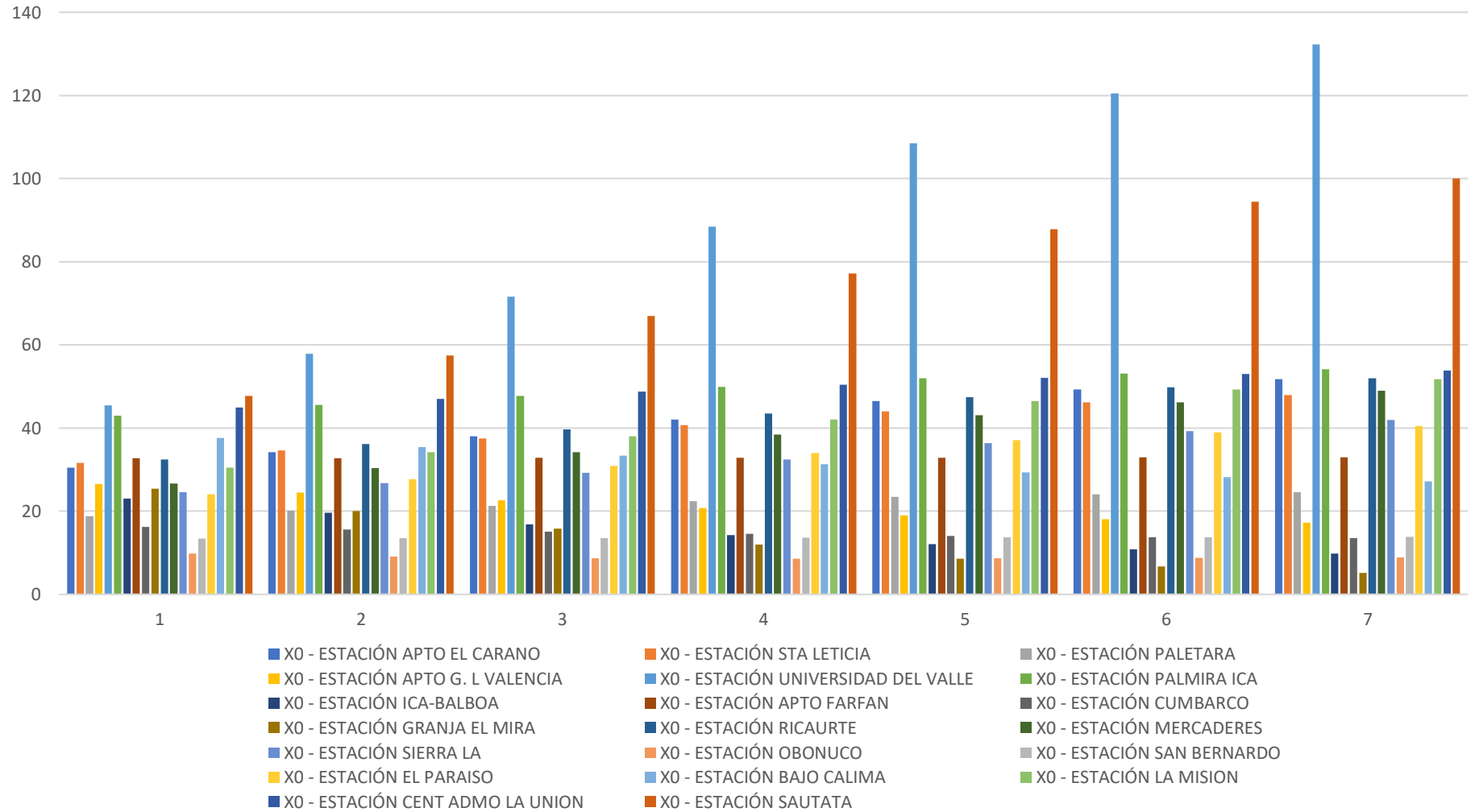
Tabla 31. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro X_0 en la región Caribe.

Parámetro X_0				
REGIÓN CARIBE	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
	2 años	37,3745	399,624689	19,99061502
	50 años	62,895875	1274,18139	35,69567741
	100 años	66,5299375	1452,31088	38,10919684

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 17. Variación X₀ región Pacífico.

VARIACIÓN X₀ REGIÓN PACÍFICO



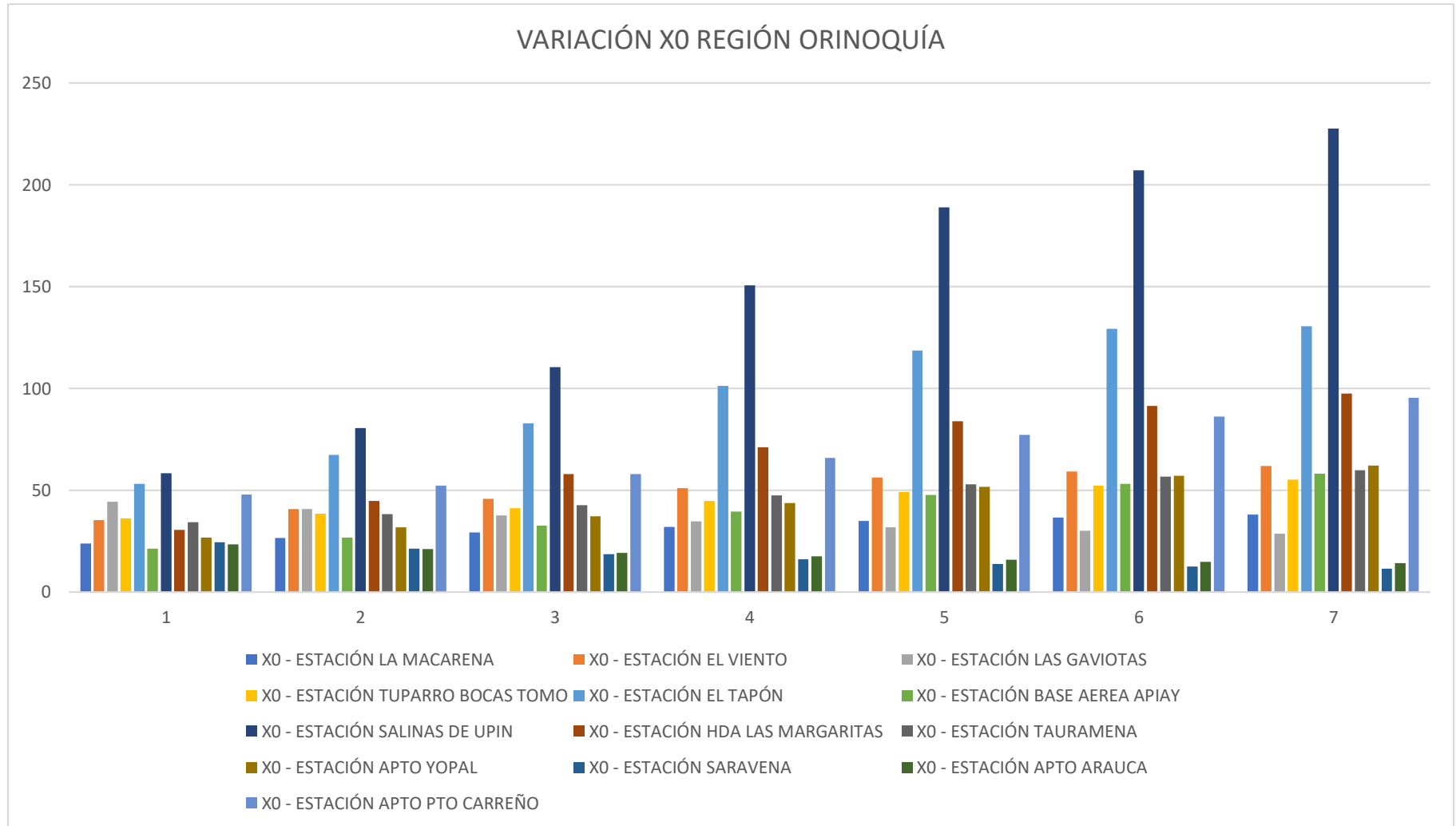
Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro X_0 en la región Pacífico.

Parámetro X_0				
REGIÓN PACÍFICO	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
	2 años	29,25175	113,9879628	10,6765145
	50 años	39,8515	808,8923409	28,4410327
	100 años	41,4151	973,4891728	31,200788

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 18. Variación X₀ región Orinoquía.



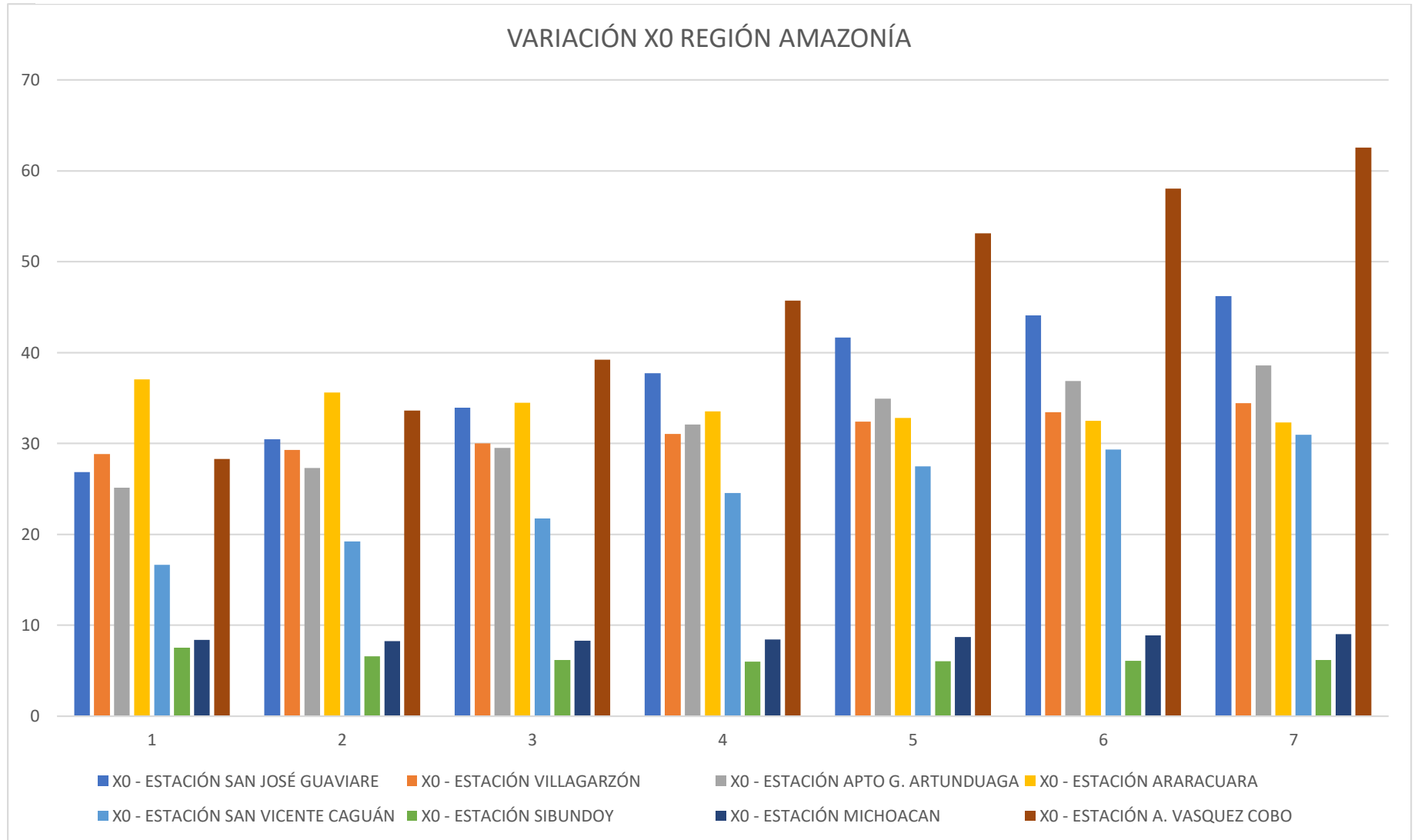
Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro X_0 en la región Orinoquía.

Parámetro X_0				
REGIÓN ORINOQUÍA	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
	2 años	35,3692308	147,56209	12,1475137
	50 años	68,2012308	2760,1213	52,5368568
	100 años	72,3916923	3314,078	57,5680297

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 19. Variación X_0 región Amazonía.



Fuente: Elaboración propia

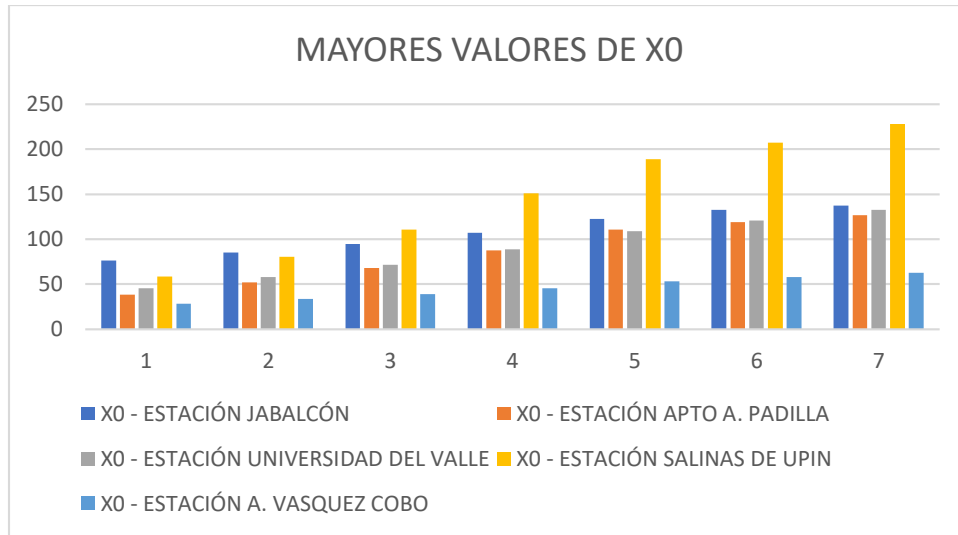
Tabla 34. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro X_0 en la región Amazonía.

Parámetro X_0				
	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
REGIÓN AMAZONIA	2 años	22,3355	109,643458	10,4710772
	50 años	31,15875	294,382278	17,157572
	100 años	32,536375	340,072708	18,4410604

Fuente: Elaboración propia.

Luego de determinar los valores de X_0 para cada región de estudio, se determinó la estación que presenta el valor más alto de este parámetro, para esto se realizó un análisis teniendo en cuenta todos los datos de cada una de las estaciones mencionadas anteriormente (Estación Jabalcón, Apto. A. Padilla, Universidad del Valle, Salinas de Upin, A. Vásquez Cobo) y en base a esta información se realizó el siguiente diagrama de barras verticales, donde se puede observar la variación del valor de este parámetro para las 5 estaciones y para los 7 periodos de retorno estudiados (2,3,5,10,25,50 y 100 años).

Ilustración 20. Mayores valores de X_0 en todo el territorio.



Fuente: Elaboración propia.

Con la gráfica anterior es posible determinar que la estación Jabalcón presenta valores máximos para periodos de retorno de 2 y 3 años, a partir del año 5 la estación predominante es Salinas de Upin, ubicada en el municipio de Restrepo, en el departamento del Meta.

9.4.3 Análisis para C_2 :

- Región Andina:** En esta región los parámetros presentan una mayor similitud, se encuentran valores cercanos en un gran número de estaciones, sin embargo, es posible determinar dos grupos sobresalientes, para periodos de retorno de 2, 3, 5 y 10 años sobresale la estación el centro ubicado en la ciudad de Barrancabermeja perteneciente al departamento de Santander, para los periodos de retorno restantes 25, 50 y 100 años sobresale la estación Landázuri. Para efectos de este documento se determinó que la estación predominante es Landázuri, ya que esta posee los mayores valores registrados.

Tabla 35. Variación de C_2 estación Landázuri.

TR (años)	C_2 - ESTACIÓN LANDÁZURI
2	1,056
3	1,144
5	1,251
10	1,392

25	1,573
50	1,569
100	1,650

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 21 se observa el análisis realizado.

- **Región Caribe:** En la región caribe se evidencian valores cercanos entre sí, sin embargo, es posible determinar una misma estación con valores máximos para cada periodo de retorno, esta estación es la estación Mocarí, ubicada en el municipio de Montería capital del departamento de Córdoba. Los siguientes datos son los valores correspondientes de C_2 , para cada periodo de retorno de esta estación:

Tabla 36. Variación de C_2 estación Mocarí.

TR (años)	C_2 - ESTACIÓN MOCARI
2	1,293
3	1,413
5	1,530
10	1,657
25	1,699
50	1,720
100	1,764

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 22 se observa el análisis realizado.

- **Región Pacífico:** Esta región presenta valores similares entre sí, así mismo no se evidencian valores extremos, sin embargo, es posible determinar tres estaciones con valores máximos para diversos periodos de retorno. Para el periodo de retorno de 2 años se destaca la estación Cent. Admo La Unión, para periodos de retorno de 3 y 5 años se destaca la estación Sautata, y finalmente para periodos de retorno de 10,25,50 y 100 años se destaca la estación Universidad del Valle, la cual posee los mayores valores registrados durante todos los periodos de estudio, por tal razón esta se determinó como la sobresaliente para esta región. Esta estación está ubicada en la ciudad de Cali, y posee los siguientes valores:

Tabla 37. Variación C_2 estación Universidad del Valle.

TR (años)	C_2 - ESTACIÓN UNIVERSIDAD DEL VALLE
2	1,061
3	1,148
5	1,242
10	1,351
25	1,477
50	1,544

100	1,612
-----	-------

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 23 se observa el análisis realizado.

- **Región Orinoquía:** En esta región se encuentran valores similares, no se observan extremos, sin embargo, existen tres estaciones predominantes para diversos grupos de periodos de retorno, para el primer periodo de retorno de 2 años, se evidencia que la estación predominante, es la estación El viento, ubicada en el municipio de Mapiripán, para los periodos de retorno de 3 y 5 años la estación que mayores valores posee es la estación el Tapón, la cual se encuentra ubicada en el municipio de Cumaribo, para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, sobresale la estación Salinas de Upin, ubicada en el municipio Restrepo, esta última fue determinada como la estación de mayores valores, con los siguientes datos:

Tabla 38. Variación C₂ estación Salinas de Upin.

TR (años)	C ₂ - ESTACIÓN SALINAS DE UPIN
2	0,997
3	1,099
5	1,230
10	1,390
25	1,499
50	1,526
100	1,570

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 24 se observa el análisis realizado

- **Región Amazonía:** Los valores son muy similares entre sí, sin embargo, hay dos estaciones que sobresalen con valores muy cercanos entre sí, para periodos de retornos de 2,3 y 5 años sobresale la estación San José del Guaviare, mientras que, para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, sobresale la estación A. Vásquez Cobo, la cual se encuentra ubicada en la ciudad de Leticia, para esta estación se encuentran los siguientes valores:

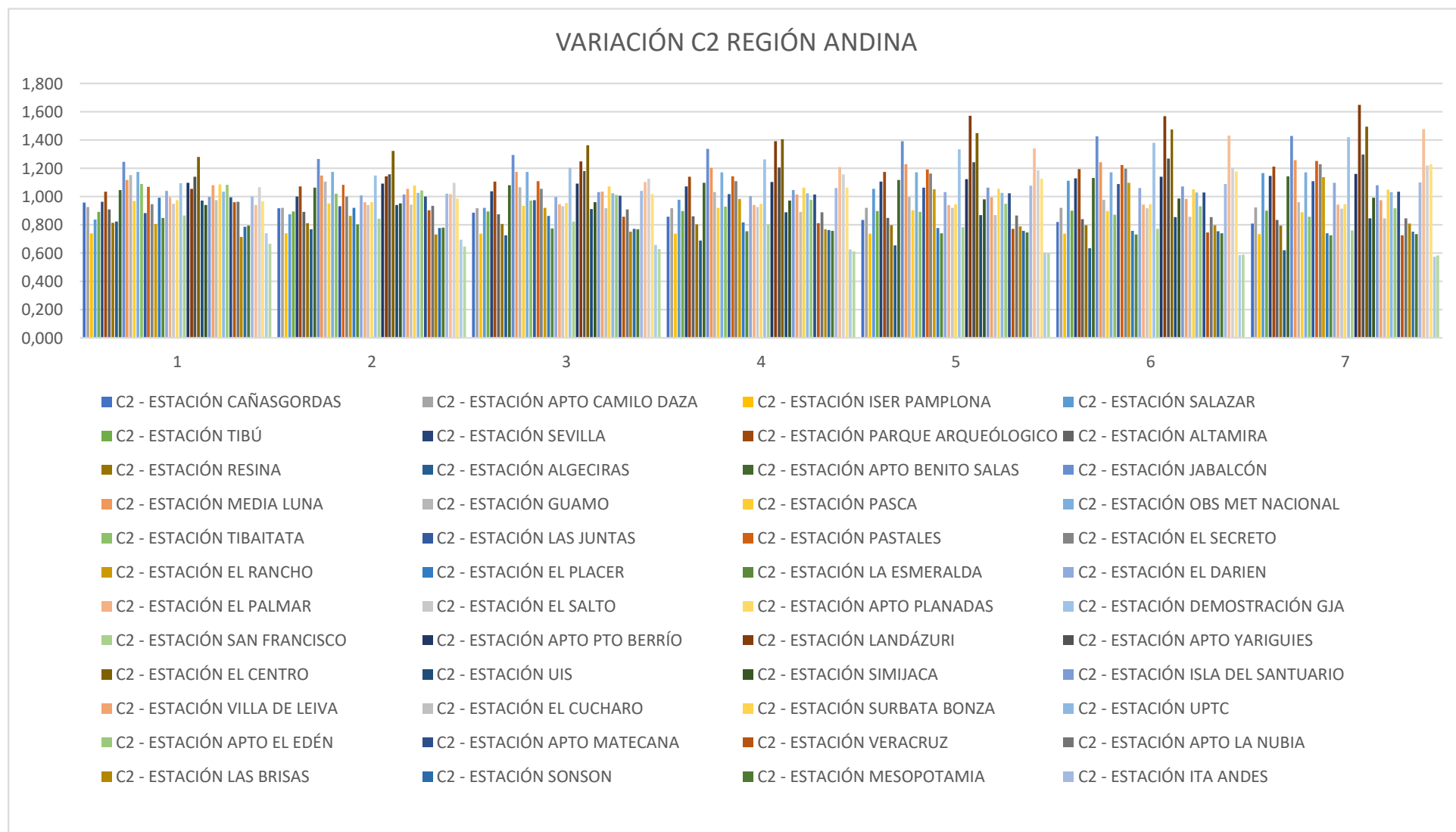
Tabla 39. Variación C₂ estación A. Vásquez Cobo.

TR (años)	C ₂ - ESTACIÓN A. VASQUEZ COBO
2	0,930
3	0,972
5	1,014
10	1,061
25	1,111
50	1,143
100	1,171

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 25 se observa el análisis realizado.

Ilustración 21. Variación C₂ región Andina.



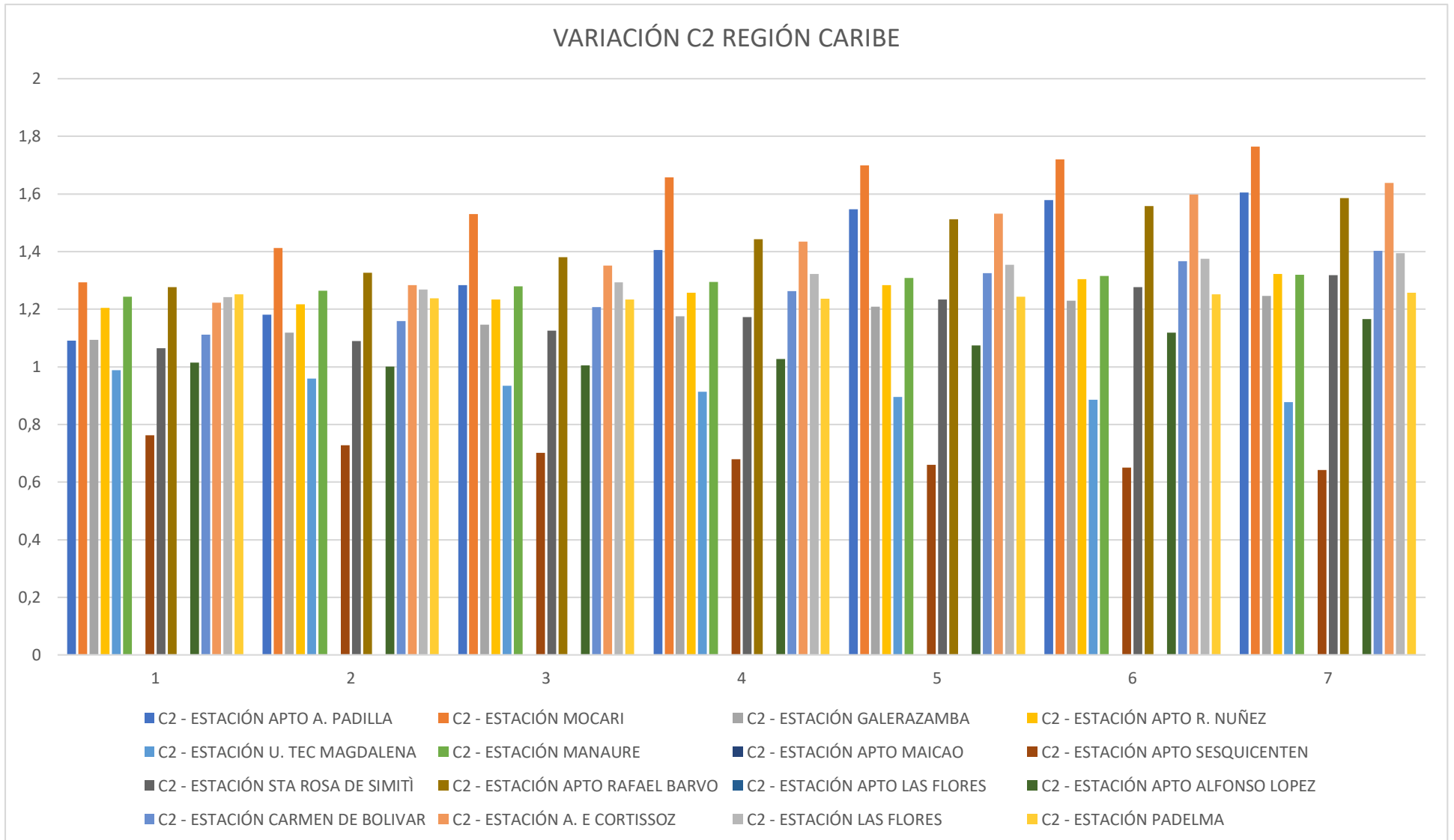
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C_2 en la región Andina.

Parámetro C_2				
	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
REGIÓN ANDINA	2 años	0,972	0,0172444	0,13131788
	50 años	1,00307547	0,0521218	0,228302
	100 años	1,01086792	0,0598638	0,24467074

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 22. Variación C₂ región Caribe.



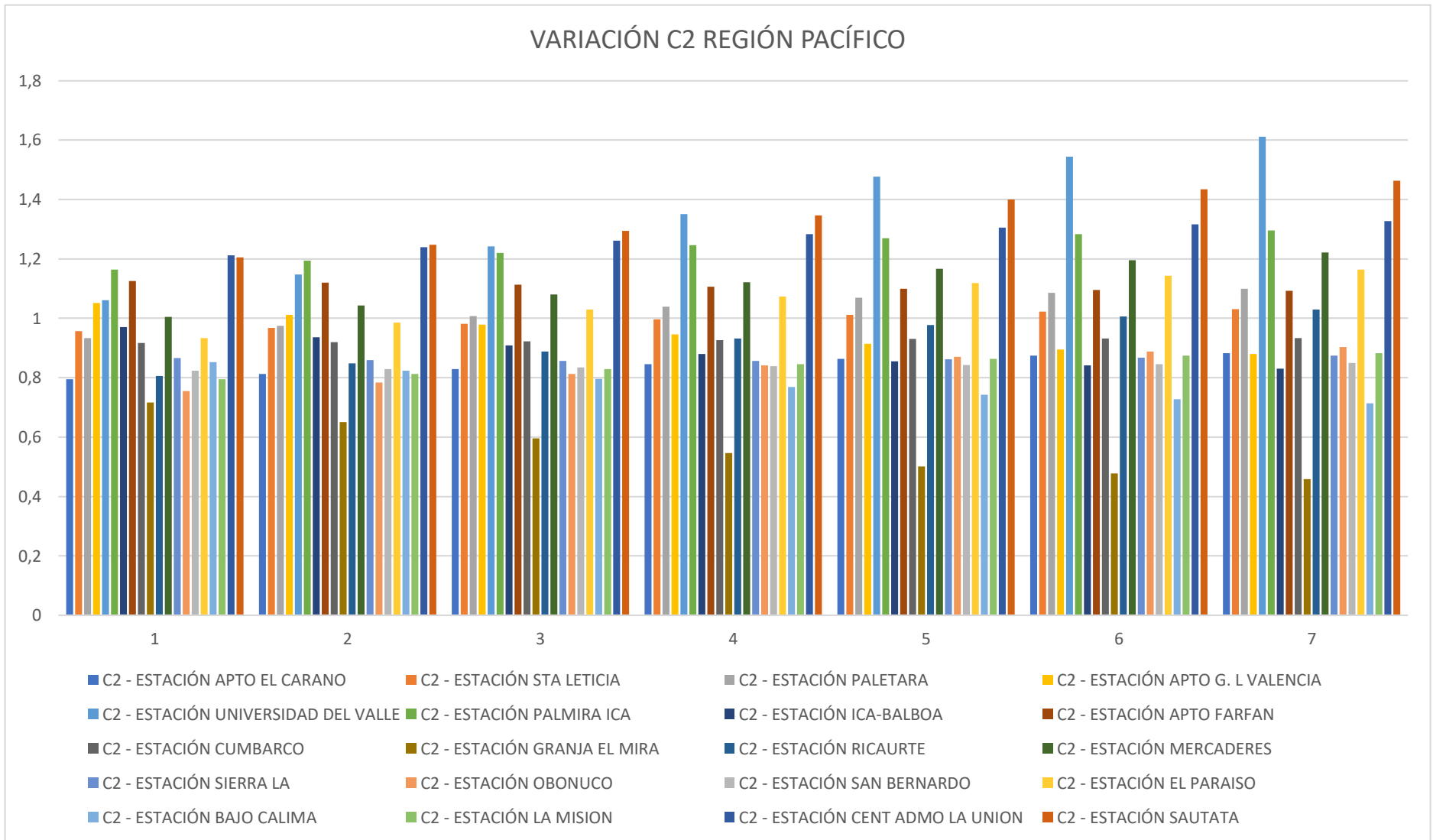
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C_2 en la región Caribe.

Parámetro C_2				
	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
REGIÓN CARIBE	2 años	0,9910625	0,1681982	0,410119734
	50 años	1,1390625	0,26799006	0,517677566
	100 años	1,1586875	0,28128503	0,530363111

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 23. Variación C₂ región Pacífico



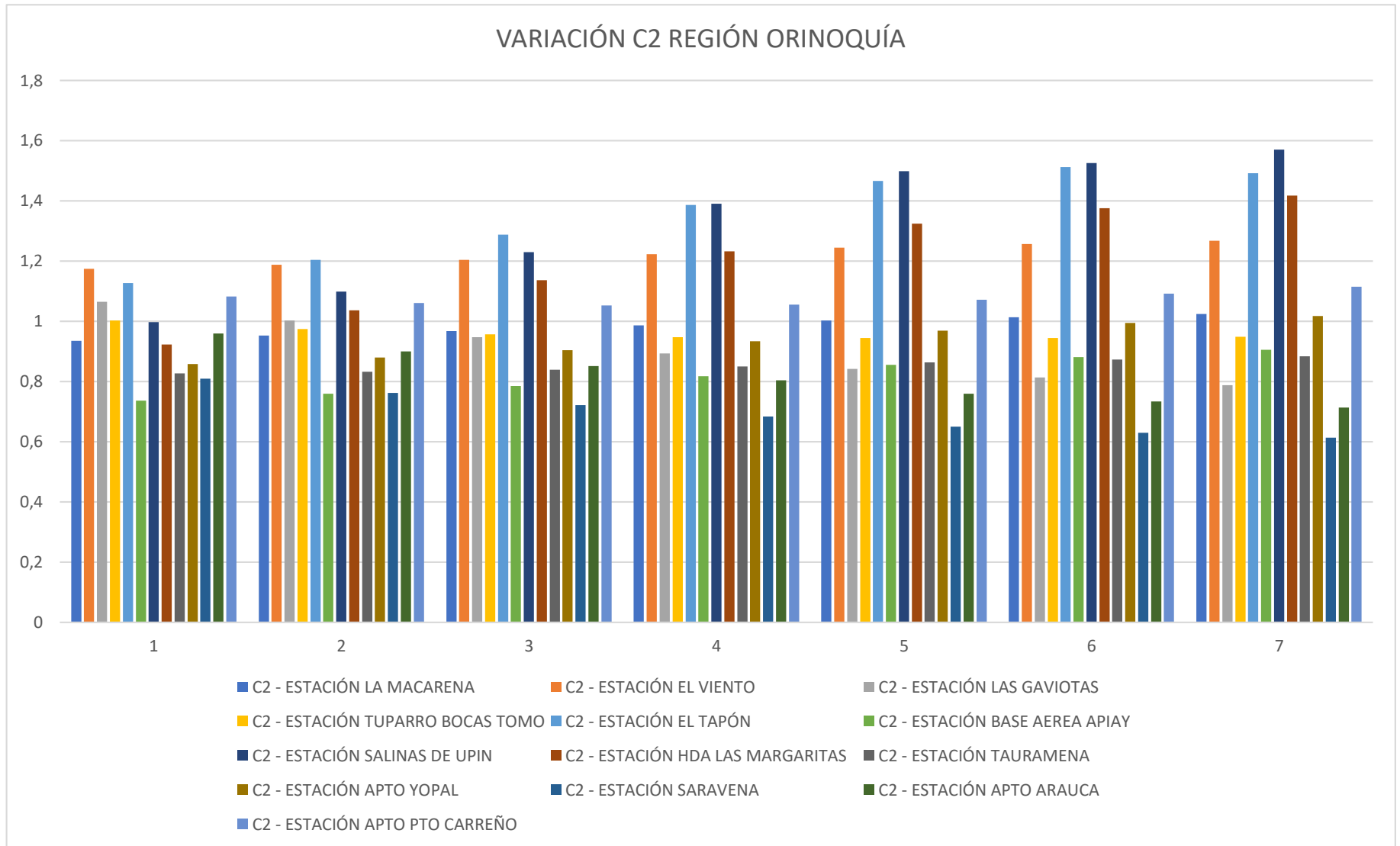
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C_2 en la región Pacífico.

Parámetro C_2				
REGIÓN PACÍFICO	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
	2 años	0,9472	0,022729011	0,15076144
	50 años	1,0175	0,063670158	0,25232946
	100 años	1,02735	0,071816976	0,2679869

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 24. Variación C2 región Orinoquía.



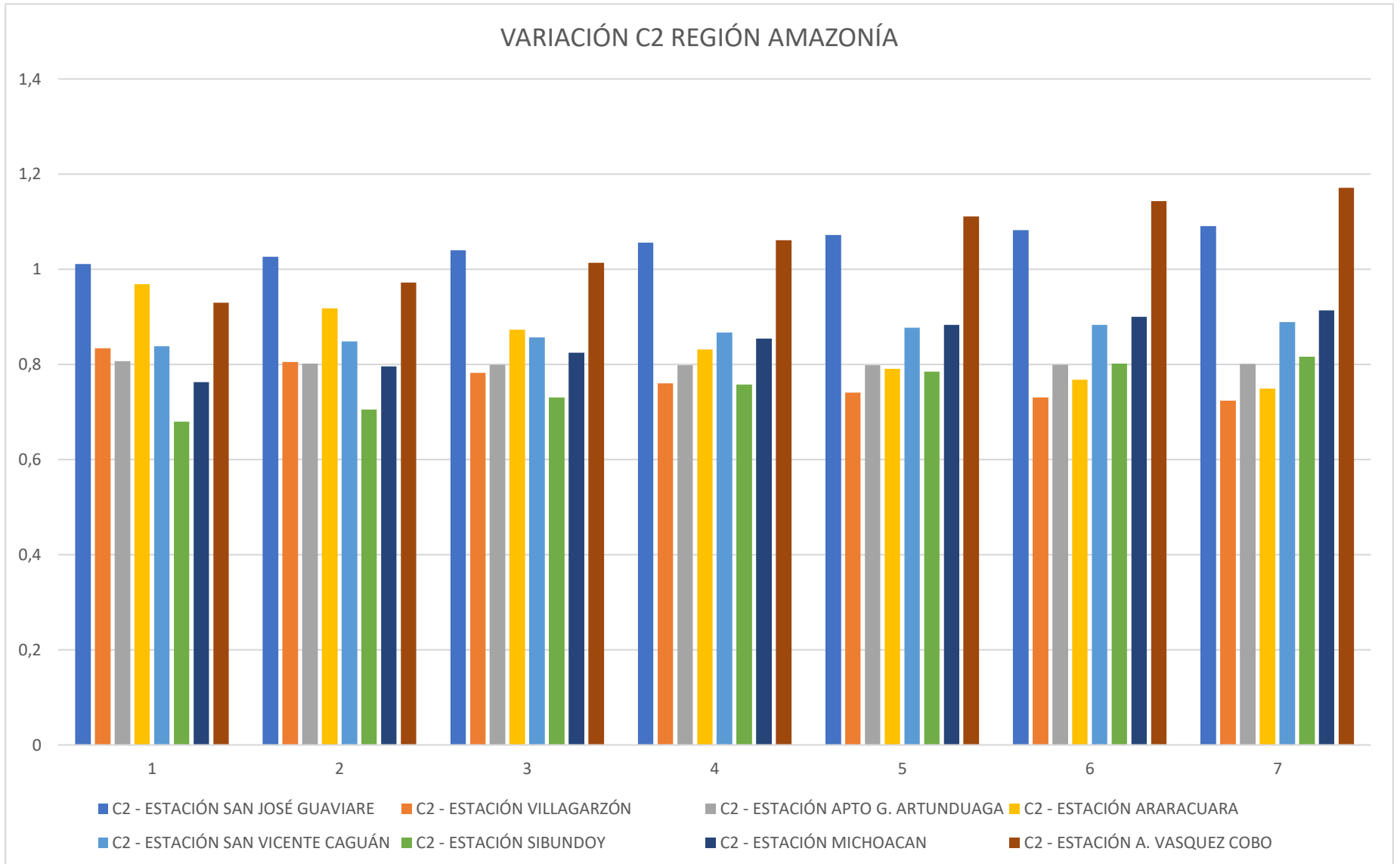
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C_2 en la región Orinoquía.

Parámetro C_2				
REGIÓN ORINOQUÍA	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
	2 años	0,96123077	0,0171175	0,13083396
	50 años	1,04976923	0,0832234	0,28848459
	100 años	1,05815385	0,0903993	0,30066478

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 25. Variación C2 región Amazonía.



Fuente: Elaboración propia.

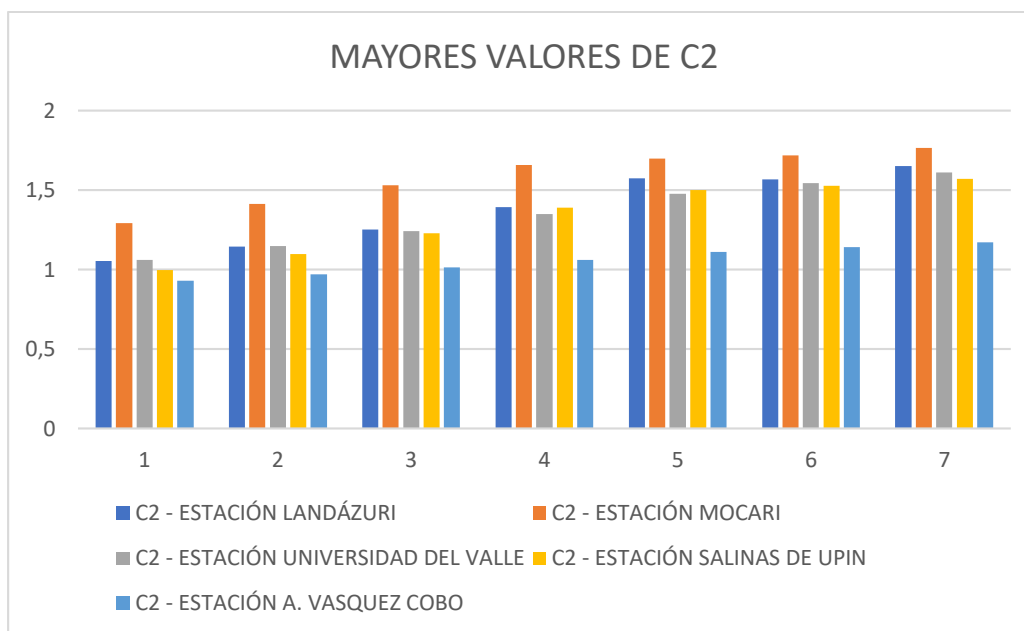
Tabla 44. Promedio, Varianza y desviación estándar para el parámetro C_2 en la región Amazonía.

Parámetro C_2				
REGIÓN AMAZONIA	TR	PROMEDIO	VARIANZA	DESVIACIÓN
	2 años	0,854	0,01215314	0,11024129
	50 años	0,8885	0,02245629	0,14985421
	100 años	0,894375	0,02580284	0,16063262

Fuente: Elaboración propia

Observando los valores de C_2 para cada región, se determinó que la estación que presenta el valor más alto de este parámetro es la estación Mocarí, para esto se realizó un análisis teniendo en cuenta todos los datos de cada una de las estaciones mencionadas anteriormente (Estación Landázuri, Mocarí, Universidad del Valle, Salinas de Upin, A. Vásquez Cobo) y en base a esta información se realizó el siguiente diagrama de barras verticales donde se puse observar lo anteriormente mencionado en los 7 periodos de retorno.

Ilustración 26. Mayores valores de C_2 en todo el territorio.

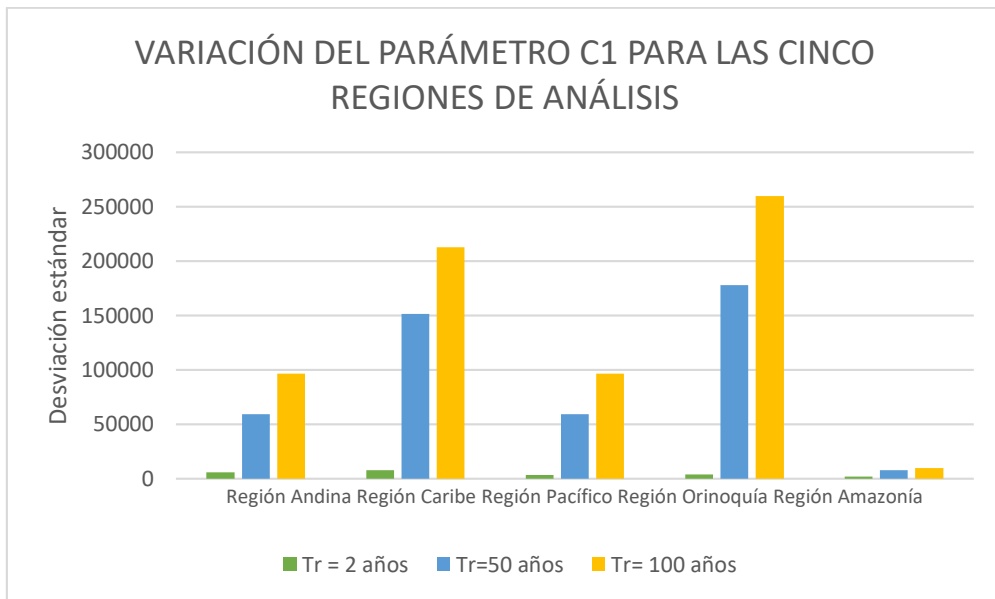


Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que tanto para C_1 y C_2 , las estaciones que poseen los valores más representativos son las mismas, sin embargo, existe una gran diferencia entre cada uno de los parámetros, en C_1 se observan valores muy dispersos por cada región, sin embargo, para C_2 estos valores son más cercanos y menos extremos.

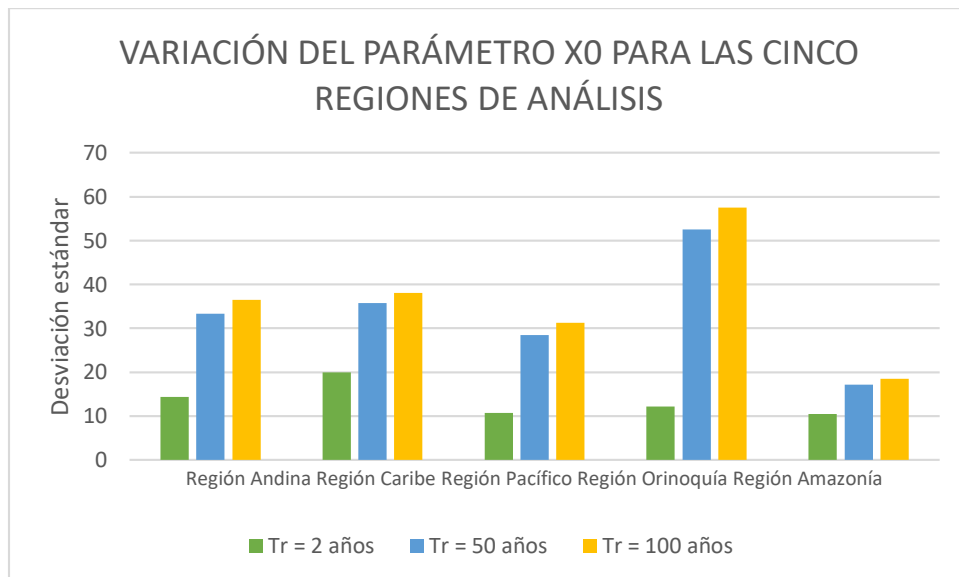
En resultado a los cálculos del Promedio, Varianza, Desviación estándar para los parámetros C_1 , X_0 y C_2 de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en el territorio colombiano para los periodos de retorno $Tr=2$, $Tr=50$ y $Tr=100$ años se obtienen las siguientes gráficas donde se compara el comportamiento de estos en las cinco regiones de estudio:

Ilustración 27. Variación del parámetro C_1 en las regiones de estudio.



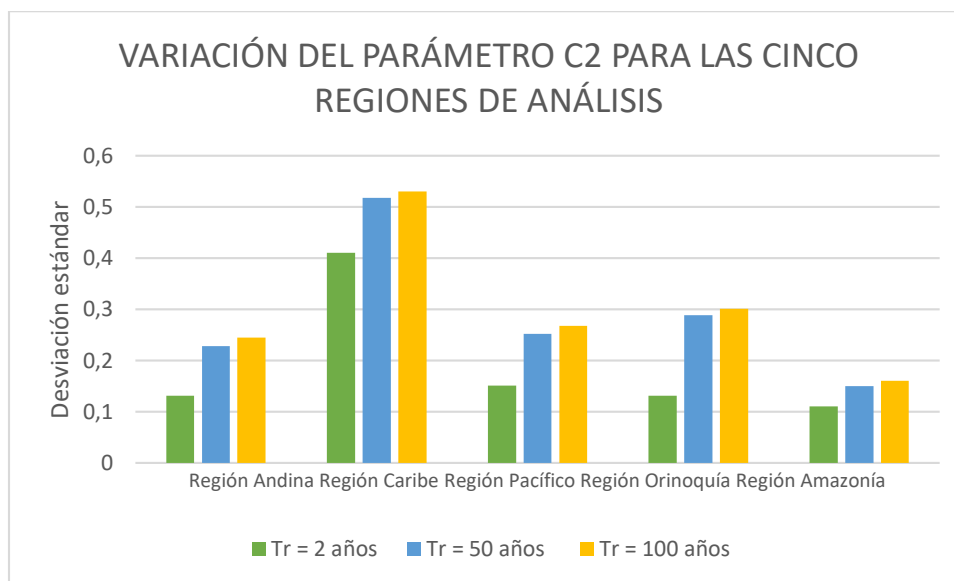
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 28. Variación del parámetro X_0 en las regiones de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 29. Variación del parámetro C_2 en las regiones de estudio.



Fuente: Elaboración propia

9.5 Variación de las curvas IDF al reemplazar c_1 , x_0 , c_2 por valores aleatorios

Finalizado el análisis de dispersión, se realizó una modificación de los valores de cada parámetro para determinar la interferencia de estos en las curvas IDF, para este análisis se eligió una estación aleatoria por cada una de las cinco regiones de estudio, por ejemplo; Para la región Andina se tomó la estación *Aeropuerto Camilo Daza*, en el caso de la región Caribe se trabajó con la estación *Manaure*, para la región Pacífico se utilizó la estación *Cent Admo la unión*, para la región de la Orinoquía se empleó la estación de la *base aérea Apiay*, y finalmente para la región de la Amazonía, la estación *Sibundoy*.

En este análisis se realizó un aumento del 5% en el valor de cada uno de los parámetros; como resultado se encontró principalmente que C_1 es un parámetro que está directamente relacionado con la intensidad de las lluvias, a medida que C_1 aumenta, aumentan los valores de intensidad, esta situación de igual manera se presenta si los valores disminuyen; por el contrario X_0 y C_2 presentan un comportamiento inversamente proporcional a la intensidad, es decir, a medida que estos valores aumentan los valores de la intensidad disminuyen, esto se determinó gracias a los movimientos verticales que presentaron las curvas al realizar la simulación.

De igual manera se observó que los parámetros C_1 como X_0 no presentan cambios drásticos en la forma de las curvas, al aumentar los valores de C_1 al 5% se observa como las curvas cambian sutilmente de manera vertical ascendente, para el caso de X_0 , al realizar este aumento se observa un comportamiento vertical descendente en la forma de las curvas, cabe aclarar que este movimiento no se presenta de manera drástica y se lleva a cabo por toda la forma de la curva.

Caso contrario sucede con el parámetro C_2 , ya que este demostró ser muy sensible al cambio, al aumentar el 5% de sus valores se observó como las curvas descienden de manera drástica, y al igual que en los parámetros anteriores, este movimiento se lleva a

cabo en toda la forma de la curva. Es importante mencionar que no se presentaron movimientos longitudinales, y todos los resultados concuerdan con la forma de la ecuación. Adicionalmente este análisis se realizó para cada una de las estaciones mencionadas anteriormente, y en todas las regiones se observó un comportamiento común entre sí.

9.6 Influencia del cambio climático en los valores de intensidad

El cambio climático es un factor determinante para el análisis del comportamiento de los próximos escenarios meteorológicos, el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM ha realizado un amplio estudio a nivel país, en el cual se analiza la influencia de este cambio en los valores promedio de precipitación y temperatura registrados hasta el momento, sin embargo, el factor de interés para este estudio es la precipitación.

El IDEAM tiene a su disposición una gran base de datos la cual se emplea para elaborar las curvas IDF, no obstante, estos valores no incluyen una proyección basada en los posibles escenarios de cambio climático. El objetivo de este análisis es conocer la posible influencia del cambio climático en los valores de intensidad calculados para cada región de estudio (Región Andina, Región Caribe, Región Pacífico, Región Orinoquia, Región Amazonía).

Para realizar este análisis previamente se determinó el parámetro más sensible relacionado con la precipitación, cabe aclarar que la ecuación de intensidad propuesta por el IDEAM depende de tres parámetros: C_1 , X_0 y C_2 , sin embargo, solo uno de ellos posee esta relación directamente.

Al realizar un estudio de sensibilidad fue posible determinar que C_1 es el parámetro que posee una relación directa con la precipitación, a medida que este valor aumenta o disminuye, los valores de intensidad aumentan o disminuyen de la misma manera. Caso contrario sucede con los parámetros X_0 y C_2 ya que la relación de estos con la intensidad es inversamente proporcional.

Teniendo claro el parámetro a modificar se procedió a buscar información relacionada con el cambio climático en el país, finalizada esta búsqueda se decidió tomar como referencia el quinto informe basado en las metodologías propuestas por el panel intergubernamental del cambio climático, en él se entregan resultados para los nuevos escenarios de cambio climático en Colombia para el periodo 2011-2100, teniendo como referencia los datos registrados durante el periodo de 1976 al 2005, es importante mencionar que este informe posee un cambio relevante, ya que brinda información específica por cada uno de los departamentos del país. [32]

En el informe se presentan cuatro nuevos escenarios (RCP 2,6-RCP 4,5-RCP 6,0-RCP 8,5) cada escenario está basado en la descripción de los caminos representativos de concentración de emisiones, al hablar de representativo se hace referencia a que cada RCP es específico, es decir cada uno de ellos proporciona solo uno de los posibles escenarios que se pueden presentar y la palabra camino indica la trayectoria que se ha tomado para llegar a cada escenario; en este orden de ideas, cada escenario es único, sin embargo, para efectos de estudio solo se analizan tres de ellos (RCP 2,6-RCP 4,5-RCP 8,5). [32]

En general estos escenarios presentan una combinación de diferentes proyecciones económicas, tecnológicas, demográficas, políticas e institucionales. A continuación, se presenta una descripción de cada uno de los escenarios analizados, cabe aclarar que en cada uno de ellos al hablar de forzamiento radiativo se hace referencia al cambio en el balance radiativo de la tierra, es decir, cualquier cambio que se presente en la radiación entrante o saliente del sistema, estos cambios se deben a incrementos en la radiación solar, incremento de gases de efecto invernadero o cambios en las propiedades reflectivas del planeta. [32]

- RCP 2,6: Este primer escenario presenta cifras poco alarmantes, se basa en un cambio amigable, en donde la contaminación no se ve potencialmente afectada. Para este escenario se espera alcanzar valores máximos de forzamiento radiativo de 3W/m^2 antes del 2100, de igual manera la concentración de dióxido de carbono alcanzará valores máximos de 490 antes del mismo año, en cuanto a la forma del itinerario, se espera una culminación seguida de disminución para cada parámetro. [32]
- RCP 4,5: Este segundo escenario presenta cifras intermedias, se basa en un cambio un poco menos amigable, en donde la contaminación se ve parcialmente afectada. Para este escenario se espera alcanzar valores estables de forzamiento radiativo a partir del 2010 con un valor de $4,5\text{W/m}^2$, de igual manera la concentración de dióxido de carbono presentará estabilización a partir del mismo año, pero con valores de 650, en cuanto a la forma del itinerario, se esperan periodos largos y estables por cada parámetro. [32]
- RCP 8,5: Este tercer escenario presenta cifras alarmantes, se basa en un cambio no amigable, en donde la contaminación se ve altamente afectada. Para este escenario se espera alcanzar valores mayores de forzamiento radiativo de $8,5\text{W/m}^2$ para el año 2100, de igual manera la concentración de dióxido de carbono alcanzará valores mayores a 1370 durante el mismo año, en cuanto a la forma del itinerario, se espera un aumento representativo para cada parámetro. [32]

Definidos los escenarios a trabajar se proceden a realizar los respectivos cálculos para las 108 estaciones pluviométricas de estudio dispuestas por el IDEAM. Es importante aclarar que el periodo de análisis para cada uno de los escenarios mencionados anteriormente es del año 2011 al año 2100, sin embargo, este lapso se dividió en tres periodos, ya que de esta manera se encontraban los resultados en el reporte; los tres periodos analizados son:

- 2011-2040.
- 2041-2070.
- 2071-2100.

De igual manera la información suministrada se encuentra por cada departamento, sin embargo, para la elaboración del análisis se disponen las 5 regiones naturales empleadas a lo largo de todo el documento (Andina, Caribe, Pacífico, Orinoquia, Amazonia).

Como base para el cálculo se tomaron los valores de los parámetros C_1 , X_0 y C_2 para todas las estaciones en estudio, previamente al análisis cada estación se asignó en una región

dependiendo de la ubicación del departamento al cual pertenece, lo anterior es fundamental para asignar el porcentaje de cambio por cada periodo.

Las siguientes tablas poseen los cambios porcentuales de precipitación para cada uno de los departamentos, en los tres periodos de análisis:

Tabla 45. Cambios en porcentaje de la precipitación para el periodo 2011-2040 en cada departamento de Colombia.

DEPARTAMENTO	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5
Amazonas	-15,39	-13,67	-15,85
Antioquia	4,91	4,71	5,24
Arauca	1,00	1,45	2,42
Atlántico	-7,67	-8,30	-10,26
Bogotá D.C	7,89	7,79	7,21
Bolívar	-15,36	-15,85	-15,76
Boyacá	6,09	6,41	7,76
Caldas	18,48	20,61	23,20
Caquetá	-21,04	-19,82	-16,86
Casanare	-2,51	-2,67	-0,90
Cauca	14,33	15,98	17,15
Cesar	-15,72	-16,32	-15,91
Chocó	-5,29	-6,06	-4,04
Córdoba	1,88	0,14	1,94
Cundinamarca	8,47	9,24	12,08
Guainía	-8,03	-8,20	-7,01
Guaviare	-7,19	-8,68	-7,15
Huila	14,15	17,53	17,31
La Guajira	-14,96	-15,86	-15,14
Magdalena	-19,13	-20,03	-19,44
Meta	-8,08	-7,88	-6,33
Nariño	11,08	12,44	11,90
Norte de Santander	1,41	0,95	3,57
Putumayo	3,10	6,28	7,20
Quindío	6,77	7,19	6,75
Risaralda	16,31	19,42	23,60
San Andrés y Providencia	-30,35	-30,54	-31,09
Santander	1,14	1,07	3,45
Sucre	-12,00	-11,82	-11,06
Tolima	9,36	10,89	13,34
Valle del Cauca	6,38	7,81	5,44
Vaupés	-21,92	-19,90	-20,30
Vichada	-2,10	-1,33	-1,62

Fuente:Elaboración propia.

Tabla 46. Cambios en porcentaje de la precipitación para el periodo 2041-2070 en cada departamento de Colombia.

DEPARTAMENTO	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5
Amazonas	-16,41	-12,86	-11,46
Antioquia	6,47	4,88	8,44
Arauca	-0,28	0,80	0,93
Atlántico	-4,80	-11,56	-9,76
Bogotá D.C	9,10	14,43	13,59
Bolívar	-13,90	-15,99	-16,64
Boyacá	7,18	3,44	8,31
Caldas	21,66	20,86	27,14
Caquetá	-18,93	-19,02	-14,32
Casanare	0,56	-2,75	-4,01
Cauca	15,47	16,36	17,06
Cesar	-15,94	-17,29	-19,34
Chocó	-3,21	-5,72	-2,02
Córdoba	3,62	-0,12	-0,18
Cundinamarca	10,66	8,40	13,28
Guainía	-6,52	-8,18	-9,58
Guaviare	-6,64	-8,06	-4,07
Huila	14,49	18,25	16,89
La Guajira	-15,61	-17,53	-18,62
Magdalena	-19,59	-21,87	-22,50
Meta	-5,16	-7,29	-3,87
Nariño	11,00	12,38	11,33
Norte de Santander	0,88	-0,02	2,19
Putumayo	5,97	1,76	8,02
Quindío	8,21	9,95	20,11
Risaralda	19,11	18,61	28,24
San Andrés y Providencia	-30,21	-33,51	-34,27
Santander	1,04	-0,48	1,95
Sucre	-11,42	-13,27	-15,74
Tolima	13,20	12,21	18,56
Valle del Cauca	6,91	4,82	4,33
Vaupés	-20,56	-23,79	-18,72
Vichada	-0,31	-2,38	-2,96

Fuente:Elaboración propia.

Tabla 47. Cambios en porcentaje de la precipitación para el periodo 2071-2100 en cada departamento de Colombia.

DEPARTAMENTO	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5
Amazonas	-14,80	-14,37	-10,73
Antioquia	5,90	6,66	9,73
Arauca	0,91	0,60	-6,38
Atlántico	-9,67	-11,89	-19,19
Bogotá D.C	10,78	10,03	12,67
Bolívar	-15,05	-15,48	-19,04
Boyacá	7,29	4,08	2,09
Caldas	16,73	22,44	30,57
Caquetá	-20,25	-19,68	-10,42
Casanare	-4,82	-4,63	-4,92

Cauca	15,01	15,73	23,01
Cesar	-17,22	-18,91	-23,45
Chocó	-4,35	-5,20	-3,00
Córdoba	0,59	-0,53	-2,72
Cundinamarca	9,14	8,22	8,29
Guainía	-9,86	-7,70	-9,56
Guaviare	-6,72	-4,70	-4,66
Huila	13,88	17,92	23,91
La Guajira	-17,48	-20,87	-24,84
Magdalena	-21,80	-24,68	-26,79
Meta	-7,05	-4,67	-3,01
Nariño	8,83	12,53	12,20
Norte de Santander	0,91	-0,24	-4,16
Putumayo	2,26	4,55	13,20
Quindío	5,63	16,04	26,16
Risaralda	12,43	21,38	32,30
San Andrés y Providencia	-33,08	-33,99	-33,67
Santander	0,01	-0,78	-3,86
Sucre	-13,48	-15,97	-21,66
Tolima	8,55	14,25	18,72
Valle del Cauca	8,93	6,72	2,66
Vaupés	-22,26	-21,87	-23,28
Vichada	-2,74	-1,36	-3,89

Fuente:Elaboración propia

Teniendo los datos anteriores como referencia y definido que C_1 es el parámetro relacionado con la precipitación, se procede a elaborar una tabla, en la cual se evidencia el cambio del valor de este parámetro para cada escenario de análisis con su respectivo periodo de proyección. Para lograr esto, se tomaron los valores iniciales de C_1 y dependiendo del departamento en el cual está ubicada la estación se aplicaron los porcentajes establecidos en las tablas anteriores, por ejemplo, la estación Cañasgordas se encuentra ubicada en el departamento de Antioquia, por tanto, para el escenario RCP 2,6 en el periodo 2011-2040 se debe aumentar el valor del C_1 , en un 4,91%, esta misma estación, en el mismo escenario, pero para el periodo 2041-2070, requiere un aumento del 6,47%; por otro lado, X_0 y C_2 , conservan los valores establecidos inicialmente.

El procedimiento descrito anteriormente se realiza con cada estación de estudio y como resultado se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 48. Variación de C1 para cada escenario (RCP).

ESTACIÓN CAÑASGORDAS											
T _R (años)	RCP 2,6			RCP 4,5			RCP 8,5			X ₀	C ₂
	C ₁ (2011-2040)	C ₁ (2041-2070)	C ₁ (2071-2100)	C ₁ (2011-2040)	C ₁ (2041-2070)	C ₁ (2071-2100)	C ₁ (2011-2040)	C ₁ (2041-2070)	C ₁ (2071-2100)		
2	2765,876	2765,892	2765,886	2765,874	2765,876	2765,894	2765,879	2765,911	2765,924	28,954	0,957
3	2515,416	2515,432	2515,426	2515,414	2515,416	2515,434	2515,419	2515,451	2515,464	25,038	0,918
5	2388,648	2388,664	2388,658	2388,646	2388,648	2388,666	2388,651	2388,683	2388,696	21,965	0,887
10	2340,536	2340,552	2340,546	2340,534	2340,536	2340,554	2340,539	2340,571	2340,584	19,250	0,859
25	2367,800	2367,816	2367,810	2367,798	2367,800	2367,818	2367,803	2367,835	2367,848	16,891	0,834
50	2422,255	2422,271	2422,265	2422,253	2422,255	2422,273	2422,258	2422,290	2422,303	15,615	0,821
100	2493,568	2493,584	2493,578	2493,566	2493,568	2493,586	2493,571	2493,603	2493,616	14,610	0,810

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente con los datos anteriores se determinan las intensidades teniendo en cuenta la ecuación establecida inicialmente por el IDEAM. Al igual que en la tabla anterior, las intensidades se determinan para cada escenario y por cada periodo de análisis. Esto se realiza con el fin de observar la variación de los valores por cada región. Finalmente los resultados obtenidos se grafican por medio de un diagrama de caja y bigotes, en este caso los diagramas se realizan únicamente por escenarios, es decir, cada región posee un total de tres diagramas, un diagrama en el cual se evidencia la variación para RCP 2,6 otro para RCP 4,5 y finalmente uno para RCP 8,5, es importante aclarar que los diagramas se encuentran agrupados por regiones para cada RCP, esto permite analizar de una manera general el comportamiento de las intensidades calculadas, de igual manera este tipo de gráficos permite determinar valores extraños o atípicos.

A continuación, se evidencian las intensidades calculadas para la estación de ejemplo “Cañasgordas”.

Tabla 49. Intensidades estación Cañasgordas para el escenario RCP 2,6 en cada periodo de retorno.

ESTACIÓN CAÑASGORDAS RCP 2,6							
PERIODO 2011-2040							
D(min)	I _{Tr=2}	I _{Tr=3}	I _{Tr=5}	I _{Tr=10}	I _{Tr=25}	I _{Tr=50}	I _{Tr=100}
15	74,04	85,02	97,17	112,47	131,91	145,97	160,31
30	55,91	63,49	71,83	82,33	95,64	105,22	115,02
60	37,71	42,58	47,95	54,71	63,32	69,48	75,83
120	23,03	26,08	29,46	33,71	39,14	43,01	47,02
360	9,19	10,64	12,24	14,26	16,82	18,64	20,52
PERIODO 2041-2070							
D(min)	I _{Tr=2}	I _{Tr=3}	I _{Tr=5}	I _{Tr=10}	I _{Tr=25}	I _{Tr=50}	I _{Tr=100}
15	74,04	85,02	97,17	112,47	131,91	145,97	160,31
30	55,91	63,49	71,83	82,33	95,64	105,22	115,02
60	37,71	42,58	47,95	54,71	63,32	69,48	75,83
120	23,03	26,08	29,46	33,71	39,14	43,01	47,02
360	9,19	10,64	12,24	14,26	16,82	18,64	20,52
PERIODO 2071-2100							
D(min)	I _{Tr=2}	I _{Tr=3}	I _{Tr=5}	I _{Tr=10}	I _{Tr=25}	I _{Tr=50}	I _{Tr=100}
15	74,04	85,02	97,17	112,47	131,91	145,97	160,31
30	55,91	63,49	71,83	82,33	95,64	105,22	115,02
60	37,71	42,58	47,95	54,71	63,32	69,48	75,83
120	23,03	26,08	29,46	33,71	39,14	43,01	47,02
360	9,19	10,64	12,24	14,26	16,82	18,64	20,52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 50. Intensidades estación Cañasgordas para el escenario RCP 4,5 en cada periodo de retorno

ESTACIÓN CAÑASGORDAS RCP 4,5							
PERIODO 2011-2040							
D(min)	ITr=2	ITr=3	ITr=5	ITr=10	ITr=25	ITr=50	ITr=100
15	74,04	85,02	97,17	112,47	131,91	145,97	160,31
30	55,91	63,49	71,83	82,33	95,64	105,22	115,02
60	37,71	42,58	47,95	54,71	63,32	69,48	75,83
120	23,03	26,08	29,46	33,71	39,14	43,01	47,02
360	9,19	10,64	12,24	14,26	16,82	18,64	20,52
PERIODO 2041-2070							
D(min)	ITr=2	ITr=3	ITr=5	ITr=10	ITr=25	ITr=50	ITr=100
15	74,04	85,02	97,17	112,47	131,91	145,97	160,31
30	55,91	63,49	71,83	82,33	95,64	105,22	115,02
60	37,71	42,58	47,95	54,71	63,32	69,48	75,83
120	23,03	26,08	29,46	33,71	39,14	43,01	47,02
360	9,19	10,64	12,24	14,26	16,82	18,64	20,52
PERIODO 2071-2100							
D(min)	ITr=2	ITr=3	ITr=5	ITr=10	ITr=25	ITr=50	ITr=100
15	74,04	85,02	97,17	112,47	131,91	145,97	160,31
30	55,91	63,49	71,83	82,33	95,64	105,22	115,02
60	37,71	42,58	47,95	54,71	63,32	69,48	75,83
120	23,03	26,08	29,46	33,71	39,14	43,01	47,02
360	9,19	10,64	12,24	14,26	16,82	18,64	20,52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 51. Intensidades estación Cañasgordas para el escenario RCP 8,5 en cada periodo de retorno.

ESTACIÓN CAÑASGORDAS RCP 8,5							
PERIODO 2011-2040							
D(min)	ITr=2	ITr=3	ITr=5	ITr=10	ITr=25	ITr=50	ITr=100
15	74,04	85,02	97,17	112,47	131,91	145,97	160,31
30	55,91	63,49	71,83	82,33	95,64	105,22	115,02
60	37,71	42,58	47,95	54,71	63,32	69,48	75,83
120	23,03	26,08	29,46	33,71	39,14	43,01	47,02
360	9,19	10,64	12,24	14,26	16,82	18,64	20,52
PERIODO 2041-2070							
D(min)	ITr=2	ITr=3	ITr=5	ITr=10	ITr=25	ITr=50	ITr=100
15	74,04	85,02	97,17	112,47	131,91	145,97	160,31
30	55,91	63,49	71,83	82,33	95,65	105,22	115,02
60	37,71	42,58	47,95	54,71	63,32	69,48	75,83
120	23,03	26,08	29,46	33,71	39,14	43,01	47,02
360	9,19	10,64	12,24	14,26	16,82	18,64	20,52
PERIODO 2071-2100							
D(min)	ITr=2	ITr=3	ITr=5	ITr=10	ITr=25	ITr=50	ITr=100
15	74,04	85,03	97,17	112,47	131,92	145,97	160,31

30	55,91	63,49	71,83	82,33	95,65	105,22	115,02
60	37,71	42,58	47,95	54,71	63,32	69,49	75,83
120	23,03	26,08	29,46	33,71	39,14	43,01	47,02
360	9,19	10,64	12,24	14,26	16,82	18,64	20,52

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, como resultado se encontró que cada departamento presenta valores diferentes de variación, algunos de ellos presentan valores de cambio en aumento y otros en disminución; al agrupar los resultados por regiones es fácil encontrar valores atípicos, ya que en una misma región se reúne un gran número de departamentos, cada uno de ellos con variaciones totalmente diferentes.

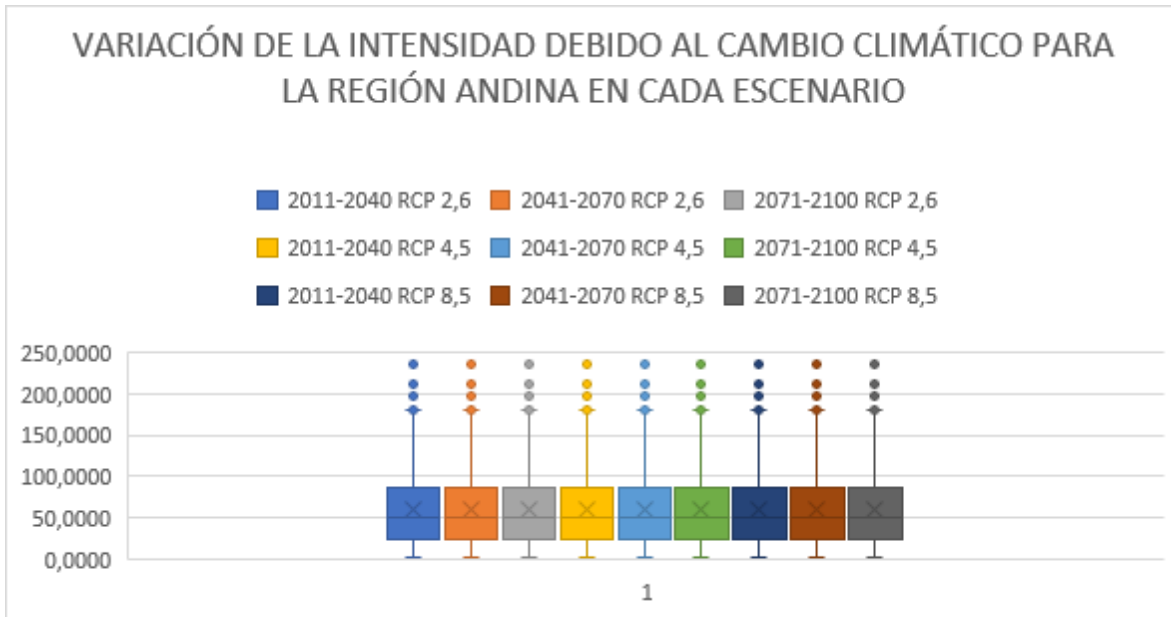
Por otro lado, se observó que al aumentar o disminuir los valores de C_1 los cálculos de las intensidades no presentaban cambios relevantes antes del decimal para todos los escenarios y todos los periodos de análisis, este comportamiento se observó en cada una de las regiones, e incluso si se reducen los decimales a 2, todos los valores son iguales, esto es un indicio de que el cambio climático afecta los valores de intensidad y posiblemente tiene influencia en los próximos años, pero no en gran medida.

En cuanto a los cambios observados es posible afirmar que la región Andina presentará los mayores aumentos de precipitación, se registran valores aproximados del 10 y 40%. Las regiones Caribe, Amazonía y Orinoquía presentan valores negativos de precipitación, esto quiere decir que en estas regiones las lluvias disminuirán para el periodo de estudio. [32] La región pacífico presenta un comportamiento variable, allí se observan valores altos y bajos de variación, de igual manera un mismo departamento para cada escenario y cada periodo presenta valores diversos.

9.6.1 Influencia del cambio climático en los valores de intensidad para la Región Andina.

Los tres escenarios analizados para la Región Andina presentan un comportamiento similar. Esta región abarca un gran número de departamentos, cada uno de ellos con comportamientos climatológicos diferentes, lo cual justifica la presencia de un gran número de valores atípicos, sin embargo, la mayoría de los valores se encuentran en el mismo rango. Cabe aclarar que para cada periodo de análisis en cada escenario el comportamiento encontrado es similar, y como se mencionaba anteriormente la influencia en el valor del parámetro C_1 no afecta en gran medida los resultados de intensidad, esto justifica que cada periodo represente comportamientos similares.

Ilustración 30. Variación de la intensidad debido al cambio climático para la región Andina en cada escenario.



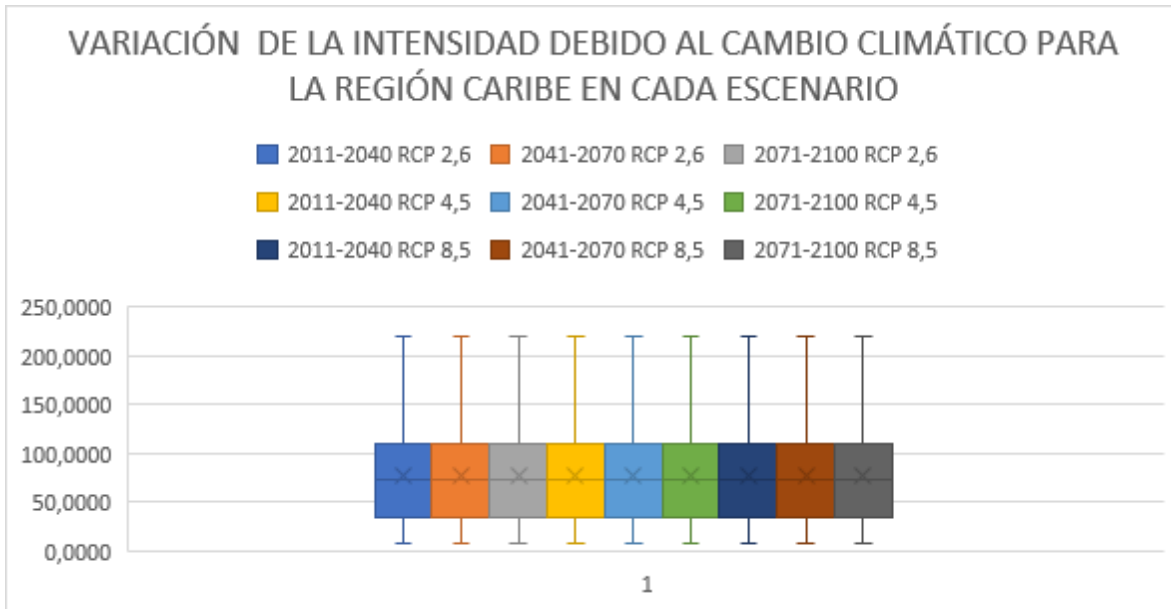
Fuente: Elaboración propia.

9.6.2 Influencia del cambio climático en los valores de intensidad para la Región Caribe.

Caso contrario a la región Andina, la región Caribe abarca un menor número de departamentos por lo cual es justificable encontrar todos los valores en un mismo rango. En cuanto a la afectación por el cambio climático, esta región presenta una disminución significativa en la precipitación en todos de sus departamentos, de hecho, esta región presenta uno de los valores más bajos. Adicionalmente cada periodo analizado posee el mismo comportamiento.

Es importante mencionar que el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, hace parte de esta región, y es uno de los departamentos en los cuales se pronostica una mayor disminución en los eventos de precipitación, alcanzando para el periodo 2071-2100 una disminución significativa alrededor del 33%, siendo este el valor más bajo registrado en la región Caribe.

Ilustración 31. Variación de la intensidad debido al cambio climático para la región Caribe en cada escenario.



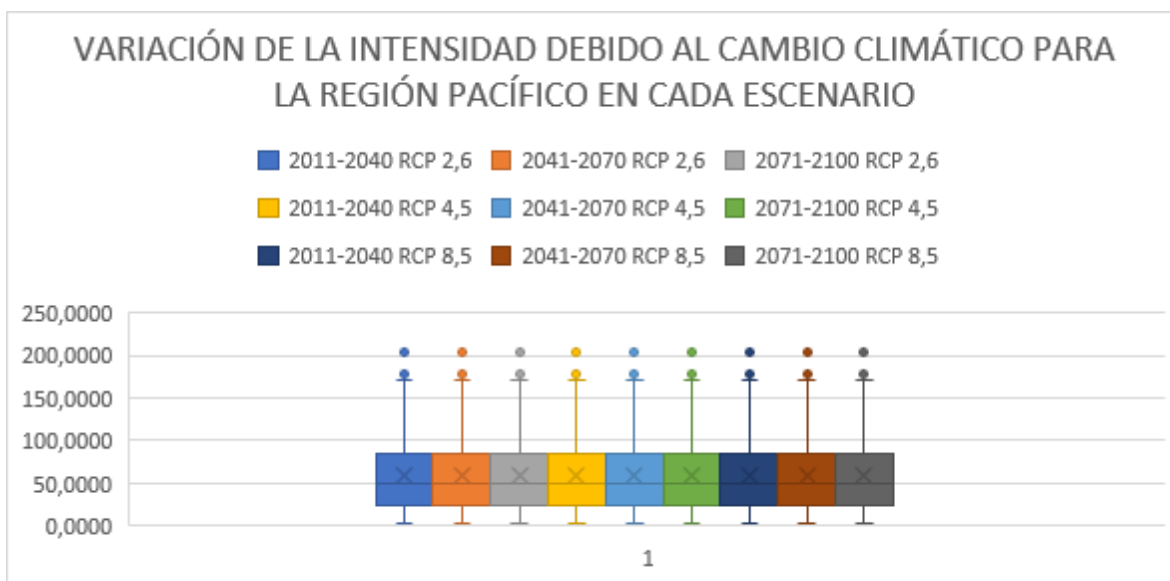
Fuente: Elaboración propia.

9.6.3 Influencia del cambio climático en los valores de intensidad para la Región Pacífico.

La región pacífico posee un bajo número de departamentos, sin embargo, se observa un comportamiento variable entre cada uno de ellos, por tanto, a pesar de que el número de departamentos no es elevado como en la región Andina, se presentan algunos valores atípicos.

En esta región se presentan valores tanto de aumento como disminución, en el caso del departamento del Chocó, este presenta una disminución en los valores de precipitación, para los tres periodos analizados, caso contrario, sucede con los departamentos del Valle del Cauca, Cauca y Nariño, los cuales presentan valores en aumento, siendo los departamentos del Cauca y Nariño los que mayor valor alcanzan.

Ilustración 32. Variación de la intensidad debido al cambio climático para la región pacífico en cada escenario.

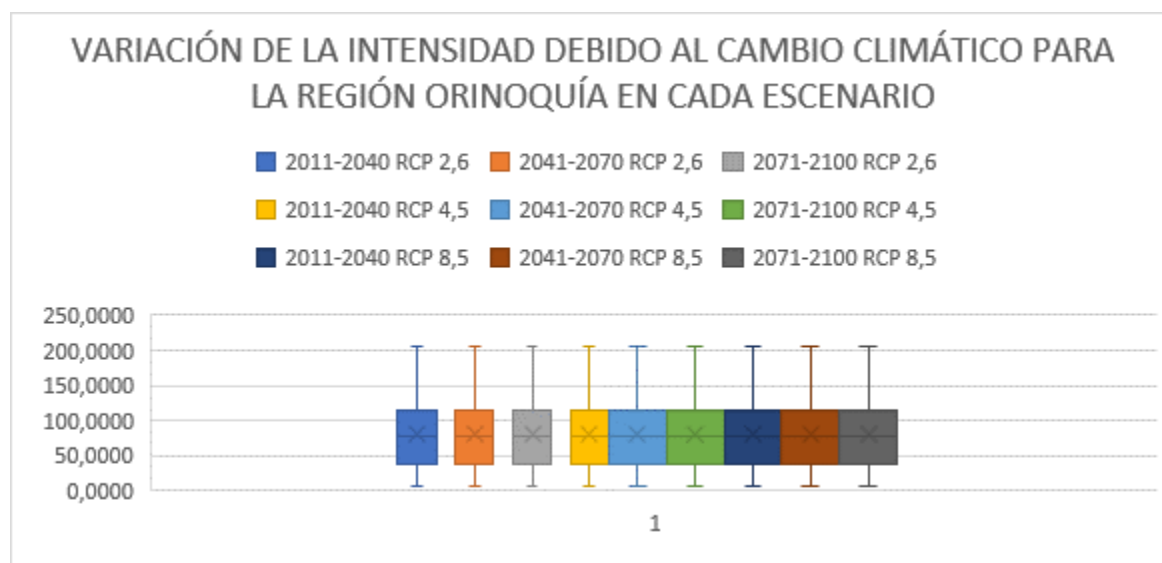


Fuente: Elaboración propia.

9.6.4 Influencia del cambio climático en los valores de intensidad para la Región Orinoquía.

Esta región presenta un comportamiento homogéneo en cada uno de sus departamentos, esto se afirma gracias a la ausencia de valores atípicos en cada uno de los siguientes diagramas. En este caso, la región Orinoquía presenta un escenario de aumento en algunos periodos para los departamentos de Arauca y Casanare, sin embargo, predominan los valores en disminución a lo largo de toda la región.

Ilustración 33. Variación de la intensidad debido al cambio climático para la región Orinoquía en cada escenario.



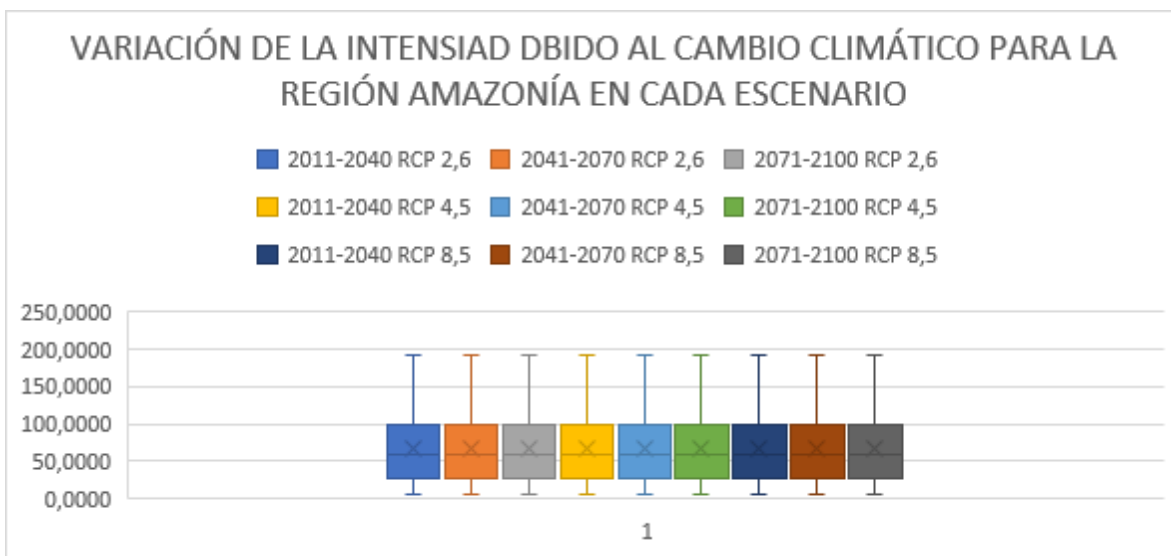
Fuente: Elaboración propia.

9.6.5 Influencia del cambio climático en los valores de intensidad para la Región Amazonía.

La región Amazonía presenta un comportamiento homogéneo en las proyecciones de los valores de intensidad para cada periodo de análisis, así mismo, este comportamiento se evidencia para cada escenario en estudio, debido a la baja cantidad de departamentos que abarca la región no se presentan valores atípicos en los resultados.

En esta región solo el departamento del Putumayo presenta un aumento en los valores de intensidad, caso contrario sucede con los departamentos restantes, específicamente con el departamento del Casanare, el cual alcanza valores en disminución de más del 20%.

Ilustración 34. Variación de la intensidad debido al cambio climático para la región Amazonía en cada escenario.



Fuente: Elaboración propia.

9.7 Comportamiento hidrológico en cada región de estudio de Colombia.

Debido a la ubicación geográfica, Colombia es uno de los países donde se presenta mayor variación pluviométrica, como se consecuencia de esto, se presentan diversos tipos y modalidades de precipitaciones en todo el país, cabe resaltar que debido a la influencia de diversos factores meteorológicos se generan variaciones en las lluvias, estos factores son: [33]

- Ondas del este.
- Zona de confluencia intertropical (ZCIT).
- Vaguadas y colas de frentes extra tropicales.
- Anticiclones de latitudes medias.
- Bajos cuasi permanentes en la costa pacífica y en la Amazonía.

Sin embargo, para efectos del estudio se realizó el análisis pluviométrico en base a las 5 regiones mencionadas anteriormente: Andia, Caribe, Pacífico, Orinoquía, Amazonía.

9.7.1 Región Andina:

La región Andina, es la región más amplia de Colombia, ya que abarca un gran número de departamentos, por tal razón el comportamiento hidrológico en esta zona es complejo, intervienen factores como la exposición y orientación de la pendiente, la elevación y la localización geográfica. Para esta región los valores máximos de precipitación se han registrado a elevaciones medias como es el caso de las zonas del Eje Cafetero, Antioquia, y Santander, en estos sitios se registran valores anuales entre 2000 y 4000 mm.

En el caso de valles y elevaciones altas, los resultados de precipitación disminuyen, esto sucede en los departamentos del Huila, Tolima y ciertas zonas del departamento de Santander o ciertas zonas que se encuentran por encima de los 2000 msnm; estas zonas mencionadas anteriormente registran valores de lluvia inferiores a 1200 mm.

La distribución de las lluvias en la región es de tipo bimodal. [33]

9.7.2 Región Caribe:

En la región Caribe los departamentos de la Guajira, Atlántico y Cesar durante gran parte del año, presentan valores de precipitación de aproximadamente 300 y 600 mm. Sin embargo, en los departamentos con cercanías a los ramales de las cordilleras central y occidental, alcanzan valores entre 1800 y 2000 mm. En esta región es posible encontrar dos tipos de distribuciones, en las zonas áridas del norte, se encuentra una distribución bimodal, mientras que, en las zonas del sur de la región, la distribución es monomodal. [33]

9.7.3 Región Pacífico:

La región pacífica posee un papel importante al hablar de precipitaciones en Colombia, ya que en el norte y centro de esta región se presentan los valores más altos de precipitación en el país, allí se alcanzan valores entre 8000 y 10000 mm, y en algunos años se ha alcanzado valores extremos de 12000 mm de lluvia, sin embargo, durante los meses de enero a marzo, se registran los menores valores de lluvia para esta región. [33]

9.7.4 Región Orinoquía:

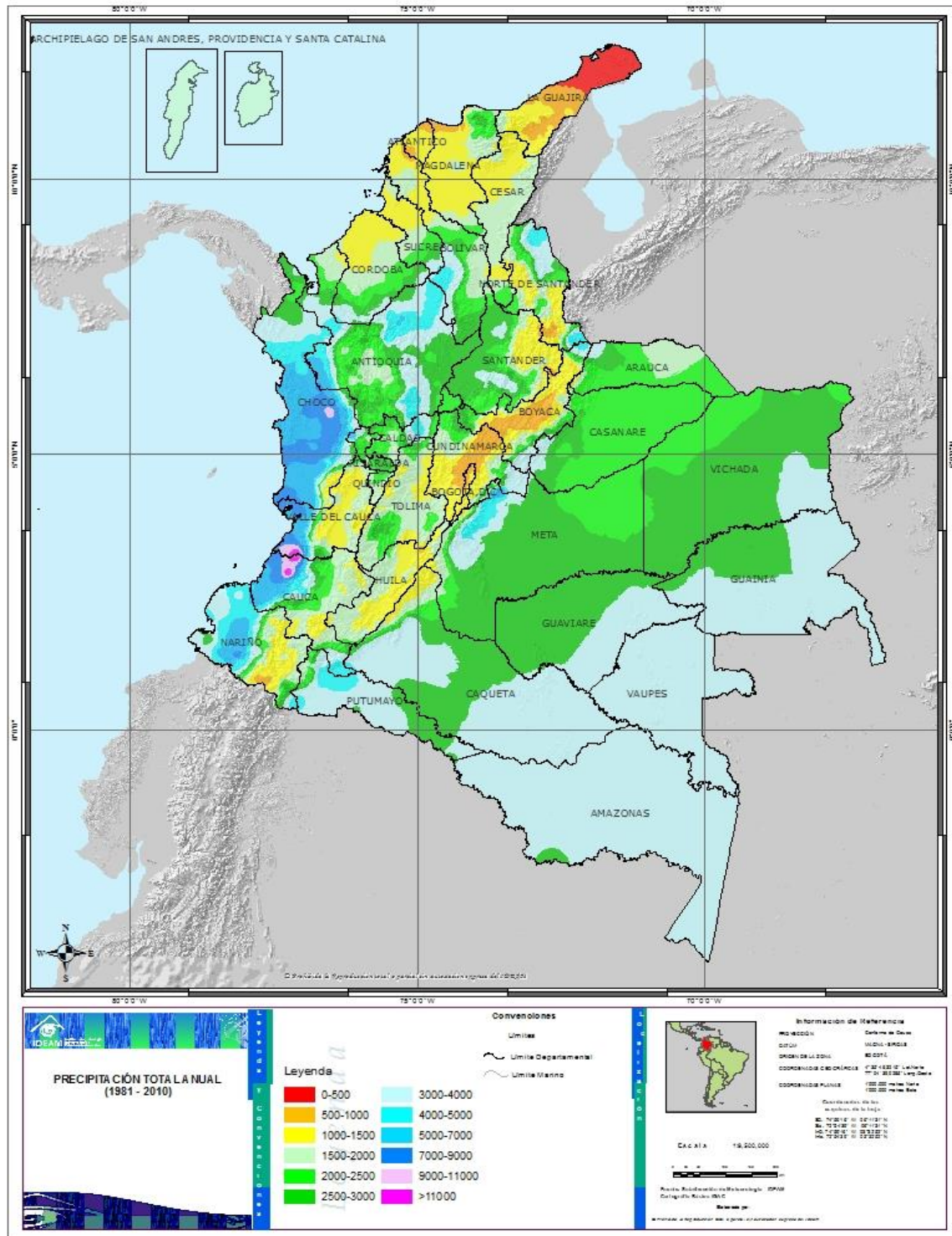
En esta región las lluvias presentan una alta variabilidad, los departamentos de Arauca y Vichada presentan valores de lluvia entre 1500 y 2000 mm anuales, por otro lado, a lo largo del piedemonte de la cordillera oriental se registran valores de 4000 y 6000 mm anuales, y finalmente en los valles se registran valores de 2500 a 3000 mm por año. En esta región las lluvias poseen una distribución monomodal y se caracterizan por tener altas estacionalidades. [33]

9.7.5 Región Amazonía:

Las lluvias en la amazonia son uniformes y poseen escasa estacionalidad, así mismo, en esta región se presenta lluvias abundantes y de gran intensidad durante todo el año, los datos se encuentran entre 3000 y 4500 mm por año. [33]

El siguiente mapa presenta información del comportamiento hidrológico anual para todo el territorio colombiano, para el periodo de (1981-2010):

Ilustración 35. Mapa hidrológico de Colombia.



Fuente: ATLAS IDEAM

9.8 Correlación múltiple

Con las 108 estaciones de estudio para el desarrollo de este proyecto, se realizó una correlación estadística múltiple donde se puede observar la relación, la proporcionalidad y la relación lineal que exista entre los diferentes parámetros de estudio. La correlación realizada se llevó a cabo con los siguientes parámetros (Ver anexos):

- Altura
- Precipitación máxima anual promedio
- Precipitación promedio anual
- Valores de C_1 , X_0 y C_2 para $Tr=2$ años, $Tr= 50$ años, $Tr=100$ años.

En la *tabla 52* se muestran los resultados obtenidos de la correlación múltiple realizada, se obtuvo y se analiza que:

- Los parámetros C_1 , X_0 y C_2 para los tres periodos de retorno evaluados ($Tr=2$ años, $Tr= 50$ años y $Tr=100$ años) evidencian correlación negativa con la variable altura, presentando un comportamiento inversamente proporcional, mientras el parámetro C_1 , X_0 o C_2 aumenta, la altura disminuye.
- El parámetro C_1 presenta una mayor correlación positiva con la precipitación máxima anual promedio, esto se evidencia para los tres periodos de retorno analizados, para C_1 con periodo de retorno de $Tr=2$ años se obtuvo una correlación del 11.83%, para C_1 con periodo de retorno de $Tr= 50$ años presenta una correlación positiva de 14.35%, finalmente, para C_1 con periodo de retorno de $Tr= 100$ años la correlación es de 14.02%. Analizando que los valores de ambas variables presentan un comportamiento directamente proporcional, donde sus valores aumentan o disminuyen simultáneamente.
- El parámetro C_1 presenta otra similitud para los tres periodos de retorno analizados, donde se evidencia una correlación positiva menor con la precipitación promedio anual, se obtuvo una correlación del 4.21% para C_1 con periodo de retorno $Tr= 2$ años, para C_1 con periodo de retorno de $Tr= 50$ años se obtuvo una correlación del 2.45%, finalmente, se obtuvo una correlación del 4.15% para C_1 con periodo de retorno de $Tr= 100$ años.
- EL parámetro X_0 presenta una mayor correlación positiva con la precipitación máxima anual promedio en los 3 periodos de retorno evaluados. La mayor correlación con esta variable se observa para X_0 con periodo de retorno de $Tr= 100$ años con un 30.78%. Seguido, con una correlación del 30.50% para X_0 con periodo de retorno de $Tr= 50$ años, finalmente, una correlación del 22.56% con X_0 para un $Tr=2$ años.
- El parámetro X_0 para un periodo de retorno de $Tr= 2$ años presenta la menor correlación negativa con la variable altura, con un porcentaje del .40.82%.

- En similitud con el parámetro C_1 , X_0 presenta una menor correlación negativa con la variable precipitación promedio anual. X_0 para un periodo de retorno de $Tr= 2$ años cuenta con una correlación del 1.82%, seguido de X_0 para un $Tr= 50$ años con el 11.76%, finalmente, la mayor correlación con la precipitación promedio anual se presenta con un 12.38% para X_0 con periodo de retorno de $Tr= 100$ años.
- La variable C_2 para los tres periodos de retorno analizados presenta correlación negativa con todas las variables de estudio (Altura, Precipitación máxima anual promedio, Precipitación promedio anual), Como resultado se obtiene un comportamiento inversamente proporcional entre las variables correlacionadas, donde a valores mayores de C_2 se obtendrá menores valores de altura, precipitación máxima anual promedio y precipitación promedio anual respectivamente. La correlación negativa mayor se presenta con C_2 para un periodo de retorno de $Tr= 100$ años con un -1.15% con la variable precipitación máxima promedio anual, por otro lado, la correlación menor se evidencia con C_2 para un periodo de retorno $Tr= 2$ años y la precipitación promedio anual con un -37.28%.

Tabla 52. Correlación Múltiple

CORRELACIÓN MÚLTIPLE.	C1 TR= 2 AÑOS	C1 TR= 50 AÑOS	C1= 100 AÑOS	X0 TR= 2 AÑOS	X0 TR= 50 AÑOS	X0= 100 AÑOS	C2 TR= 2 AÑOS	C2 TR= 50 AÑOS	C2 TR= 100 AÑOS
ALTURA	-0.45080	-0.2680	-0.2412	-0.4082	-0.3612	-0.3523	-0.2857	-0.1971	-0.1890
PRECIPITACIÓN MÁXIMA PROMEDIO ANUAL	0.1183	0.1435	0.1402	0.2256	0.3050	0.3078	-0.1530	-0.0209	-0.0115
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL	-0.1421	0.0245	0.0415	0.0182	0.0182	0.1238	-0.3728	-0.1950	-0.1820

Fuente: Elaboración propia

9.9 Interpolación espacial

Con las 108 estaciones meteorológicas de estudio para el desarrollo de esta investigación y para los parámetros C_1 , X_0 y C_2 en periodos de retorno de 2,50 y 100 años se realizó un análisis espacial en el software Qgis por diferentes métodos de interpolación donde se pudo conocer valores nuevos y significativos de estos parámetros en diferentes puntos a lo largo del territorio nacional.

La escala de colores utilizada en los mapas generados para los diferentes parámetros y periodos de retorno interpolados es la siguiente, donde los colores más cercanos a azul indican valores más altos, por el contrario, los valores más cercanos a rojo indican valores más bajos:



A continuación, se muestra los resultados de los mapas generados a partir de la interpolación realizada para cada uno de los parámetros y los diferentes métodos de interpolación utilizados:

9.9.1 Interpolación por el método IDW

Con este método de interpolación se estudió los parámetros C_1 , X_0 y C_2 para los periodos de retorno 2, 50 y 100 años tal como se mencionó anteriormente, al generar los mapas de la espacialización se obtuvo que:

- El parámetro C_1 para un periodo de retorno de $Tr=2$ años presenta valores mayores al norte del país a lo largo de la Región Caribe, se puede presenciar en esta zona una tonalidad más uniforme a comparación de las otras zonas y existe un patrón marcado de acuerdo a la tonalidad y es que se encuentran los valores más altos de C_1 $Tr=2$ años, Por otro lado, en la Región Andina se evidencia una gran variedad de tonalidades heterogénea a lo largo de la zona, se encuentran valores de C_1 $Tr= 2$ años altos, intermedios y bajos en relación a la escala de colores utilizada, seguidamente, la Región Pacífico tiene cierta similitud con la región Andina en cuanto a la heterogeneidad de colores, se observa una gran variedad de valores (altos, medios y bajos) a lo largo de la zona y no se cuenta con un patrón marcado. En la Región Orinoquía se observa un patrón marcado en donde la gama de colores es homogénea, los valores del parámetro C_1 para un periodo de retorno de $Tr= 2$ años encontrados en la zona este del país son de tendencia alta, por último, en la zona sur del país se observa una gran notabilidad de gama de color con tendencia a valores bajos de este parámetro, como lo es la gama de color del naranja al rojo, sin embargo también se observa una gran presencia del color verde donde se analiza que existen valores con tendencia alta-intermedia y bajos en la Región Amazonia.

- C_1 para un periodo de retorno de $Tr= 50$ años en la parte norte del país sigue presentando un patrón marcado predominante por valores más altos y tonalidades más uniformes en comparación a las otras zonas del país, sin embargo se observa limitadamente en el extremo noreste la presencia de una gama de colores de amarillo a rojo específicamente en ciertos puntos, en general en la región caribe los valores de C_1 $Tr=50$ años son altos a lo largo de la zona, pero también en el extremo noreste como se mencionaba anteriormente se encuentran valores intermedios-bajos en ciertos puntos de manera limitada. En la Región Andina y en comparación al periodo de retorno $Tr= 2$ años se presencia al centro occidente de la región andina una mejor homogeneidad de la gama de colores, los colores marcados en esta zona son de tendencia intermedia-alta (verde, azul), sin embargo, en el resto de esta región se observa una escala de colores de valores bajos. Por otro lado, la Región Pacífico visiblemente maneja la misma tendencia de color respecto a C_1 $Tr= 2$ años. En la Región Orinoquía un comportamiento levemente homogéneo en la escala de colores, a diferencia de los valores de C_1 para un periodo de retorno de $Tr=2$ años se evidencia que hay valores con tendencia intermedia-baja. Por último, en la Región Amazonia hay similitud en el comportamiento de la escala de colores respecto a C_1 para un periodo de retorno de $Tr=2$ años, sin embargo, se puede observar que en la parte noroccidente de la Región Amazonia hay ciertos puntos marcados por color rojo y son bastante notorios, lo que conlleva a que haya valores bajos de C_1 $Tr=50$ años en esta zona.
- La interpolación espacial del parámetro C_1 para un periodo de retorno de $Tr=100$ años presenta gran similitud con la espacialización del parámetro C_1 para un periodo de retorno de $Tr=50$ años, la distribución de la escala de colores a lo largo del territorio nacional es similar y no se observan cambios notorios en las diferentes regiones de Colombia.
- El parámetro C_2 con periodo de retorno de $Tr=2$ años muestra un patrón uniforme en la parte Norte de Colombia, de este modo la Región Caribe cuenta con los valores más altos de C_2 $Tr=2$ años, la escala de colores en esta zona es homogénea predominando el color azul y a su vez el color verde, por otro lado, la zona este de Colombia conformada por la Región Orinoquía muestra un comportamiento semi uniforme donde la gama de color más predominantes es la verde, seguido de la gama de color rojo, obteniendo así en gran parte valores altos de C_2 con periodo de retorno de $Tr= 2$ años, pero a su vez se observa que hay valores intermedios-bajos de este parámetro. En la Región Pacífico predomina el color rojo y sus derivados, sin embargo, en la zona noroeste del país se evidencia la gama de color azul presentando así valores mayores de C_2 $Tr=2$ años en esta zona, por otro lado, en el resto de la Región Pacífico se observa que predominan los valores Bajos e intermedios de este parámetro. En la Región Andina se observa un comportamiento heterogéneo en los valores de C_2 para un periodo de retorno de $Tr=2$ años, presenciándose una variedad de colores a lo largo de esta región, en el noroeste de la Región Andina se evidencia un comportamiento variado con presencia de color rojo, naranja, amarillo y

verde, sin embargo, al noroeste de la Región Andina se observa un predominio de valores altos con los colores azules y verdes, en el resto de la región hay un comportamiento variado pero se destaca la existencia de valores bajos de C_2 para un Periodo de retorno de $Tr=2$ años. Finalmente, la Región Amazonia muestra un comportamiento general heterogéneo en cuanto a su gama de colores, en el oriente del país presenta un comportamiento homogéneo con valores Intermedios-altos del parámetro C_2 , sin embargo, en el resto de la región el comportamiento es diverso tal como se mencionó anteriormente, predominando la gama de colores rojos, naranja y sus derivados.

- C_2 para un periodo de retorno de $Tr=50$ años muestra un comportamiento uniforme a lo largo de la Región Caribe, predominando la escala de color azul y derivados, encontrando en esta zona del territorio colombiano valores altos de C_2 $Tr=50$ años, sin embargo, es importante nombrar que al noreste de la Región Caribe se sitúa en un punto específico una escala de color de valores intermedios, bajos y altos. En la Región Andina existe un comportamiento visiblemente heterogéneo donde se presencia diversos colores, en esta zona del país se encuentran valores de C_2 $Tr=50$ años bajos, intermedios y altos. Así mismo, la Región Pacífico, presenta una predominancia en la escala de color rojo, donde se encuentran valores de C_2 bajos e intermedios, sin embargo, en el noroeste de la región se evidencia una pequeña escala de color verde y azul, encontrando aquí valores de C_2 altos. Por otro lado, en el norte de la Región Orinoquía se evidencia un comportamiento homogéneo en la escala de colores rojos y sus derivados, encontrando en esta zona valores de C_2 $Tr=50$ años valores intermedios-bajos, por otra parte, al este de la Región predomina la escala de color verde y azul, encontrando aquí valores más altos del parámetro. Finalmente, al sur del país se evidencia un comportamiento homogéneo en cuanto a la escala de colores, predominan valores intermedios-bajos, al extremo sur se encuentran valores intermedios-altos, al este de la Región Amazonia se evidencia una gama de colores verde, amarillo en relación con la presencia en esta zona de valores intermedios-altos del parámetro C_2 $Tr=50$ años.
- La interpolación realizada para el parámetro C_2 con periodo de retorno $Tr=100$ años presenta gran similitud con la interpolación del parámetro C_2 con periodo de retorno $Tr=50$, presentando la misma gama de colores a lo largo del territorio nacional, es importante resaltar que esto sucede con el parámetro C_1 para los mismos periodos de retorno.
- El parámetro X_0 para un periodo de retorno de $Tr= 2$ años a lo largo del territorio nacional presenta un comportamiento heterogéneo, los valores más altos de X_0 para este periodo de retorno se encuentran situados en la parte norte del país a lo largo de la región caribe, así mismo una parte del este del país, por el contrario, en el extremo sur de Colombia, noreste y suroeste del país se evidencia una escala de color rojo, amarillo, naranja y sus derivados, encontrando en estas zonas valores menores del parámetro X_0 para un periodo de retorno de $Tr= 2$ años.

- El parámetro X_0 para un periodo de retorno de $Tr=50$ años presenta una gama de colores azul y verde distribuido a lo largo de la Región Caribe, en relación a esto la parte norte del país cuenta con valores altos de X_0 $Tr=2$ años, así mismo en la parte este del país y en una zona del extremo sur del territorio nacional se puede evidenciar lo anteriormente mencionado, por otro lado, en el centro occidente de la Región Andina, el extremo noreste del territorio nacional, el suroeste del país y gran parte de la Región amazonia presentan una escala de colores rojos, naranja, amarillo, presentando los valores más bajos del parámetro X_0 $Tr=50$ años.
- Se observa que la interpolación espacial del parámetro X_0 para un $Tr=100$ años presenta una gran similitud con la espacialización del parámetro X_0 con periodo de retorno $Tr=50$ años, la escala de colores distribuida a lo largo de Colombia presenta alta similitud.

9.9.2 Interpolación por el método TIN

Al igual que con el método IDW, se evaluó los parámetros C_1 , X_0 y C_2 para los periodos de retorno 2, 50 y 100 años, al realizar la interpolación espacial se obtuvo que:

- En el norte, en el este, en el extremo noreste y en una parte del centro del país se presentan los valores mayores del parámetro C_1 para un periodo de retorno de $Tr=2$ años, en el extremo sur del país, y el sureste de la Región amazonia se encuentran los valores intermedios del parámetro C_1 , por el contrario, en el suroeste del país, en la región amazonia, una gran parte del sur del territorio nacional y el noreste se encuentra situado los valores más bajos del parámetro C_1 para un periodo de retorno de $Tr=2$ años.
- El parámetro C_1 para un periodo de retorno de $Tr=50$ años, presenta los valores más altos en el Norte, en el Noroeste, una pequeña parte del centro del país, del este y del sur, sin embargo, en el extremo sur del territorio nacional, el suroriente, centro oriente y centro occidente del país presentan los valores intermedios-bajos del parámetro C_1 $Tr=50$. Se resalta que hay muchas zonas a lo largo de Colombia en las que predomina el color rojo y sus derivados.
- La interpolación del parámetro C_1 para un periodo de retorno de $Tr=100$ años por el método presenta similitud con la interpolación realizada para el mismo parámetro, pero un periodo de retorno de $Tr= 50$ años, no se encuentra mucha diferencia en la distribución de la escala de colores en las diferentes regiones a lo largo del territorio nacional.
- El parámetro C_2 para un periodo de retorno de $Tr= 2$ años presentan una gran heterogeneidad en el centro del país, noroeste de la región andina y al noreste del país, presentando una gran variedad de colores en esta zona, encontrando aquí valores altos, intermedios y bajos. Por otro lado, en la Región Pacífico se

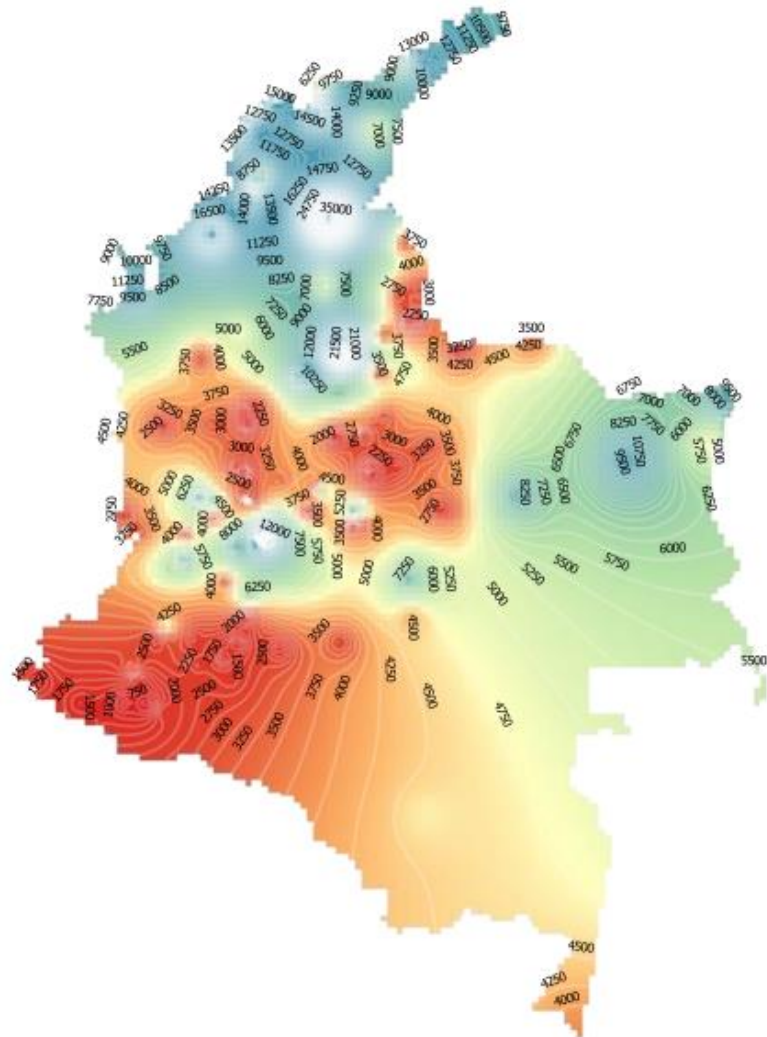
evidencia una gran relevancia de la escala de color roja, naranja, amarillo presentando valores del parámetro C_2 $Tr=2$ años intermedio-bajos. En el norte y gran parte del este del país se encuentran los valores más altos de este parámetro. Finalmente, en el sur del país se puede observar una homogeneidad en la gama de colores, en esta zona se encuentra los valores intermedios del parámetro C_2 para este periodo de retorno.

- La interpolación realizada para el parámetro C_2 $Tr=50$ años, presenta una distribución en su gama de colores a lo largo del territorio nacional un poco más sectorizada. Al norte del país a lo largo de la región caribe se puede observar que se encuentran los colores azul y verde, encontrando en esta zona los valores más altos del parámetro C_2 $Tr=50$ años, lo mismo sucede en una gran parte del extremo oriental de Colombia. En el extremo Sur del país a lo largo de la Región Amazonia se observa un cambio de color en comparación al parámetro C_2 $Tr=2$ años, obteniendo valores de C_2 mayores en el periodo de retorno $Tr=50$ años, por otro lado, En el extremo noreste del territorio nacional, en el suroriente de Colombia, suroeste del país y ciertas zonas del centro del país, se puede observar la gama de color rojo, encontrando aquí valores bajos del parámetro C_2 $Tr=50$ años.
- La interpolación espacial realizada para el parámetro C_2 con periodo de retorno $Tr=100$ años presenta similitud en la distribución de la escala de colores y ubicación de estos a lo largo del territorio nacional, no se logran observar diferencia alguna con la interpolación espacial realizada para el periodo de retorno $Tr=50$ años.
- El parámetro X_0 para $Tr=2$ años, presenta los valores mayores a lo largo de la Región Caribe, en la parte este del país, al noroeste del país y suroeste del territorio colombiano. En el extremo sur del país se observa una homogeneidad en la gama de color naranja-amarillo, encontrando aquí valores intermedios. Al suroriente colombiano y una gran parte del centro del país se encuentra sectorizado por la gama de colores rojo, encontrando en estas zonas valores bajos del parámetro X_0 $Tr=2$ años.
- Para un periodo de retorno de $Tr= 50$ años el parámetro X_0 se puede observar que en la parte este del país se encuentra mayormente delimitado la escala de colores, en cuanto a la escala azul-verde se encuentra visiblemente marcada, encontrando valores mayores de X_0 $Tr=50$ años en esta zona, al norte del país a lo largo de la Región Caribe y en algunas zonas en el centro del territorio colombiano. Al extremo sur de Colombia se observa un cambio de gama de color respecto al periodo de retorno $Tr= 2$ años, obteniendo valores un poco más altos del parámetro X_0 con $Tr=50$ años.

- La interpolación espacial del parámetro X_0 para un periodo de retorno $Tr=100$ años presenta alta similitud con la espacialización para el mismo parámetro con periodo de retorno $Tr=50$ años, en semejanza también con lo sucedido en la espacialización por el método IDW para el parámetro X_0 mencionado anteriormente y los mismos periodos de retorno ($Tr=50$ y $Tr=100$).

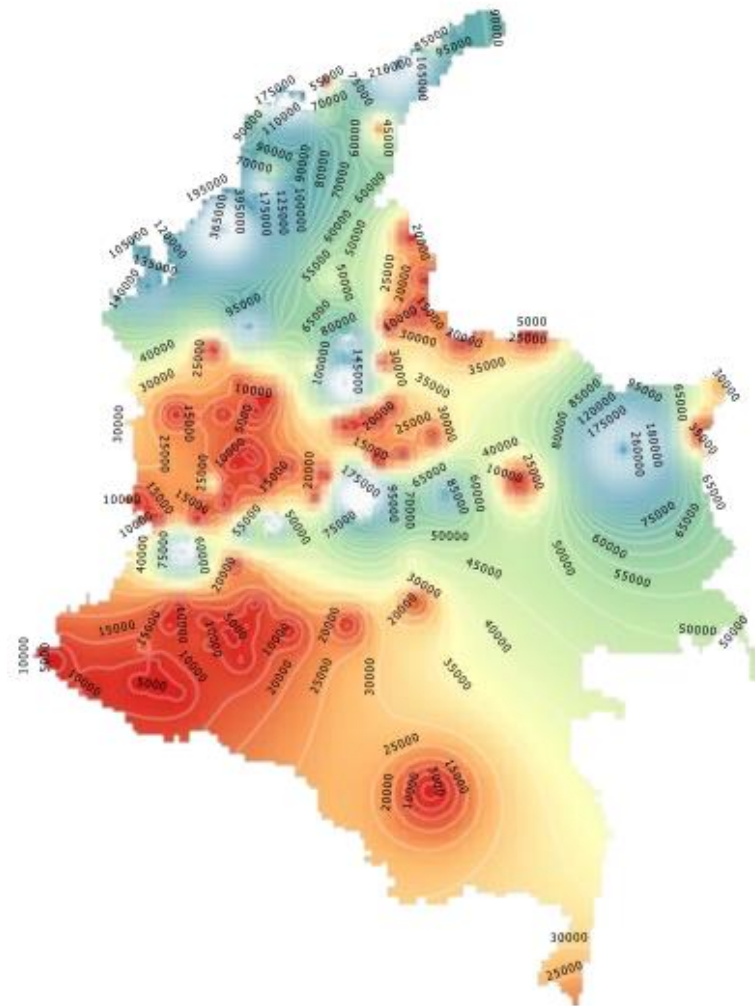
A continuación, se presentan los mapas de la interpolación realizada para el parámetro C_1 , X_0 y C_2 en los periodos de retorno $Tr=2$, 50 y 100 años por el método de interpolación IDW y TIN, es importante mencionar que no se incluye la espacialización por el método Kriging debido a que las imágenes generadas no fueron completamente legibles para el desarrollo de este análisis.

Ilustración 36. C1 Tr=2 años IDW.



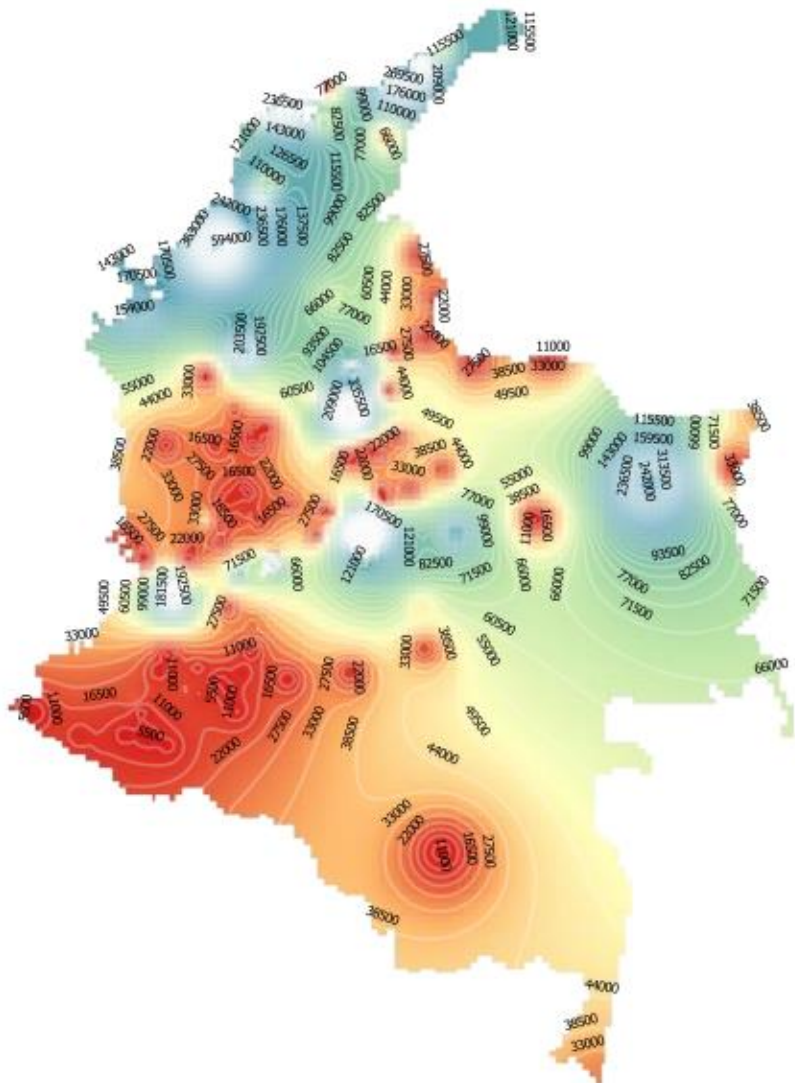
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 37. C1 Tr=50 años IDW.



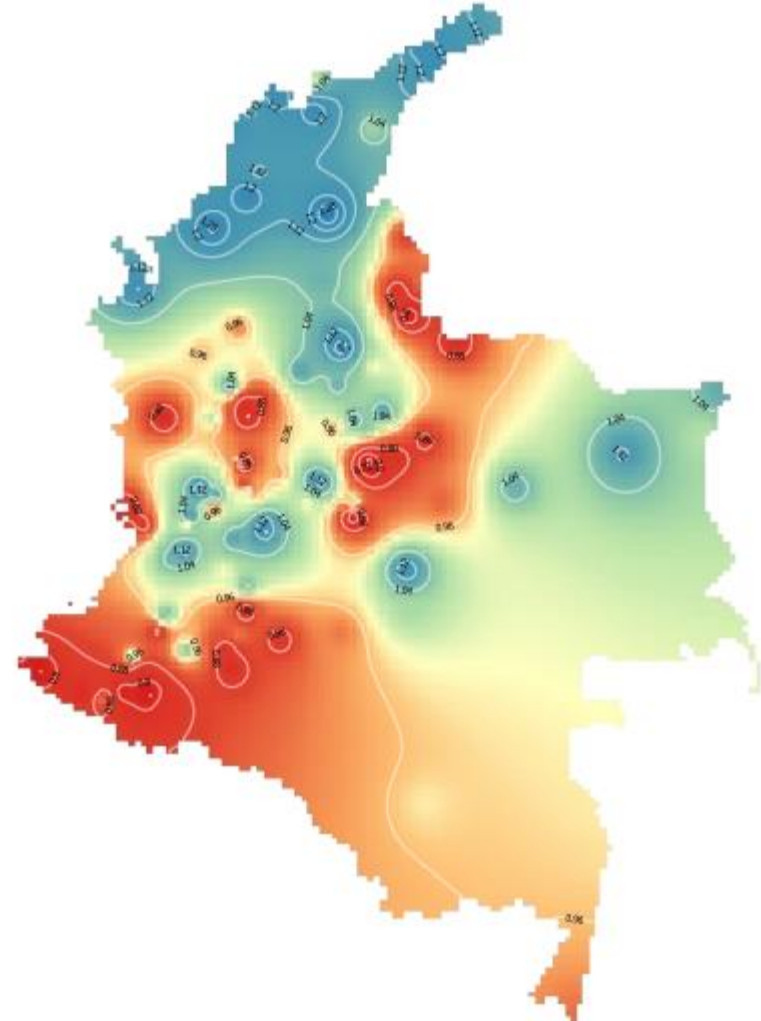
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 38. C1 Tr=100 años IDW.



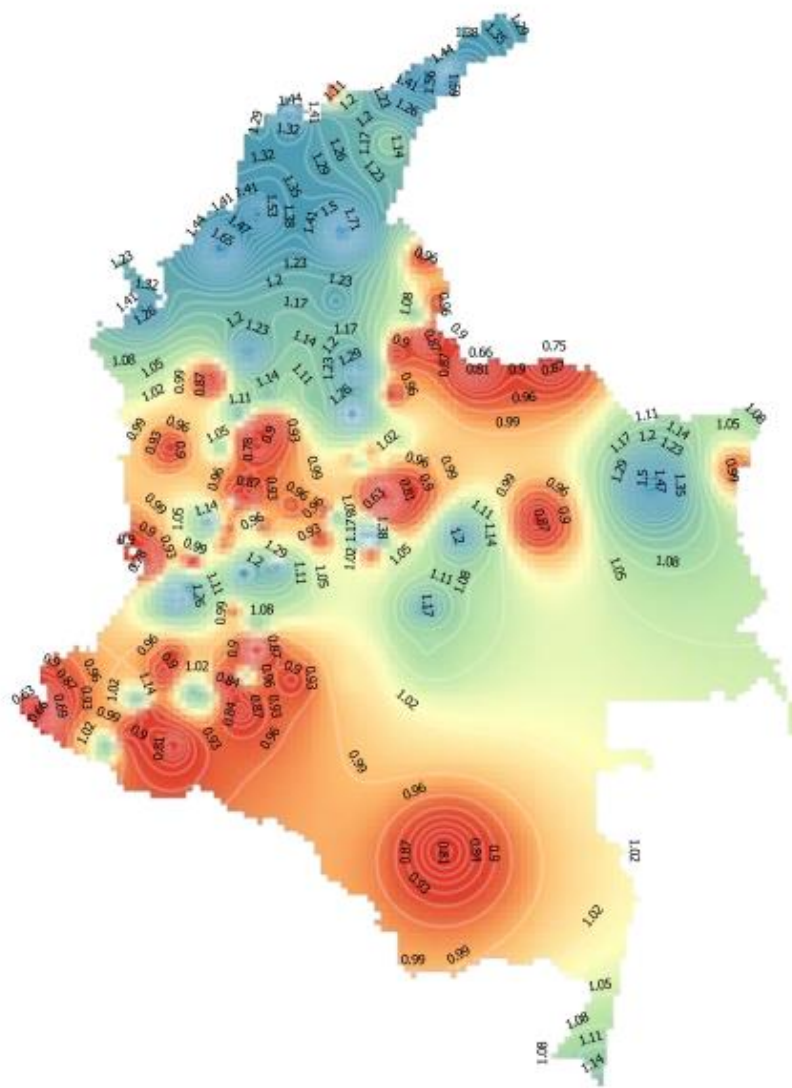
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 39. C2 Tr=2 años IDW.



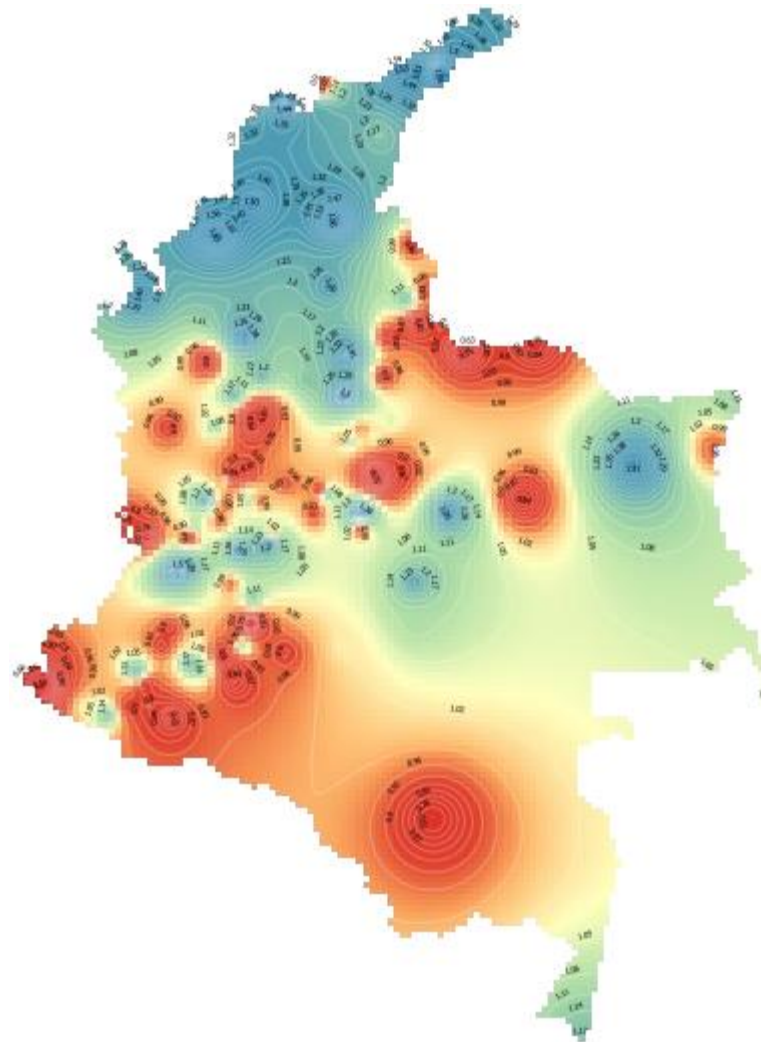
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 40. C2 Tr=50 años IDW.



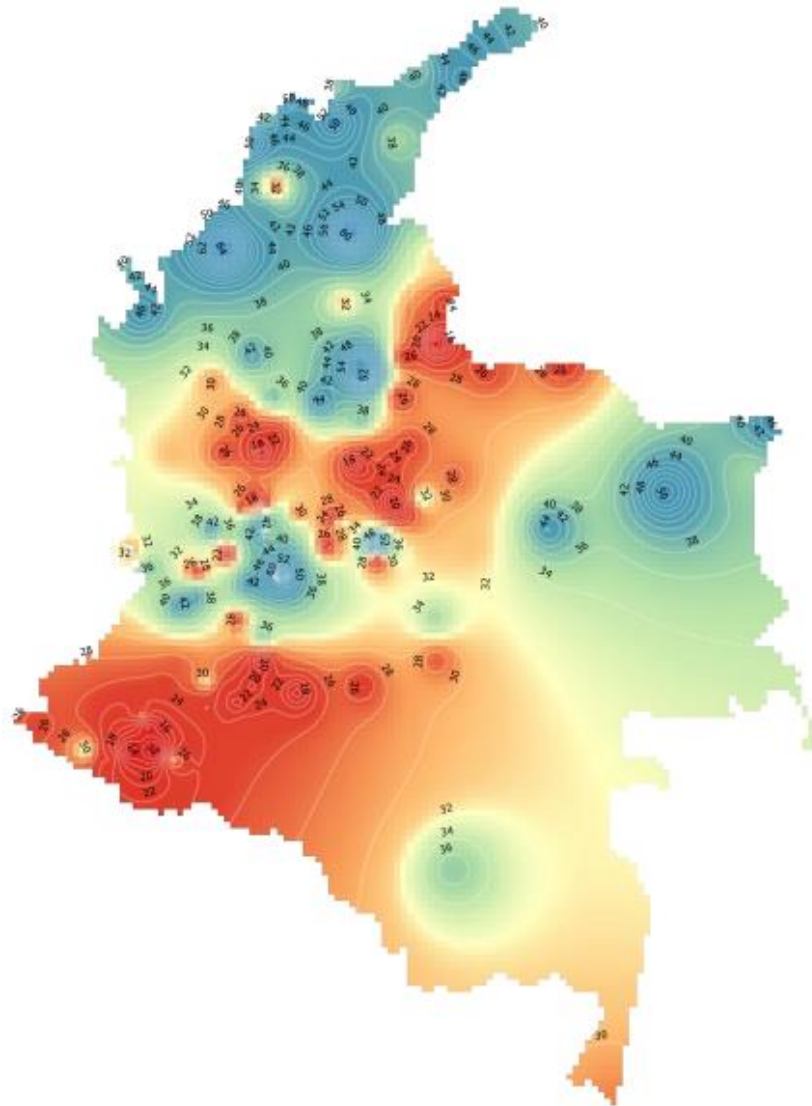
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 41. C2 Tr=100 años IDW.



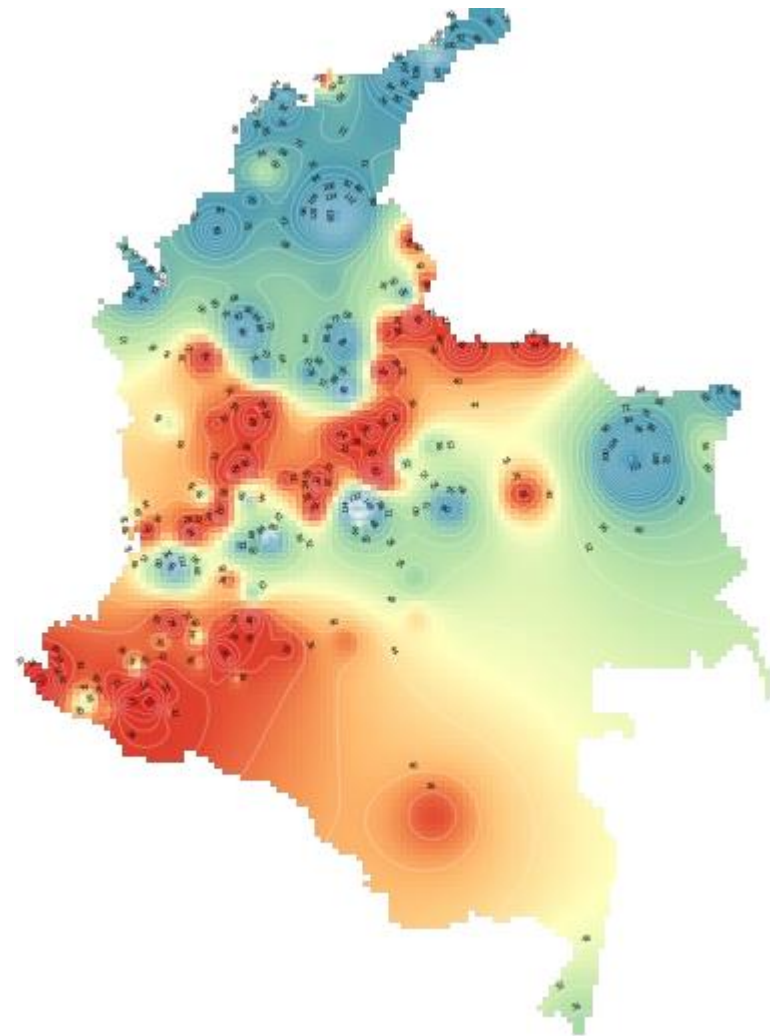
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 42. X_0 Tr=2 años IDW.



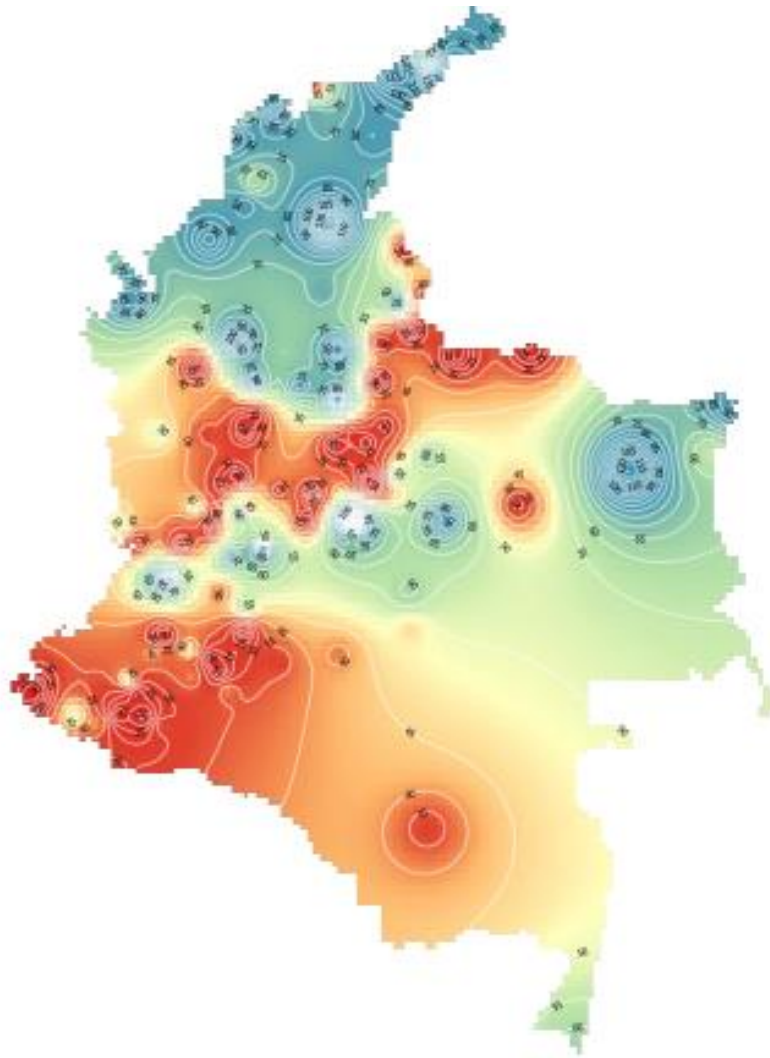
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 43. X_0 Tr=50 años IDW.



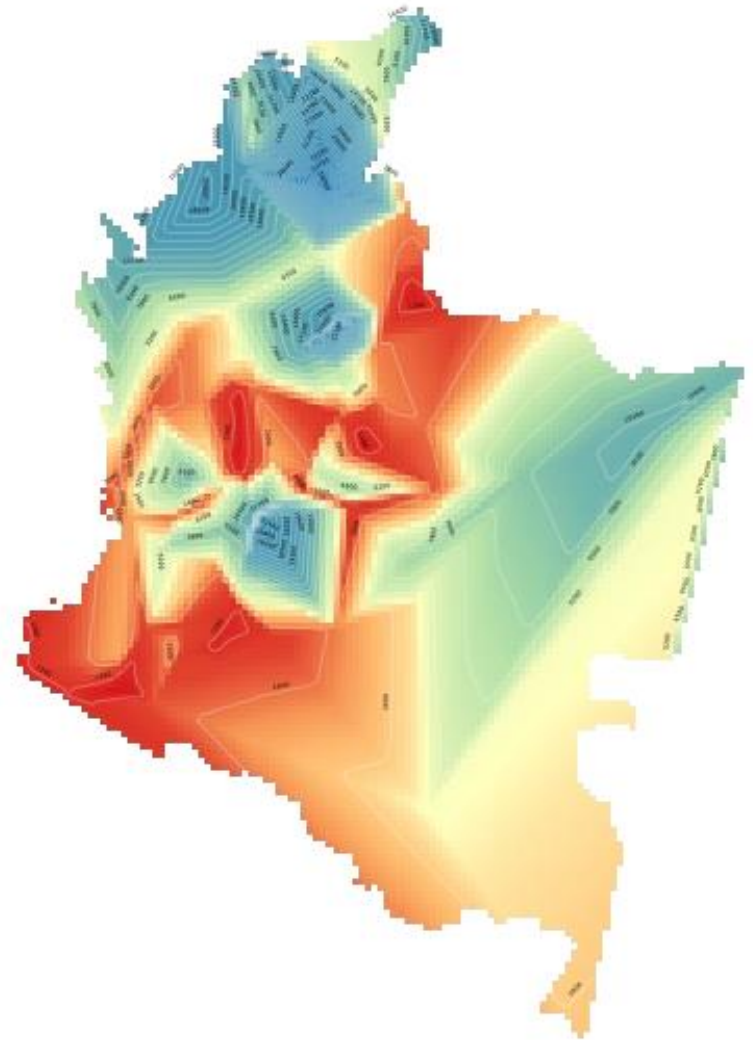
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 44. X0 Tr=100 años IDW.



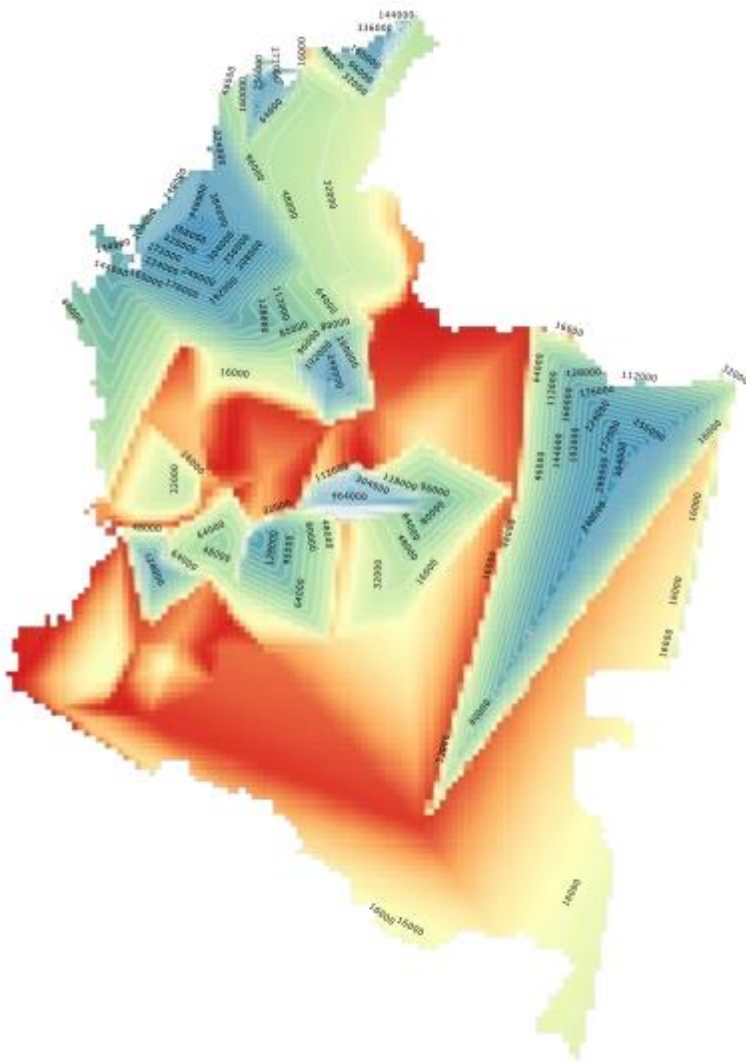
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 45. C1 Tr=2 años TIN.



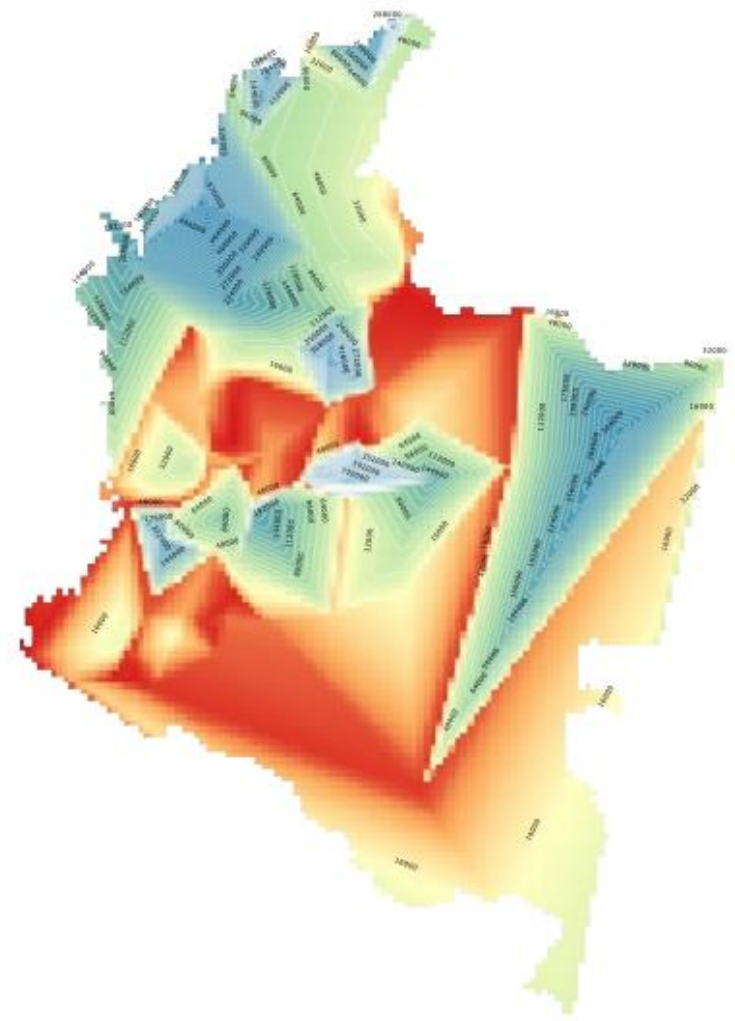
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 46. C1 $Tr=50$ años TIN.



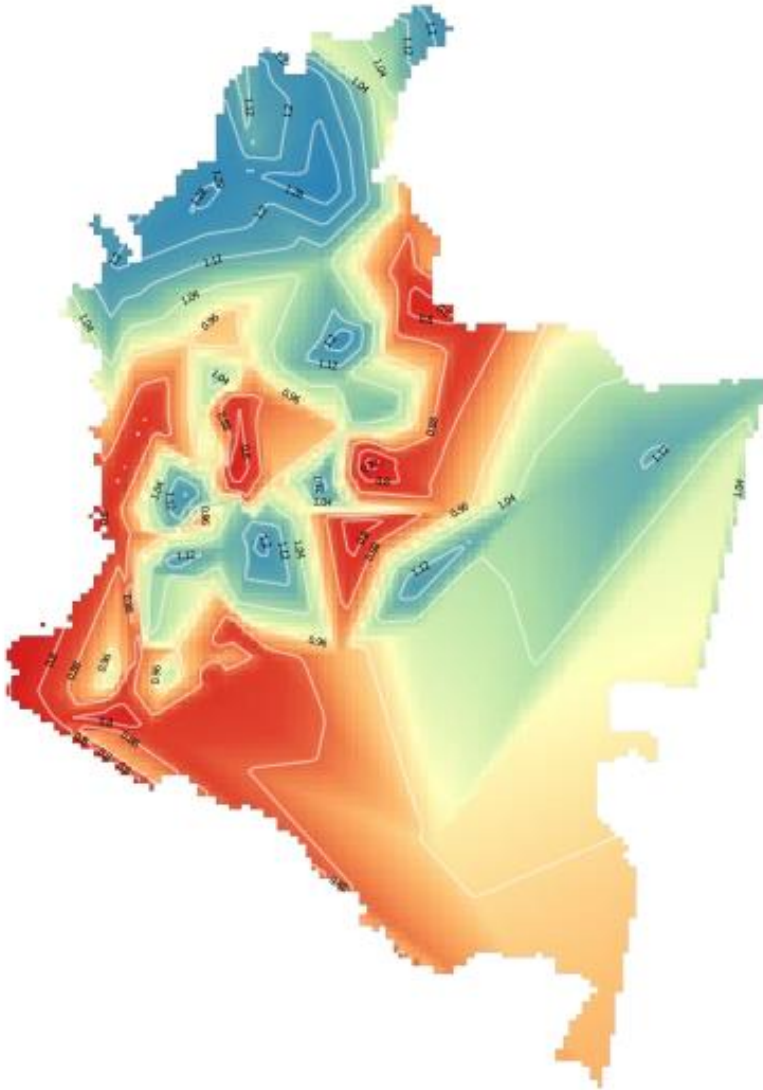
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 47. C1 $Tr=100$ años TIN.



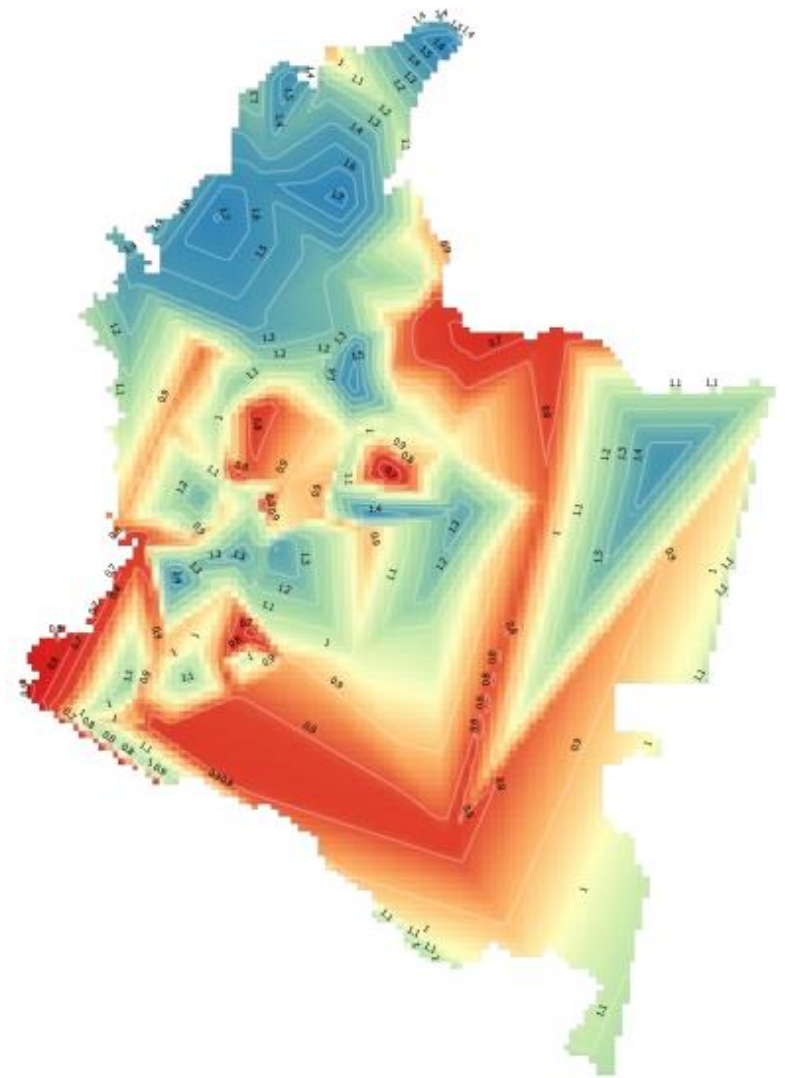
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 48. C2 Tr=2 años TIN.



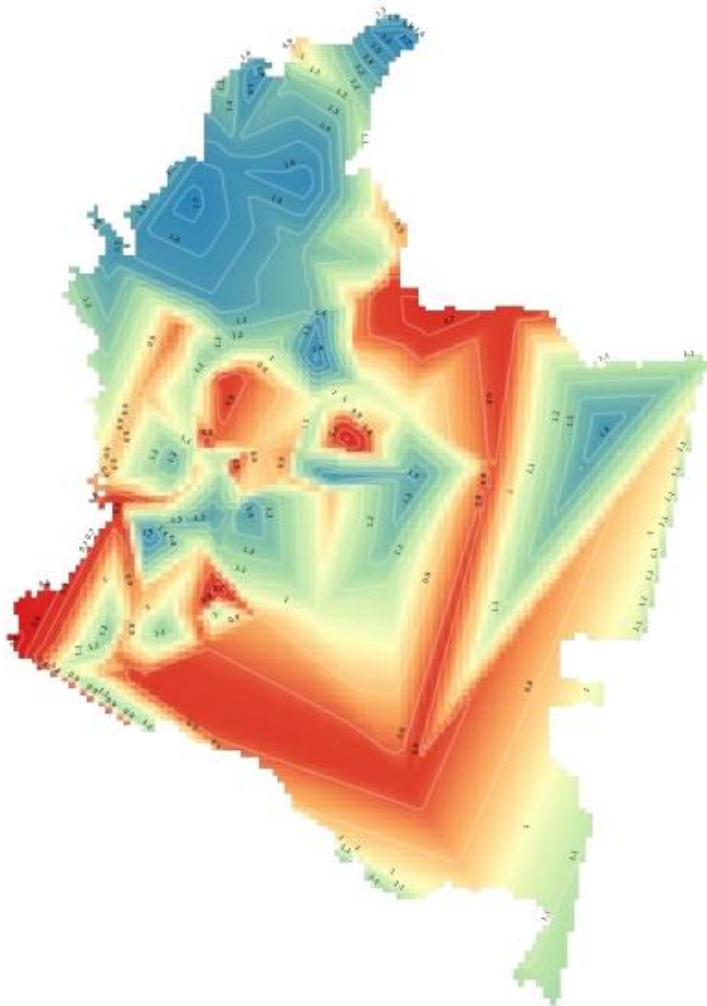
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 49. C2 Tr=50 años TIN.



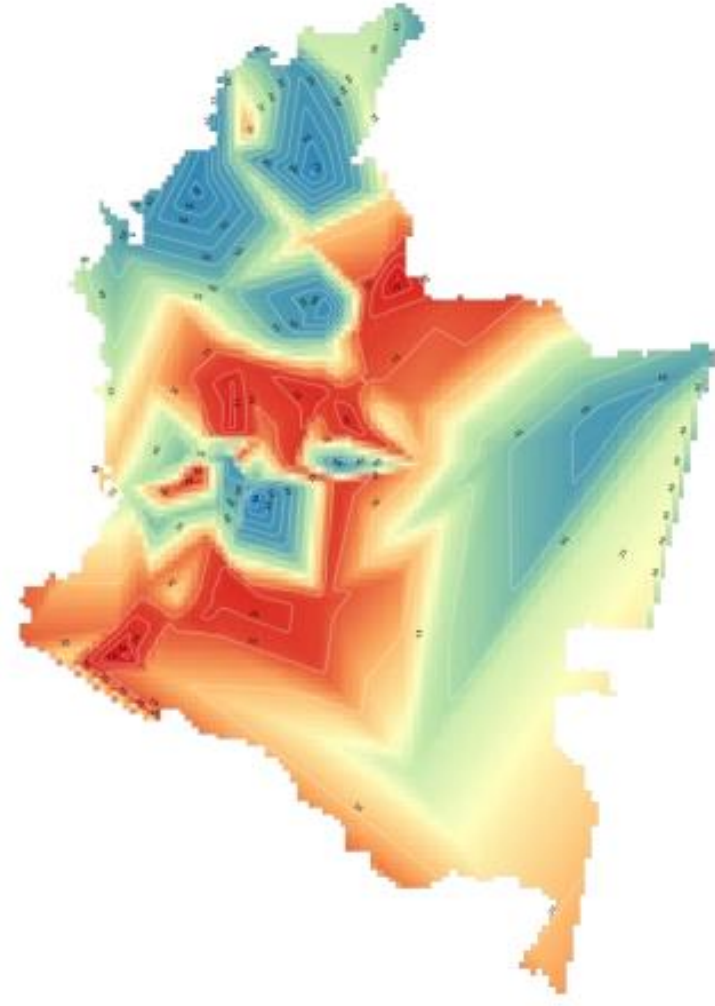
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 50. C2 Tr=100 años TIN.



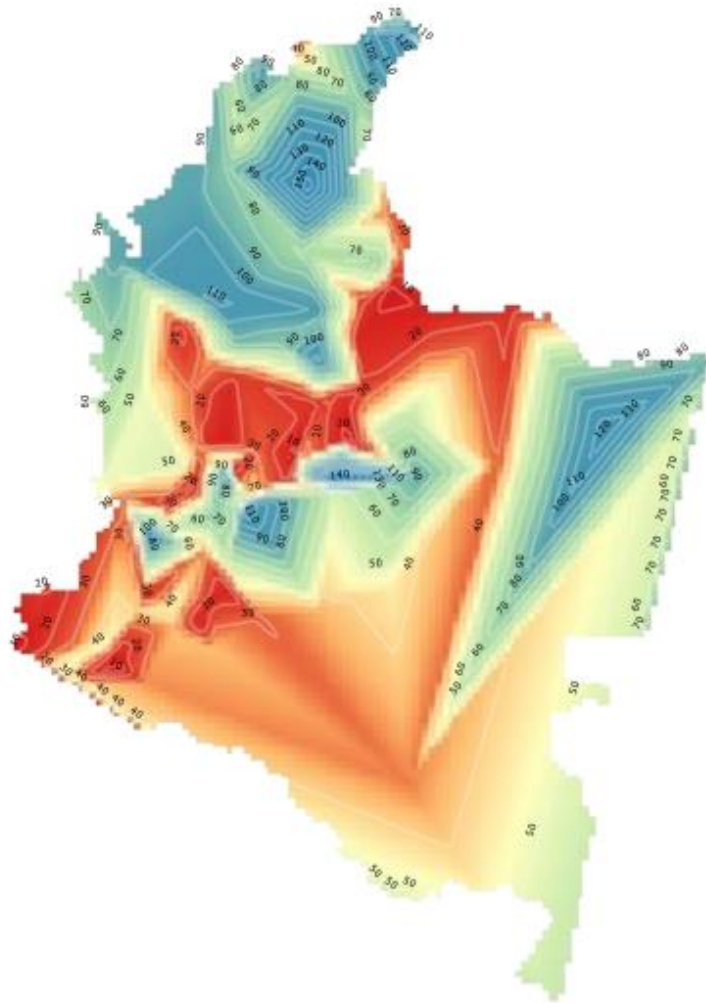
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 51. X0 Tr=2 años TIN.



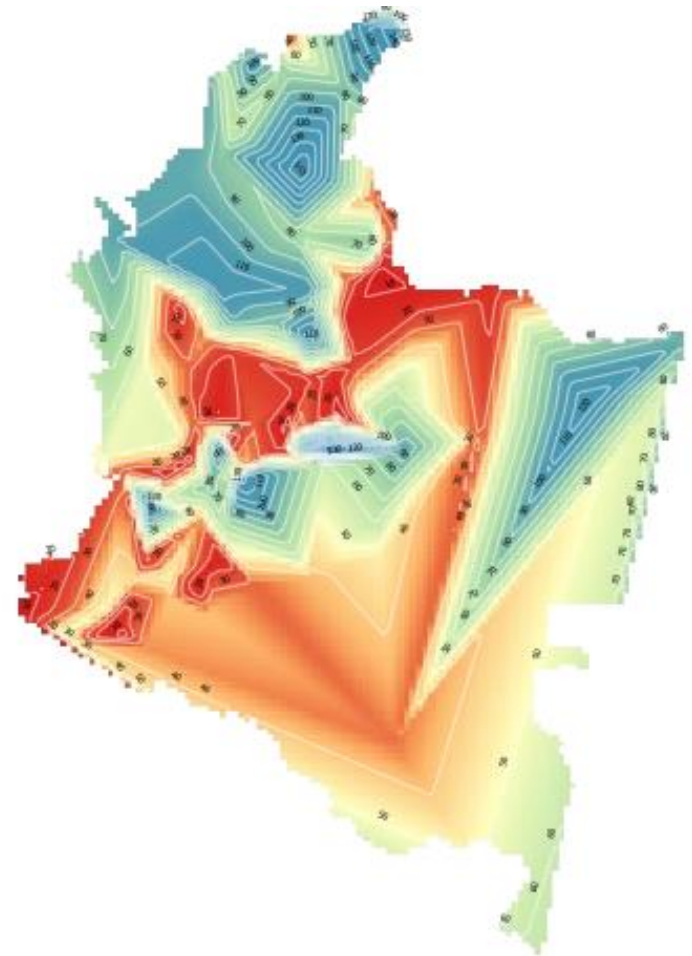
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 52. X_0 Tr=50 años TIN.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 53. X_0 Tr=100 años TIN.



Fuente: Elaboración propia

9.10 Validación cruzada

Para el desarrollo de este proyecto se realizó la interpolación espacial por el método Distancia Inversa Ponderada (IDW) y el método de redes irregulares trianguladas (TIN) tal como se mencionó anteriormente, debido a esto es necesario evaluar con cuál de los dos métodos se obtuvo mejores resultados y un mejor ajuste a los datos de estudio, para esto se aplica una técnica como lo es la Validación Cruzada.

Para cada región de Colombia se eliminó tres estaciones y posteriormente se realizó un análisis del comportamiento de los valores de los parámetros C_1 , X_0 y C_2 para periodos de retorno $Tr=2$, $Tr=50$, $Tr=100$ años respectivamente. Inicialmente, se procedió a eliminar la estación Tibú ubicada en Norte de Santander, al nororiente de la costa caribe colombiana se eliminó la estación Apto Alfonso López, de la Región Pacífico la estación Sautata en el Chocó, al este del país se eliminó la estación Apto Pto Carreño, finalmente, en el extremo sur de la Región Amazonia la estación San Vicente Caguan (*Ver ilustración 51*).

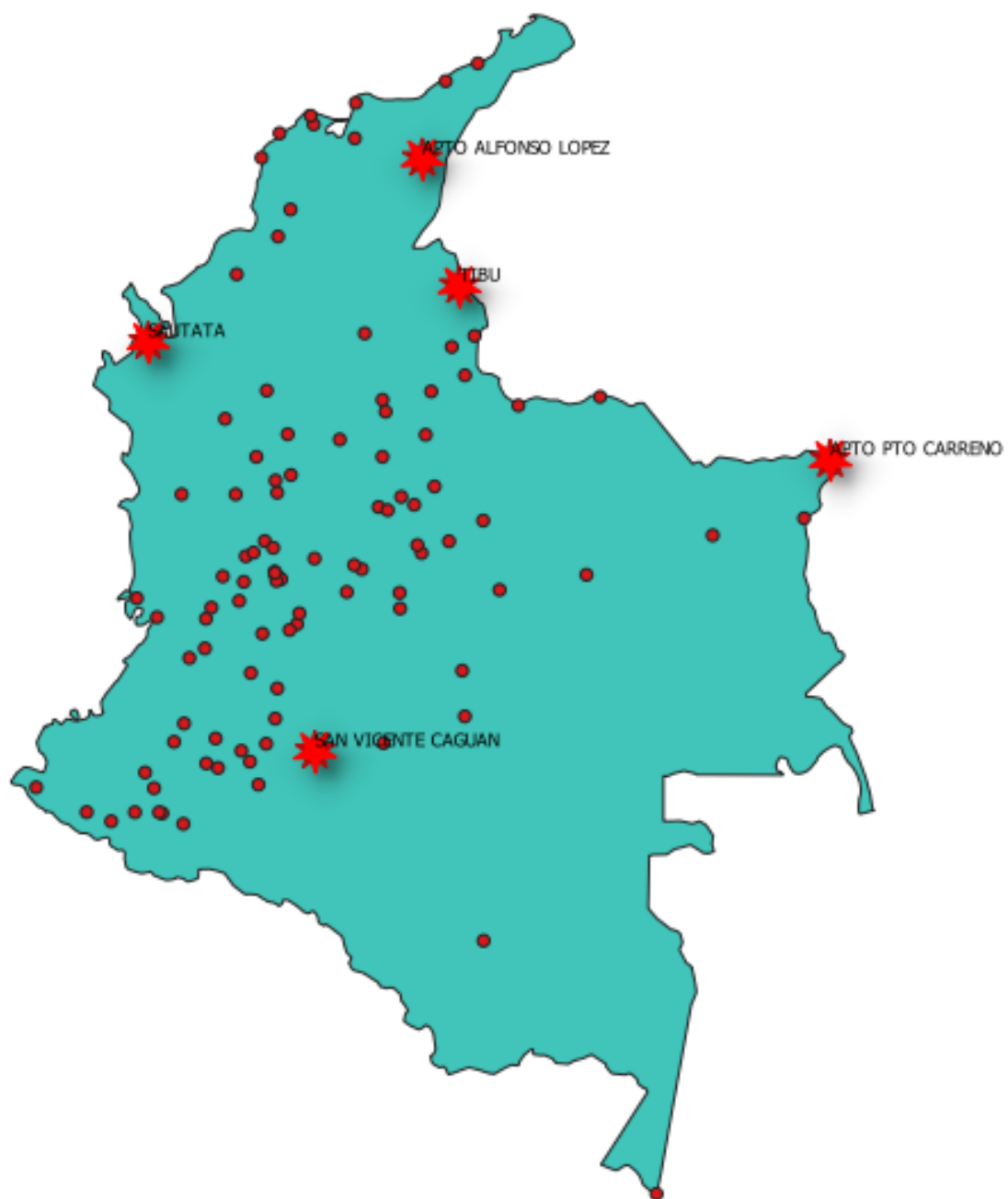
Se analizó el comportamiento de los parámetros C_1 , X_0 y C_2 para los diferentes periodos de retorno, el cambio de los valores de estos a lo largo del territorio nacional tanto por el método de interpolación IDW como el TIN, seguidamente, se procedió a incluir nuevamente estas estaciones y eliminar por región las siguientes; En el centro-oeste del país la estación el salto en Amablema-Tolima, en el norte del país la estación Sta Rosa de Simití, en la Región Pacífico la estación Granja el mira ubicada en Tumaco-Nariño, al extremo nororiental de Colombia la estación las gaviotas en Cumaribo/Vichada y al sur del país en la Región Amazonia la estación Araracuara (*Ver ilustración 52*), posteriormente, se incluyeron nuevamente las estaciones eliminadas y se procedió a eliminar la estación Algeciras al suroeste del país, la estación Mocari en la parte sur de la costa, la estación Bajo Calima en la Región Pacífico, en la Región Orinoquía la estación Apto Arauca y de la Región Amazonia la estación San José Guaviare.

De lo anterior mencionado, se obtuvo:

- La media para el parámetro C_1 con periodo de retorno de $Tr= 2$ años antes de la validación cruzada es de 5969,782, la media para este parámetro por el método IDW es de 5779,620 y por el método TIN es de 5974,750, de lo anterior mencionado se analiza que por el método IDW el parámetro C_1 $Tr=2$ años presenta mayor cercanía a la media del valor de C_1 inicial (Antes de realizar la validación cruzada). Por otro lado, observando la desviación estándar se evidencia que entre el método IDW y TIN, el método TIN presenta una mayor dispersión de los datos, obteniendo una desviación estándar de 5211,180 y por el método IDW 4983,030, analizando que por este último los datos presentan una mayor concentración. El parámetro C_1 para periodo de retorno de $Tr=50$ años, presenta una mayor dispersión de los datos por el método TIN con una desviación estándar de 126428,445 y por el método IDW presenta una desviación estándar de 117571,524. El parámetro C_1 para un periodo de retorno $Tr=100$ años y en común con los anteriores periodos de retorno estudiados, presenta una mayor dispersión de los datos por el método TIN ($\sigma =179649,918$) en comparación al método IDW ($\sigma=167145,219$). *Ver tabla 54*

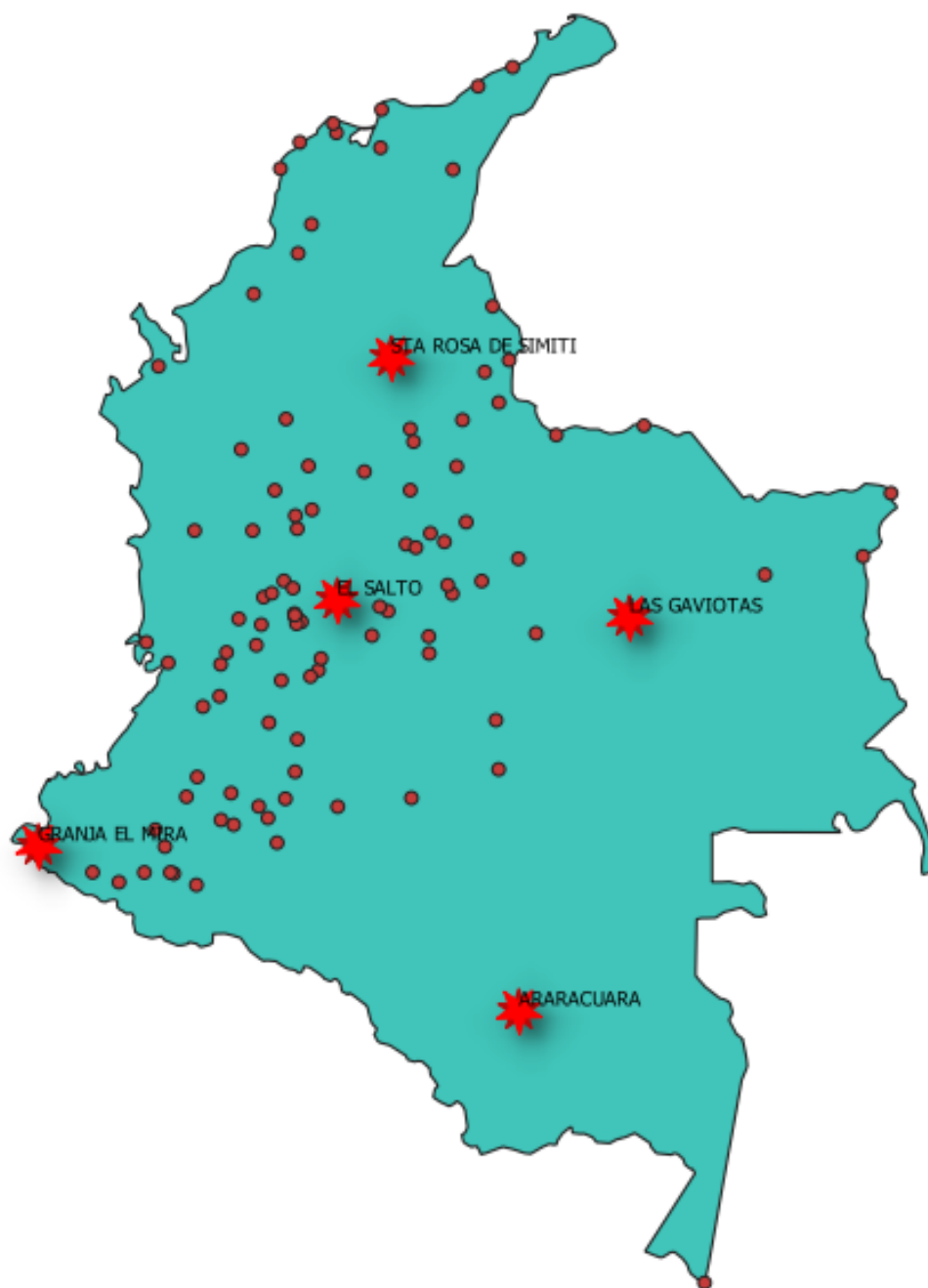
- En la tabla 55, se puede observar la diferencia entre el valor inicial del parámetro C_1 con respecto a cada periodo de retorno y método de interpolación estudiado para las 15 estaciones analizadas a nivel nacional. El parámetro C_1 con período de retorno de $Tr=2$ años presenta por el método IDW 8 estaciones con menor diferencia en valores de C_1 , en cambio, por el método TIN hay 7 estaciones que presentan menor diferencia con respecto al valor inicial de C_1 , lo que permite analizar que para este periodo de retorno el método IDW presenta mayor cercanía con respecto a los datos iniciales del parámetro. Para un periodo de retorno de $Tr=50$ años el método TIN presenta una mayor cercanía con respecto a los valores iniciales de C_1 en comparación al método IDW, en similitud a esto se encuentra el periodo de retorno de $Tr=100$ años, donde el método de interpolación espacial que presenta mayor cercanía a los valores iniciales de C_1 es el método TIN, con un total de 9 estaciones, mientras que la estación IDW presenta un total de 6 estaciones.
- El parámetro X_0 presenta una mayor dispersión de los datos por el método TIN, para un periodo de retorno de $Tr=2$ años la desviación estándar es de $\sigma=8,006$, la mayor dispersión entre los tres periodos de retorno estudiados se da en el periodo de retorno de $Tr=50$ años con una desviación estándar de 25,194. Finalmente, para un $Tr=100$ años la desviación es de $\sigma=23,486$. *Ver tabla 57*
- Analizando la tabla 58 para el parámetro X_0 se obtiene que; para un periodo de retorno $Tr=2$ años el método TIN presenta la menor diferencia de los valores de C_1 inicial a lo largo del territorio nacional, para un periodo de retorno de $Tr=50$ años y $Tr=100$ años los valores de este parámetro por el método de interpolación IDW tienen mayor cercanía con respecto a los valores iniciales.
- El parámetro C_2 para un periodo de retorno de $Tr=2$ años presenta una desviación estándar de $\sigma=0,150$, por el método de interpolación IDW presenta una dispersión del $\sigma=0,080$ y por el método TIN $\sigma=0,135$. Para un periodo de retorno $Tr=50$ años la dispersión de los datos es de 0,324, por el método IDW la desviación estándar es de $\sigma=0,128$ y por el método TIN 0,226. Finalmente, para un $Tr=100$ años la dispersión de los datos es de $\sigma=0,346$, por el método IDW $\sigma=0,129$ y por el método TIN $\sigma=0,229$. La mayor dispersión de los datos en los diferentes periodos de retorno estudiados se da por el método de interpolación espacial TIN.
- En la tabla 61 se observa la diferencia entre el valor inicial del parámetro C_2 y para cada método de estudio. Los periodos de retorno estudiados ($Tr=2$ años, $Tr=50$ años y $Tr=100$ años) presentan en común que el método TIN tiene mayor cercanía de los valores de C_2 a lo largo del territorio nacional en comparación al método IDW, lo que significa que para este parámetro el método TIN es el método de interpolación que mejor se ajustó a los datos estudiados.

Ilustración 54. Validación Cruzada 1ras estaciones.



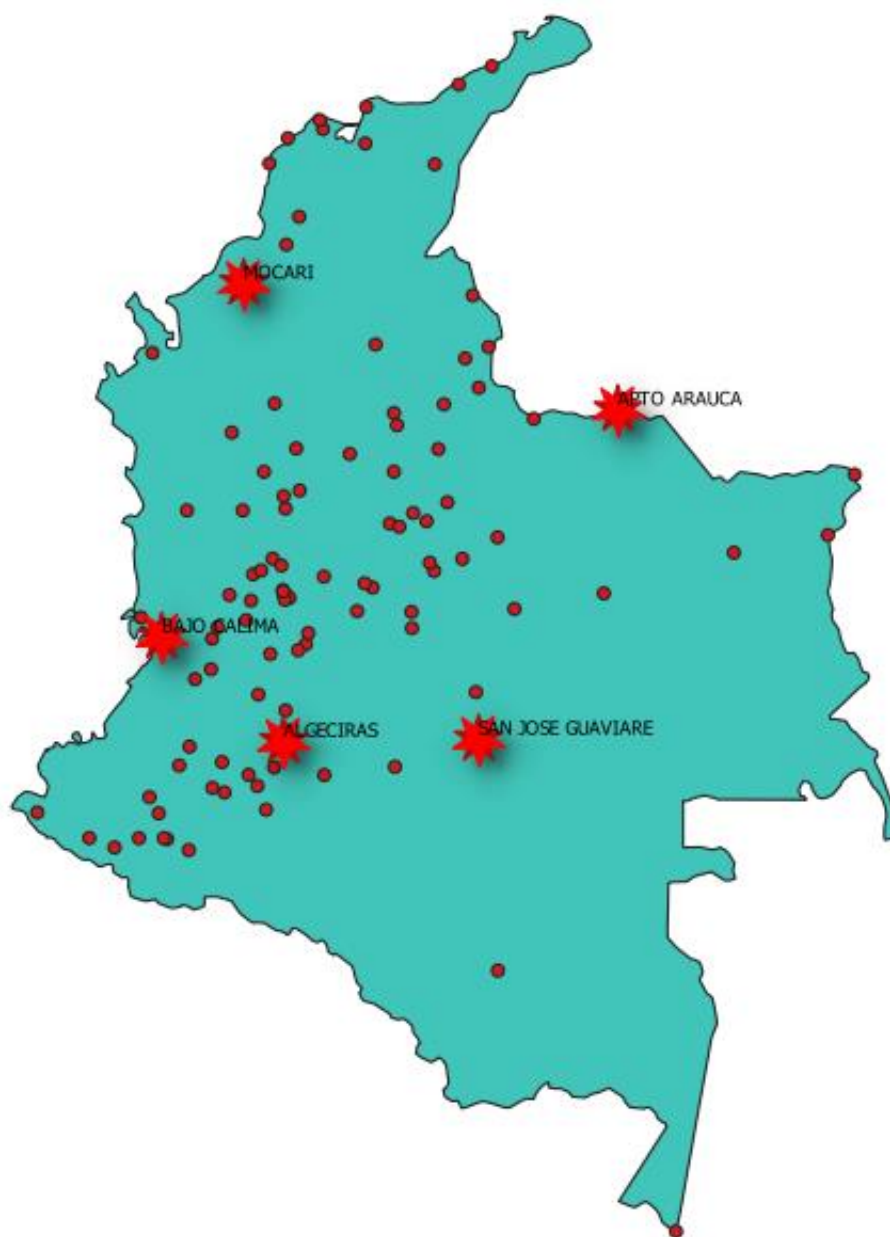
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 55. Validación Cruzada 2das estaciones.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 56. Validación Cruzada 3ras estaciones.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 53. Validación cruzada para el parámetro C1.

ESTACIONES	C ₁ Tr=2 INICIAL	C ₁ Tr =2 IDW	C ₁ Tr=2 TIN	C ₁ Tr=50 INICIAL	C ₁ Tr =50 IDW	C ₁ Tr=50 TIN	C ₁ Tr=100 INICIAL	C ₁ Tr =100 IDW	C ₁ Tr=100 TIN
Tibú	2827,490	3819,73	4214,5884	6456,128	45483,31	53584,72	7176,560	63434,773	73727,11
Apto Alfonso López	5312,2	8865,2	10246,4	23413,2	102668,4	189083,1	35451,2	140065,8	257449,9
Sautata	12095,7	6531,1	9795,5	154546,9	70559,4	177366,0	211499,2	99601,6	253542,9
Apto Pto Carreño	10109,8	5477,9	5195,9	25636,4	53115,4	11565,5	33361,4	63890,0	13434,0
San Vicente Caguán	1796,6	3761,6	1798,8	4688,4	20974,1	6502,9	5330,8	29153,5	7598,3
El salto	3399,3	3416,7	3349,4	6361,4	8730,0	6088,1	6963,6	8158,2	6823,9
Sta Rosa de Simití	5324,3	5562,4	5539,3	43291,4	43660,0	42746,3	62373,6	62989,6	61887,0
Granja el Mira	1139,8	1214,4	1181,6	604,7	995,9	1240,0	597,8	1325,7	1325,8
Las Gaviotas	8921,3	8883,9	8878,6	3763,8	4181,2	3885,8	3560,7	4071,7	3841,7
Araracuara	4682,3	4682,1	4617,8	2900,5	3198,2	2987,4	2857,5	3034,5	3257,9
Algeciras	1286,0	1539,3	1339,6	1034,7	1547,7	1428,9	1060,7	2611,8	1119,9
Mocari	21723,8	21914,5	21803,6	477248,9	466617,0	464270,3	671280,1	662324,3	660227,2
Bajo Calima	3183,6	3195,5	3449,5	2583,2	3670,8	2955,8	2586,6	3886,5	3627,5
Apto Arauca	3474,8	3542,6	3622,2	1896,8	1902,2	1937,0	1850,2	1975,8	1988,3
San José Guaviare	4269,8	4287,3	4588,4	14504,0	15184,2	15459,0	16992,5	18393,7	16729,7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 54. Análisis estadístico de la validación cruzada para el parámetro C1.

PARÁMETRO	MEDIA	VARIANZA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR σ
C ₁ Tr=2 INICIAL	5969,782	29293951,432	5412,389
C ₁ Tr =2 IDW VALIDACIÓN CRUZADA	5779,620	24830591,214	4983,030
C ₁ Tr=2 TIN VALIDACIÓN CRUZADA	5974,750	27156400,326	5211,180
C ₁ Tr=50 INICIAL	51262,042	15404473024,677	124114,757
C ₁ Tr =50 IDW VALIDACIÓN CRUZADA	56165,850	13823063285,408	117571,524
C ₁ Tr=50 TIN VALIDACIÓN CRUZADA	65406,717	15984151734,960	126428,445
C ₁ Tr=100 INICIAL	70862,832	30481110799,589	174588,404
C ₁ Tr =100 IDW VALIDACIÓN CRUZADA	77661,155	27937524118,948	167145,219
C ₁ Tr=100 TIN VALIDACIÓN CRUZADA	91105,411	32274092873,025	179649,918

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 55. Diferencia en % entre el valor inicial del parámetro C1 y cada método analizado.

ESTACIONES	C ₁ TR 2		C ₁ TR 50		C ₁ TR 100	
	IDW [%]	TIN [%]	IDW [%]	TIN [%]	IDW [%]	TIN [%]
Tibú	-35,093	-49,058	-604,498	-729,982	-783,916	-927,332
Aeropuerto Alfonso López	-66,885	-92,886	-338,506	-707,591	-295,095	-626,210
Sautata	46,005	19,017	54,344	-14,765	52,907	-19,879
Aeropuerto Pto Carreño	45,816	48,605	-107,187	54,886	-91,509	59,732
San Vicente del Caguán	-109,374	-0,121	-347,360	-38,701	-446,884	-42,534
El salto	-0,512	1,468	-37,234	4,296	-17,154	2,006
Sta Rosa de Simití	-4,472	-4,038	-0,852	1,259	-0,988	0,780
Granja el Mira	-6,541	-3,671	-64,679	-105,050	-121,752	-121,773
Las Gaviotas	0,419	0,480	-11,090	-3,241	-14,350	-7,892
Aracacuara	0,004	1,376	-10,261	-2,996	-6,192	-14,012
Algeciras	-19,695	-4,168	-49,584	-38,103	-146,232	-5,581
Mocarí	-0,878	-0,368	2,228	2,719	1,334	1,647
Bajo Calima	-0,374	-8,354	-42,101	-14,422	-50,257	-40,243
Aeropuerto Arauca	-1,950	-4,241	-0,284	-2,119	-6,785	-7,463
San José del Guaviare	-0,411	-7,462	-4,690	-6,584	-8,246	1,546

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 56. Validación cruzada para el parámetro X0.

ESTACIONES	X ₀ Tr=2 INICIAL	X ₀ Tr =2 IDW	X ₀ Tr=2 TIN	X ₀ Tr=50 INICIAL	X ₀ Tr =50 IDW	X ₀ Tr=50 TIN	X ₀ Tr=100 INICIAL	X ₀ Tr =100 IDW	X ₀ Tr=100 TIN
Tibú	31,34	30,86	27,49	29,59	48,23	43,59	29,28	51,89	51,9
Aeropuerto Alfonso López	35,97	40,01	37,96	74,72	67,25	87,71	85,18	71,21	98,93
Sautata	47,77	35,89	45,83	94,41	51,65	64,84	100,05	54,88	66,1
Aeropuerto Pto Carreño	47,82	34,99	37,02	86,11	53,87	52,54	95,32	55,99	54,02
San Vicente del Caguán	16,65	27,67	23,52	29,34	39,14	32,66	30,97	37,41	38,07
El salto	28,58	28,81	28,51	28,76	44,86	7,76	28,89	27,38	16,18
Sta Rosa de Simití	30,55	35,91	43,92	68,06	55,56	77,79	74,89	56,38	74,54
Granja el Mira	25,37	27,45	30,86	6,66	38,4	46,72	5,17	39,68	51,4
Las Gaviotas	44,35	31,31	38,32	30,12	52,83	94,62	28,74	55,39	90,37
Araracuara	37,03	30,26	27,43	32,5	44,76	50,47	32,29	46,87	51,11
Algeciras	16,17	26,57	22,28	10,2	37,87	48,76	9,79	25,42	41,76
Mocarí	73,13	36,25	48,21	95,9	59,42	90,66	98,14	62,79	92,28
Bajo Calima	37,65	30,59	31,79	28,18	45,97	47,93	27,19	45,32	65,33
Aeropuerto Arauca	23,44	28,72	27,88	14,91	36,93	18,73	14,18	35,2	28,45
San José del Guaviare	26,83	33,02	33,12	44,11	52,3	54,97	46,23	53,75	55,49

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 57. Análisis estadístico de la validación cruzada para el parámetro X0.

PARÁMETRO	MEDIA	VARIANZA	DESVIACIÓN ESTANDÁR σ
X ₀ Tr=2 INICIAL	34,843	209,949	14,490
X ₀ Tr =2 IDW VALIDACIÓN CRUZADA	31,887	15,650	3,956
X ₀ Tr=2 TIN VALIDACIÓN CRUZADA	33,609	64,093	8,006
X ₀ Tr=50 INICIAL	44,905	937,951	30,626
X ₀ Tr =50 IDW VALIDACIÓN CRUZADA	48,603	75,903	8,712
X ₀ Tr=50 TIN VALIDACIÓN CRUZADA	54,650	634,725	25,194
X ₀ Tr=100 INICIAL	47,087	1146,652	33,862
X ₀ Tr =100 IDW VALIDACIÓN CRUZADA	47,971	166,454	12,902
X ₀ Tr=100 TIN VALIDACIÓN CRUZADA	58,395	551,586	23,486

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 58. Diferencia en % entre el valor inicial del parámetro X0 y cada método analizado.

ESTACIONES	X ₀ TR 2		X ₀ TR 50		X ₀ TR 100	
	IDW	TIN	IDW	TIN	IDW	TIN
Tibú	1,532	12,285	-62,994	-47,313	-77,220	-77,254
Aeropuerto Alfonso López	-11,232	-5,532	9,997	-17,385	16,401	-16,142
Sautata	24,869	4,061	45,292	31,321	45,147	33,933
Aeropuerto Pto Carreño	26,830	22,585	37,440	38,985	41,261	43,328
San Vicente del Caguán	-66,186	-41,261	-33,401	-11,316	-20,794	-22,925
El salto	-0,805	0,245	-55,981	73,018	5,227	43,994
Sta Rosa de Simití	-17,545	-43,764	18,366	-14,296	24,716	0,467
Granja el Mira	-8,199	-21,640	-476,577	-601,502	-667,505	-894,197
Las Gaviotas	29,402	13,596	-75,398	-214,143	-92,728	-214,440
Araracuara	18,282	25,925	-37,723	-55,292	-45,153	-58,284
Algeciras	-64,317	-37,786	-271,275	-378,039	-159,653	-326,558
Mocarí	50,431	34,076	38,040	5,464	36,020	5,971
Bajo Calima	18,752	15,564	-63,130	-70,085	-66,679	-140,272
Aeropuerto Arauca	-22,526	-18,942	-147,686	-25,620	-148,237	-100,635

San José del Guaviare	-23,071	-23,444	-18,567	-24,620	-16,266	-20,030
-----------------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 59. Validación cruzada para el parámetro C2.

ESTACIONES	C ₂ Tr=2 INICIAL	C ₂ Tr =2 IDW	C ₂ Tr=2 TIN	C ₂ Tr=50 INICIAL	C ₂ Tr =50 IDW	C ₂ Tr=50 TIN	C ₂ Tr=100 INICIAL	C ₂ Tr =100 IDW	C ₂ Tr=100 TIN
Tibú	0,893	0,899	0,894	0,9	0,906	0,903	0,9	0,907	0,905
Aeropuerto Alfonso López	1,015	1,059	1,099	1,118	1,245	1,222	1,166	1,187	1,188
Sautata	1,205	1,169	1,2	1,434	1,374	1,461	1,463	1,4	1,503
Aeropuerto Pto Carreño	1,082	1,078	1,08	1,092	1,091	1,097	1,115	1,113	1,114
San Vicente del Caguán	0,838	0,888	0,913	0,883	0,921	0,82	0,889	0,967	0,883
El salto	0,949	0,966	0,985	0,917	0,983	0,931	0,915	1,000	0,888
Sta Rosa de Simití	1,065	1,007	1,003	1,277	1,12	1,22	1,318	1,135	1,03
Granja el Mira	0,717	0,876	0,719	0,477	1,002	0,967	0,458	1,016	0,771
Las Gaviotas	1,065	0,969	1,072	0,813	1,063	1,363	0,788	1,072	1,063
Aracuara	0,969	0,957	0,962	0,768	1,028	1,055	0,749	1,037	0,96
Algeciras	0,824	0,981	0,962	0,636	1,033	1,203	0,622	1,112	0,943
Mocarí	1,293	1,046	1,229	1,72	1,17	1,46	1,764	1,189	1,458
Bajo Calima	0,853	0,94	0,854	0,727	0,956	0,884	0,714	0,925	0,889
Aeropuerto Arauca	0,959	0,915	0,875	0,734	0,934	0,733	0,714	0,952	0,719
San José del Guaviare	1,011	0,997	1,049	1,082	1,044	1,07	1,091	1,152	1,235

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 60. Análisis estadístico de la validación cruzada para el parámetro C2.

PARÁMETRO	MEDIA	VARIANZA	DESVIACIÓN ESTANDÁR σ
C ₂ Tr=2 INICIAL	0,983	0,022	0,150
C ₂ Tr =2 IDW VALIDACIÓN CRUZADA	0,983	0,006	0,080
C ₂ Tr=2 TIN VALIDACIÓN CRUZADA	0,993	0,018	0,135
C ₂ Tr=50 INICIAL	0,972	0,105	0,324
C ₂ Tr =50 IDW VALIDACIÓN CRUZADA	1,058	0,016	0,128
C ₂ Tr=50 TIN VALIDACIÓN CRUZADA	1,093	0,051	0,226
C ₂ Tr=100 INICIAL	0,978	0,120	0,346
C ₂ Tr =100 IDW VALIDACIÓN CRUZADA	1,078	0,017	0,129
C ₂ Tr=100 TIN VALIDACIÓN CRUZADA	1,037	0,052	0,229

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 61. Diferencia en % entre el valor inicial del parámetro C2 y cada método analizado.

ESTACIONES	C ₂ TR 2		C ₂ TR 50		C ₂ TR 100	
	IDW	TIN	IDW	TIN	IDW	TIN
Tibú	-0,672	-0,112	-0,667	-0,333	-0,778	-0,556
Aeropuerto Alfonso López	-4,335	-8,276	-11,360	-9,302	-1,801	-1,887
Sautata	2,988	0,415	4,184	-1,883	4,306	-2,734
Aeropuerto Pto Carreño	0,370	0,185	0,092	-0,458	0,179	0,090
San Vicente del Caguán	-5,967	-8,950	-4,304	7,135	-8,774	0,675
El salto	-1,791	-3,793	-7,197	-1,527	-9,290	2,951
Sta Rosa de Simití	5,446	5,822	12,294	4,464	13,885	21,851
Granja el Mira	-22,176	-0,279	-110,063	-102,725	-121,834	-68,341
Las Gaviotas	9,014	-0,657	-30,750	-67,651	-36,041	-34,898
Araracuara	1,238	0,722	-33,854	-37,370	-38,451	-28,171
Algeciras	-19,053	-16,748	-62,421	-89,151	-78,778	-51,608
Mocarí	19,103	4,950	31,977	15,116	32,596	17,347
Bajo Calima	-10,199	-0,117	-31,499	-21,596	-29,552	-24,510
Aeropuerto Arauca	4,588	8,759	-27,248	0,136	-33,333	-0,700
San José del Guaviare	1,385	-3,759	3,512	1,109	-5,591	-13,199

Fuente: Elaboración propia.

10. CONCLUSIONES

En Colombia diferentes autores como Mario Díaz Granados, Rodrigo Vargas, la Universidad de Pamplona, entre otros, han estudiado diferentes metodologías de creación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), evaluando diferentes ecuaciones de Intensidad para un posterior análisis, sin embargo estas ecuaciones se basan en diferentes coeficientes o parámetros como; Intensidad media, Tiempo de retorno, Duración, Valor máximo anual de precipitación diaria, Promedio del número de días con lluvia al año, Precipitación media anual, Elevación sobre el nivel del mar, Constantes que dependen del sitio, entre otras más, así mismo, estas ecuaciones pueden estar ajustadas a diferentes métodos de distribución de probabilidad, y a diferentes métodos de estimación de los parámetros.

No obstante, el desarrollo de este proyecto se basó en las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) desarrolladas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), las cuales se basan en tres parámetros para la ecuación generalizada de Intensidades, parámetros de estudio en esta investigación; C_1 , X_0 , C_2 . Según la ecuación de Intensidad, C_1 es el parámetro que está relacionado directamente con los valores de precipitación, lo anterior se determinó de manera empírica debido a la ubicación de este en la ecuación mencionada anteriormente, de igual manera cada parámetro de interés (C_1 , X_0 , C_2) se ajusta a la ecuación de forma matemática, lo cual quiere decir que no están físicamente basados, en otras palabras no se presenta una variación física sino matemática, en la cual un cambio físico no obedece a un cambio en la precipitación.

Como consecuencia de esto, a medida que este parámetro aumenta o disminuye los valores de la intensidad aumentan o disminuyen de la misma manera, en caso contrario sucede con los parámetros X_0 y C_2 donde presentan un comportamiento inversamente proporcional con los valores de precipitación, en relación a esto y con base al quinto informe basado en las metodologías propuestas por el panel intergubernamental del cambio climático, y analizando el comportamiento de C_1 con la influencia del cambio climático se obtuvo que la Región Andina presentará para el periodo 2011-2100 aumentos de la precipitación entre 10-40% , en la Región Caribe, Región Amazonia, Región Orinoquía se evidencia un comportamiento con valores negativos, lo que significa que las lluvias en esta parte del país presentarán una disminución en la precipitación, se destaca el departamento Archipiélago de San Andrés , Providencia y Santa Catalina el cual presenta valores alrededor del 33%, siendo el valor más bajo registrado en la Región Caribe. La Región Pacífico presenta un comportamiento variable; En el departamento del Chocó se obtuvo una disminución entre -2% y -6% en los valores de precipitación para el periodo de análisis (2011-2100), por otro lado, para los departamentos del Valle del Cauca, Cauca y Nariño se obtuvo valores sólo de aumento entre 4%-17% para la precipitación en el periodo de análisis. Es importante mencionar que la Región Amazonia y la Región Orinoquía a pesar de que se obtuvo valores en disminución de la precipitación tal como se mencionó anteriormente, estas presentan una homogeneidad a lo largo de toda la región, es decir, se obtuvo porcentajes similares, en el mismo rango.

Los valores mencionados anteriormente se pueden considerar relativamente altos, si se realiza el análisis de manera independiente, es decir, analizar la afectación en relación al aumento o disminución de la precipitación en diferentes periodos pero por cada departamento, caso contrario sucede cuando el análisis se realiza de manera general, agrupando los resultados en las cinco regiones base de este documento, como consecuencia de esto se obtienen comportamientos similares a lo largo de toda la región, esto se debe a que en una misma región se presentan valores en aumento o disminución de la precipitación, por ejemplo, en la región Andina, los departamentos de Atlántico y Boyacá, presentan valores similares entre el 7 y 10 %, la diferencia radica en que una región presenta valores en aumento y otra en disminución respectivamente, lo anterior genera un equilibrio o comportamiento tenue en los valores de intensidad determinados, es por esto que las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) no se ven directamente afectadas. Otra explicación a este comportamiento está relacionada con el parámetro de afectación, si bien es cierto que C_1 posee alta relación con los valores de las intensidades, también lo es que este parámetro presenta dependencia los parámetros X_0 , C_2 y la duración del fenómeno, lo cual indica que la intensidad no se está afectando directamente. En este orden de ideas, si hay una afectación de las curvas IDF, pero no es muy significativa, en otros términos, no hay un cambio drástico de la curva IDF debido al cambio climático.

Por otro lado, para conocer un poco más de estos parámetros fue necesario elaborar un análisis de sensibilidad que diera un indicio de dependencia, comportamiento de estos en las curvas IDF, para esto se observó cómo se corría la curva al aumentar en un 5% los valores del parámetro C_1 , X_0 y C_2 de las 108 curvas distribuidas en las cinco regiones de estudio, como resultado a esto se encontró que los parámetros C_1 y X_0 presentan variación de manera vertical ascendente y descendente respectivamente, es importante nombrar que el traslado de la curva es poco perceptible, por otro lado, el parámetro C_2 presentó una variación vertical descendente pero de manera drástica y muy notoria.

Se agruparon en cinco regiones las 108 estaciones meteorológicas de estudio para esta investigación. Como resultado del análisis estadístico de los valores de los parámetros C_1 , X_0 y C_2 se obtuvo que el parámetro C_1 y X_0 presenta los mayores valores en la Región Orinoquía específicamente en el departamento del Meta, por otro lado, el parámetro C_2 obtuvo valores mayores en el departamento de Córdoba en la Región Caribe, al norte del país. Esto coincide con la interpolación espacial realizada tanto por el método TIN como IDW en los periodos de retorno evaluados $Tr=2$, $Tr=50$, $Tr=100$, es posible afirmar esto debido a los mapas generados a partir de las interpolaciones realizadas, donde en la escala de colores utilizadas en los mapas se observa un predominio del color Verde-Azul a lo largo del Norte y Este del país específicamente en la Región Caribe y Orinoquía, permitiendo que en cualquier punto localizado en estas zonas registren valores altos de estos parámetros, estas regiones presentaron un comportamiento notablemente homogéneo a lo largo de su territorio, esto es común por los dos métodos realizado, tanto por el método de interpolación espacial IDW como por el método TIN.

Una vez finalizado lo anterior mencionado se procedió a realizar los cálculos del Promedio, Variación y Desviación estándar para las cinco regiones de estudio a lo largo del país, se encontró que los parámetros C_1 , X_0 y C_2 para la Región Andina, Región Caribe, Región Pacífico, Región Orinoquía y Región Amazonia presentan en común una mayor dispersión de los datos para un periodo de retorno de $Tr=100$ años, por el contrario, presenta una mayor concentración de sus valores para un periodo de retorno de $Tr=2$ años. Comparando entre regiones los valores de desviación se obtuvo que la mayor dispersión de los valores del parámetro C_1 se presentan en la Región Orinoquía para un periodo de retorno $Tr=100$

años con una desviación de $\sigma=259949,3844$, en cambio se obtuvo una mayor concentración de los valores de C_1 en la Región Amazonia para un Tr de 2 años con una desviación $1672,58967$.

Para el parámetro X_0 se obtuvo una mayor dispersión de sus valores en la Región Orinoquía para un periodo de retorno $Tr=100$ años con una desviación de $\sigma=57,56802971$, por el contrario, la menor dispersión de los datos se observa en la Región Amazonia para un Tr de 2 años con una desviación estándar de $\sigma=10,47107721$. Finalmente, el parámetro C_2 obtuvo valores más dispersos en la Región Caribe para un periodo de retorno de $Tr=100$ años con una desviación estándar de $\sigma= 0,530363111$, y una mejor concentración de los valores de C_2 en la Región Amazonia $Tr=2$ años.

La espacialización realizada para los tres parámetros evaluados en los periodos de retorno $Tr=50$ y $Tr=100$ años presentan gran similitud en la distribución de colores y forma del mapa a lo largo del territorio nacional, esto se evidenció en los dos métodos de estudio. Es por esto que fue necesario la aplicación de una técnica que permitiera validar los métodos y definir cuál de los dos se ajustaba mejor a los datos analizados, a causa de esto se aplicó la validación cruzada en la cual se obtuvo que para el parámetro C_1 el método de mejor ajuste es el método de interpolación TIN para los periodos de retorno $Tr=50$ y $Tr=100$ años, para el periodo de retorno $Tr=2$ años el método que mejor se ajustó fue el método IDW. Caso contrario, sucede con el parámetro X_0 , ya que en este el método que mejor se ajusta para los periodos de retorno de $Tr=50$ y $Tr=100$ años es IDW, y para el periodo de retorno $Tr=2$ años es el método TIN.

Finalmente, el parámetro C_2 para los tres periodos analizados, se encontró que el método que mejor se ajusta es TIN. En este orden de ideas, se concluye que el método de mejor ajuste a los datos de estudio en el desarrollo de esta investigación fue el método de redes irregulares trianguladas (TIN).

11. RECOMENDACIONES

Para próximos proyectos y nuevas oportunidades de investigación relacionadas con la temática descrita en este documento se recomienda:

- Dentro de las metodologías de interpolación a implementar se consideró inicialmente el método de Kriging como una alternativa en conjunto con los métodos IDW y TIN, sin embargo, al momento de realizar los mapas en el software de QGIS se presentaron diversos problemas en la legibilidad y ejecución de estos, es por esto por lo que no se recomienda emplear este método para realizar interpolaciones similares a las planteadas en este documento, o desarrollarlo en un software como ArcMap.
- El método de interpolación que mejor se ajusta a los datos es el método del TIN, sin embargo, se recomienda realizar un análisis antes de implementar este método para proyectos similares, ya que él debido a su metodología de polígonos, puede despreciar gran parte de los datos.
- Se recomienda considerar únicamente el parámetro de precipitación para posteriores análisis, es posible afirmar esto debido a que la investigación realizada en relación con el cambio climático demostró que la afectación se encuentra directamente relacionada con el aumento en los valores de precipitación, o volumen de lluvia y no en las duraciones de las mismas, es por esto que realizar un análisis en conjunto de estos dos factores (duración y precipitación) no demostraría resultados confiables.
- Se recomienda aplicar la metodología descrita en el desarrollo de este proyecto, para zonas o regiones donde se presenten las mayores variaciones de la precipitación debido al cambio climático.
- No se recomienda realizar la regionalización en conjunto de los parámetros C_1 , X_0 y C_2 ya que estos tienden a presentar comportamientos similares debido a la relación entre ellos lo que produce una posible inviabilidad en el intento de la regionalización.

12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jaime Barahona Añazco, *Análisis y diseño para solución de aguas lluvias*, Chile: Universidad Austral de Chile, 2014.
- [2] Roberto Pizarro T, Juan Pablo Flores V, Claudia Sangüesa P, Enzo Martínez A, *Curvas intensidad, duración y frecuencia*, Sociedad estándares de ingeniería para aguas y suelos LTDA, 2017.
- [3] Roberto Pizarro. Juan Pablo Flores. Claudia Sanguesa. Enzo Martínez, *Curvas intensidad, duración, frecuencia*, Sociedad de estándares de ingeniería para aguas y suelos LTDA, 2017.
- [4] Bateman Allen, *Hidrología básica y aplicada*, Grupo de investigación en transporte de sedimentos, 2007.
- [5] Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales , *Amenazas inundación*, Colombia: IDEAM.
- [6] Manrique López D, *Desarrollo de un complemento de QGIS, para la estimación de curvas intensidad, duración y frecuencia a partir de los datos del IDEAM.*, Bogotá: Universidad distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [7] Cuellas Tejada C, *Análisis de confiabilidad de metodologías para la estimación de curvas sintéticas regionalizadas de intensidad duración y frecuencia para el departamento de Boyacá, Colombia.*, Bogotá: Universidad distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [8] IDEAM, *Informe final, estudio de actualización y análisis comparativo de las curvas intensidad, duración y frecuencia disponibles en el IDEAM IDF*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [9] Alvarez Delgadillo J, Celedón Jaramillo E, *Evaluación de las capacidades hidráulicas y de retención de contaminantes de un modelo de trinchera de retención construida con una canastilla en resinas de polipropileno (Aquacell) acoplada con capa filtrante en geotextil y grava utilizada*, Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- [10] Cheng L. Aghkouchak A., *Precipitación no estacionaria: Curvas intensidad-duración-frecuencia para infraestructuras de diseño en un clima cambiante*, California: Universidad de California, 2014.
- [11] Redondo S. Rodríguez C., *Reflexiones sobre el diseño de obras de drenaje vial ante los eventos de inundación*, Colombia: Sociedad Colombiana de ingenieros, 2012.
- [12] Diaz Granados M. Rodrigo Vargas M., *Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia*, Popayán: XVII seminario nacional de hidraulica e hidrología, 2006.

- [13] Maldonado M, M.sc Julio Isaac, Ing. Adriana Cristina Martínez G, Ing. Franky F, Matajira S, *Elaboración curvas IDF estaciones: Cinera Villa Olga y Santa Isabel-municipio de Cúcuta-Colombia*, Universidad de Pamplona, 2005.
- [14] Jorge Enrique Muñoz Barragán, Eduardo Zamudio Huertas, *Regionalización de ecuaciones para el cálculo de curvas intensidad, duración y frecuencia mediante mapas de isolíneas en el departamento de Boyacá*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018.
- [15] Cristián Camilo Cuellar Tejada, *Análisis de confiabilidad de metodologías para la estimación de curvas sintéticas regionalizadas de intensidad, duración y frecuencia, para el departamento de Boyacá, Colombia*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [16] Marly Maritza Cortés Montoya, *Cálculo de curvas intensidad-duración-frecuencia empleando métodos estadísticos y probabilísticos sobre información pluviográfica de las estaciones el cardón y Sena, correspondientes al área operativo de la red meteorológica del IDEAM*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2015.
- [17] Estévez Raul, *Interpolación espacial en QGIS: métodos, procesos y evaluación*, GeomapiK, 2019.
- [18] ArcGIS, *Cómo funciona kriging*, ArcGIS pro, esri.
- [19] ArcGis Resources, *¿Qué es ArcGis?*, Esri.
- [20] ArcGis for Desktop, *Cómo funciona Tendencia*, Esri, 2016.
- [21] D. Guzmán, J. Ruiz, M. Cadena, *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través del análisis de componentes principales (ACP)*, Subdirección de meteorología-IDEAM, 2014.
- [22] Colombia, Esri, *Esri datos abiertos*.
- [23] Rizo Ibañez A, *Revisión y actualización de curvas intensidad-duración-frecuencia para el área metropolitana de Bucaramanga a parit de las series tiempo máximos anuales y duración parcial*, Floridablanca: Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, 2013.
- [24] R. Rodriguez, X. Navarro, M. Casas, J. Ribalaygua, B. Russo, L. Pouget, A. Redaño, *Influencia del cambio climático en las curvas IDF para el área metropolitana de Barcelona (España)*, Barcelona: Revista nacional de climatología, 2013.
- [25] Shrestha A. Singh Babel M. Weesakul S. Vojinavic Z., *El desarrollo de intensidad-duración-frecuencia (IDF) bajo incertidumbre del cambio climático: el caso de Bangkok, Tailandia*, Bangkok: Universidad de Belgrado, 2017.

- [26] Vélez J. Poveda G. Mesa O. Hoyos C. Mejía F. Quevedo D. Salazar L. Vieira S, *Aplicación de diferentes metodologías para estimación de curvas intensidad-frecuencia-duración en Colombia*, Medellín: Universidad Nacional de Medellín, 2002.
- [27] Carvajal Cifuentes A, *Evaluación de diferentes métodos de interpolación para la variable precipitación en el departamento de Caldas-Colombia*, Manizales: Universidad de Manizales, 2016.
- [28] Sánchez Forero N, *Cálculo de la precipitación media sobre la península de La Guajira usando el método de Thiessen*, Bogotá: Universidad militar nueva granada, 2017.
- [29] Becerra Oviedo J. Sánchez Mazorca L., *Regionalización de curvas IDF en la sabana occidental del departamento de Cundinamarca*, Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2015.
- [30] Viviana Urrea, Andrés Ochoa, Oscar Mesa, *Estacionalidad de las lluvias en Colombia*, Departamento de geociencias y medio ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2019.
- [31] IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEÍA, *Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura en Colombia 2011-2100*, Estudio tecnico completo:: Tercera comunicación Nacional, 2015, Herramientas científicas para la toma de decisiones.
- [32] Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, IDEAM, *Atlas, lluvia mensual*, Colombia, 2010.
- [33] Jaime Barahona Añazco, *Análisis y diseño para solución de aguas lluvias*, Chile: Universidad Austral de Chile, 2014.

13. ANEXOS

13.1 Estaciones pluviométricas del IDEAM en Colombia

Tabla 62. Estaciones pluviométricas del IDEAM en Colombia.

Nombre de Estación	
APTO A. PADILLA (RIOHACHA)	APTO G L VALENCIA (POPAYÁN)
APTO EL CARANO (QUIBDÓ)	UNIVERSIDAD DEL VALLE (CALI)
CAÑASGORDAS (CAÑASGORDAS)	PALMIR ICA (PALMIRA)
SAUTATA (RIOSUCIO)	ICA- BALBOA (BUGA)
MOCARI (MONTERÍA)	APTO FARFAN (TULUÁ)
GALERAZAMBA (SANTA CATALINA)	CENT ADMO LA UNION (LA UNIÓN)
APTO RAFAEL NUÑEZ (CARTAGENA DE INDIAS)	APTO EL EDEN (ARMENIA)
UNIVERSIDAD TEC. MAGDALENA (SANTA MARTA)	CUMBARCO (SEVILLA)
MANAURE (MANAURE)	APTO MATECANA (PEREIRA)
APTO MAICAO (MAICAO)	VERACRUZ (PEREIRA)
APTO CAMILO DAZA (CÚCUTA)	APTO LA NUBIA (MANIZALES)
ISER PAMPLONA (PAMPLONA)	LAS BRISAS (VILLAMARIA)
SALAZAR (SALAZAR)	SONSON (SONSÓN)
TIBU (TIBÚ)	MESOPOTAMIA (LA UNIÓN)
APTO SESQUICENTENA (SAN ANDRÉS)	ITA ANDES (ANDES)
SEVILLA (PITALITO)	STA ISABEL (VALDIVIA)
PARQUE ARQUEOLOGICO (SAN AGUSTÍN)	A. OLAYA HERRERA (MEDELLÍN)
ALTAMIRA (ALTAMIRA)	GUAYABITO (SANTO DOMINGO)
RESINA (GUADALUPE)	APTO ALFONSO LOPEZ (VALLEDUPAR)
STA LETICIA (PURACÉ (Coconuco))	CARMEN DE BOLIVAR (EL CARMEN DE BOLÍVAR)
ALGECIRAS (ALGECIRAS)	A. E CORTISSOZ (SOLEDAD)
APTO BENITO SALAS (NEIVA)	LAS FLORES (BARRANQUILLA)
JABALCON (SALDAÑA)	PADELMA (ZONA BANANERA)
MEDIA LUNA (COYAIMA)	LA MACARENA (LA MACARENA)
GUAMO (GUAMO)	EL VIENTO (MAPIRIPÁN)
PASCA (PASCA)	SAN JOSE GUAVIARE (SAN JOSÉ DEL GUAVIARE)
OBS MET NACIONAL (BOGOTA D.C)	LAS GAVIOTAS (CUMARIBO)
TIBAITATA (MOSQUERA)	TUPARRO BOCAS TOMO (CUMARIBO)
LAS JUNTAS (IBAGUÉ)	EL TAPON (CUMARIBO)
PASTALES (IBAGUÉ)	BASE AEREA APIAY (VILLAVICENCIO)

EL SECRETO (IBAGUÉ)	SALINAS DE UPIN (RESTREPO)
EL RANCHO (IBAGUÉ)	STA MARIA (SANTA MARÍA)
EL PLACER (IBAGUÉ)	INST AGR MACANAL (MACANAL)
LA ESMERALDA (IBAGUÉ)	HDA LAS MARGARITAS (PUERTO LÓPEZ)
EL DARIEN (IBAGUÉ)	TAURAMENA (TAURAMENA)
EL PALMAR (IBAGUÉ)	APTO YOPAL (YOPAL)
EL SALTO (AMBALEMA)	SARAVENA (SARAVENA)
APTO PLANADAS (PLANADAS)	APTO ARAUCA (ARAUCA)
DEMOSTRACIÓN GJA (CHAPARRAL)	APTO PTO CARRENO (PUERTO CARREÑO)
SAN FRANCISCO (SAN FRANCISCO)	VILLAGARZON (VILLAGARZÓN)
APTO PTO BERRIO (PUERTO BERRÍO)	APTO G ARTUNDUAGA (FLORENCIA)
LANDAZURI(LANDÁZURI)	ARARACUARA (SOLANO)
APTO YARIGUIES (BARRANCABERMEJA)	SAN VICENTE CAGUAN (SAN VICENTE DEL CAGUÁN)
EL CENTRO (BARRANCABERMEJA)	SIBUNDOY (SIBUNDOY)
UIS (BUCARAMANGA)	MICHOACAN (COLÓN)
STA ROSA DE SIMITI (SANTA ROSA DEL SUR)	A VASQUEZ COBO (LETICIA)
SIMIJACA (SIMIJACA)	GRANJA EL MIRA (TUMACO)
ISLA DEL SANTUARIO (FÚQUENE)	RICAUURTE (RICAUURTE)
VILLA DE LEIVA (VILLA DE LEIVA)	MERCADERES (MERCADERES)
EL CUCHARO (PINCHOTE)	SIERRA LA (LA SIERRA)
SURBATA BONZA (DUITAMA)	OBONUCO (PASTO)
U.P.T.C (TUNJA)	SAN BERNARDO (SAN BERNARDO)
APTO RAFAEL BARVO (COROZAL)	EL PARAISO (TÚQUERRES)
APTO LAS FLORES (EL BANCO)	BAJO CALIMA (BUENAVENTURA)
PALETARA (PURACÉ (Coconuco))	LA MISION (BUENAVENTURA)

Fuente: Elaboración propia.

Para el desarrollo de este trabajo de grado se empleará un total de 110 estaciones pluviométricas del IDEAM, dispuestas en todo el territorio colombiano.

13.2 Análisis estadístico para C_1 :

Teniendo como referencia los datos de la variación de C_1 para diversos periodos de retorno se realizó un análisis básico de estadística descriptiva, el cual se evidencia a continuación:

Tabla 63. Análisis estadístico de C_1 para diversos periodos de retorno.

C_1 Tr=2	
Media	5703,33889
Error típico	640,257512
Mediana	3060,976
Moda	2217,351
Desviación estándar	6715,07743
Varianza de la muestra	45092264,9
Curtosis	9,9313352
Coefficiente de asimetría	2,75501927
Rango	43052,737
Mínimo	229,463
Máximo	43282,2
Suma	627367,278
Cuenta	110

C_1 Tr=3	
Media	9050,26854
Error típico	1647,59618
Mediana	3447,1225
Moda	2726,964
Desviación estándar	17280,1346
Varianza de la muestra	298603051
Curtosis	36,0567015
Coefficiente de asimetría	5,3933261
Rango	142448,513
Mínimo	284,537
Máximo	142733,05
Suma	995529,539
Cuenta	110

C_1 Tr=5	
Media	18348,0457
Error típico	5799,80813
Mediana	4003,662
Moda	3337,52
Desviación estándar	60828,9008
Varianza de la muestra	3700155174
Curtosis	48,4599165
Coefficiente de asimetría	6,78861178
Rango	499047,388
Mínimo	351,549
Máximo	499398,937
Suma	2018285,03
Cuenta	110

C_1 Tr=10	
Media	29810,3864
Error típico	9253,55878
Mediana	4740,3895
Moda	4158,116
Desviación estándar	97052,1432
Varianza de la muestra	9419118502
Curtosis	52,1531008
Coefficiente de asimetría	6,78420929
Rango	854589,77
Mínimo	411,586
Máximo	855001,356
Suma	3279142,51
Cuenta	110

C_1 $Tr=25$	
Media	33482,9139
Error típico	7051,78294
Mediana	5394,4565
Moda	5263,539
Desviación estándar	73284,278
Varianza de la muestra	5370585409
Curtosis	13,4180257
Coefficiente de asimetría	3,53640798
Rango	420510,031
Mínimo	427,577
Máximo	420937,608
Suma	3616154,7
Cuenta	108

C_1 $Tr=100$	
Media	63814,1834
Error típico	14394,4567
Mediana	7547,661
Moda	7004,508
Desviación estándar	149591,582
Varianza de la muestra	2,2378E+10
Curtosis	14,1656776
Coefficiente de asimetría	3,6003633
Rango	923038,844
Mínimo	459,775
Máximo	923498,619
Suma	6891931,8
Cuenta	108

C_1 $Tr=50$	
Media	46144,4529
Error típico	9774,3615
Mediana	6438,429
Moda	6123,458
Desviación estándar	101578,144
Varianza de la muestra	1,0318E+10
Curtosis	11,9423209
Coefficiente de asimetría	3,34209161
Rango	594834,921
Mínimo	442,821
Máximo	595277,742
Suma	4983600,92
Cuenta	108

Fuente: Elaboración propia

Para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años se presenta un total de 108 datos ya que no fue posible encontrar información de dos estaciones para estos rangos. Finalmente se encontró que los valores de este parámetro varían entre 229,463 y 923498,619 para los diversos periodos de retorno analizados.

13.3 Análisis estadístico para X_0 :

Teniendo como referencia los datos de la variación de X_0 para diversos periodos de retorno se realizó un análisis básico de estadística descriptiva, el cual se evidencia a continuación.

Tabla 64. Análisis estadístico para X_0 en diversos periodos de retorno

X_0 $Tr=2$	
Media	32,8115091
Error típico	1,37600504
Mediana	29,7045
Moda	30,455
Desviación estándar	14,4316627
Varianza de la muestra	208,272887
Curtosis	0,40435147
Coficiente de asimetría	0,77384457
Rango	68,818
Mínimo	7,527
Máximo	76,345
Suma	3609,266
Cuenta	110

X_0 $Tr=5$	
Media	38,5201182
Error típico	2,2253869
Mediana	33,6635
Moda	37,99
Desviación estándar	23,3400547
Varianza de la muestra	544,758155
Curtosis	1,72158693
Coficiente de asimetría	1,21269622
Rango	115,926
Mínimo	6,158
Máximo	122,084
Suma	4237,213
Cuenta	110

X_0 $Tr=3$	
Media	35,4298909
Error típico	1,7436219
Mediana	32,1575
Moda	34,243
Desviación estándar	18,2872608
Varianza de la muestra	334,423906
Curtosis	0,74934167
Coficiente de asimetría	0,93829856
Rango	88,999
Mínimo	6,58
Máximo	95,579
Suma	3897,288
Cuenta	110

X_0 $Tr=10$	
Media	42,0461818
Error típico	2,73210509
Mediana	33,7875
Moda	42,092
Desviación estándar	28,6545599
Varianza de la muestra	821,083805
Curtosis	1,89788872
Coficiente de asimetría	1,27827602
Rango	145,962
Mínimo	4,811
Máximo	150,773
Suma	4625,08
Cuenta	110

X_0 Tr=25	
Media	46,2139364
Error típico	3,3281851
Mediana	35,1545
Moda	46,487
Desviación estándar	34,9062998
Varianza de la muestra	1218,44977
Curtosis	2,23393559
Coefficiente de asimetría	1,35841724
Rango	186,658
Mínimo	2,231
Máximo	188,889
Suma	5083,533
Cuenta	110

X_0 Tr=100	
Media	51,0420636
Error típico	3,95193619
Mediana	38,344
Moda	51,747
Desviación estándar	41,4482565
Varianza de la muestra	1717,95797
Curtosis	2,22110274
Coefficiente de asimetría	1,33128412
Rango	227,936
Mínimo	-0,137
Máximo	227,799
Suma	5614,627
Cuenta	110

X_0 Tr=50	
Media	48,7586273
Error típico	3,65827579
Mediana	36,7325
Moda	49,286
Desviación estándar	38,3683202
Varianza de la muestra	1472,128
Curtosis	2,13199522
Coefficiente de asimetría	1,33416278
Rango	206,325
Mínimo	0,89
Máximo	207,215
Suma	5363,449
Cuenta	110

Fuente: Elaboración propia

En el caso de este parámetro fue posible obtener la información completa de la variación en cada estación, encontrando valores máximos y mínimos de variación en un rango de (-0.137 y 227,799).

13.4 Análisis estadístico para C_2 :

Teniendo como referencia los datos de la variación de C_2 para diversos periodos de retorno se realizó un análisis básico de estadística descriptiva, el cual se evidencia a continuación:

Tabla 65. Análisis estadístico para C_2 para diversos periodos de retorno.

C_2 Tr=2	
Media	0,98389091
Error típico	0,01466333
Mediana	0,973
Moda	0,795
Desviación estándar	0,1537903
Varianza de la muestra	0,02365146
Curtosis	-0,5717668
Coefficiente de asimetría	0,12837913
Rango	0,679
Mínimo	0,667
Máximo	1,346
Suma	108,228
Cuenta	110

C_2 Tr=5	
Media	1,00933636
Error típico	0,01957683
Mediana	0,98
Moda	0,829
Desviación estándar	0,20532352
Varianza de la muestra	0,04215775
Curtosis	0,93220244
Coefficiente de asimetría	0,73706581
Rango	1,099
Mínimo	0,595
Máximo	1,694
Suma	111,027
Cuenta	110

C_2 Tr=3	
Media	0,995
Error típico	0,01679754
Mediana	0,9795
Moda	1,002
Desviación estándar	0,17617407
Varianza de la muestra	0,0310373
Curtosis	0,1502829
Coefficiente de asimetría	0,46751535
Rango	0,86
Mínimo	0,646
Máximo	1,506
Suma	109,45
Cuenta	110

C_2 Tr=10	
Media	1,02509091
Error típico	0,02209474
Mediana	0,991
Moda	0,846
Desviación estándar	0,2317316
Varianza de la muestra	0,05369953
Curtosis	0,41532859
Coefficiente de asimetría	0,66464695
Rango	1,225
Mínimo	0,546
Máximo	1,771
Suma	112,76
Cuenta	110

C_2 $Tr=25$	
Media	1,04397273
Error típico	0,02498328
Mediana	1,0075
Moda	0,864
Desviación estándar	0,26202684
Varianza de la muestra	0,06865806
Curtosis	0,01998124
Coefficiente de asimetría	0,60850345
Rango	1,277
Mínimo	0,501
Máximo	1,778
Suma	114,837
Cuenta	110

C_2 $Tr=100$	
Media	1,06395455
Error típico	0,02761537
Mediana	1,0305
Moda	0,883
Desviación estándar	0,28963249
Varianza de la muestra	0,08388698
Curtosis	-0,3694083
Coefficiente de asimetría	0,475706
Rango	1,325
Mínimo	0,458
Máximo	1,783
Suma	117,035
Cuenta	110

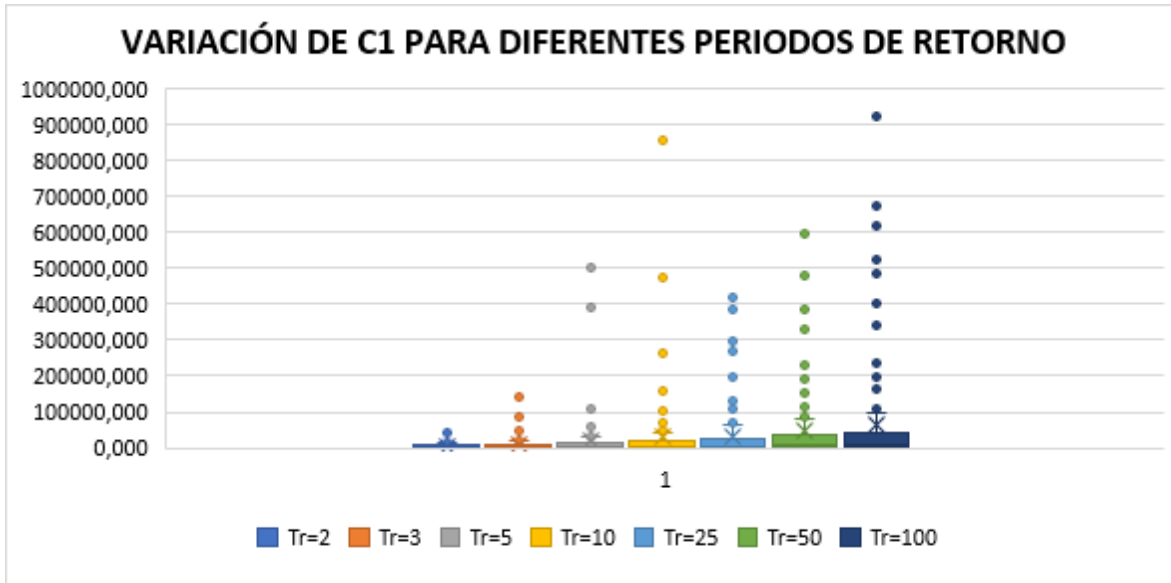
C_2 $Tr=50$	
Media	1,05453636
Error típico	0,0263902
Mediana	1,018
Moda	0,874
Desviación estándar	0,27678272
Varianza de la muestra	0,07660867
Curtosis	-0,2318203
Coefficiente de asimetría	0,52916424
Rango	1,276
Mínimo	0,477
Máximo	1,753
Suma	115,999
Cuenta	110

Fuente: Elaboración propia

Al igual que X_0 , en C_2 fue posible obtener la información completa de variación para cada estación, así mismo los valores máximos y mínimos se encuentran en un rango de (0.458-1.783).

13.5 Diagrama de caja y bigotes para C_1

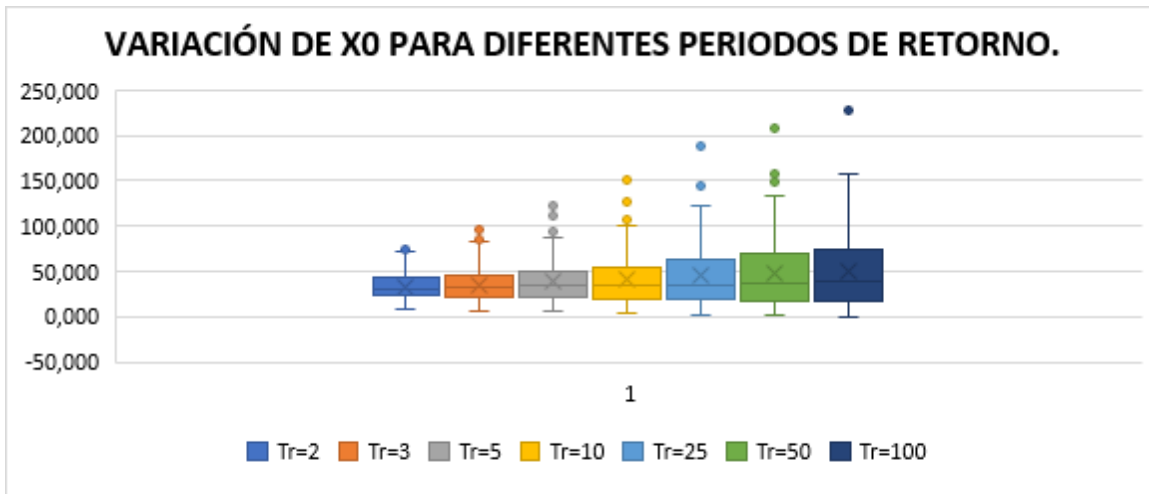
Ilustración 57. Diagrama de caja y bigotes para el parámetro C_1 .



Fuente: Elaboración propia.

13.6 Diagrama de caja y bigotes para X_0

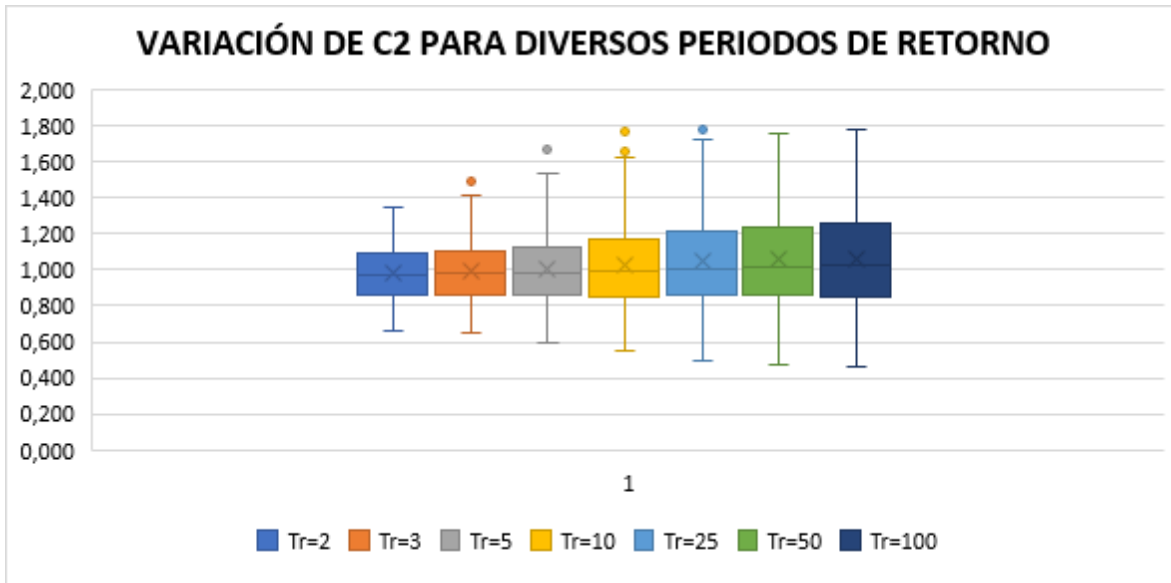
Ilustración 58. Diagrama de caja y bigotes para el parámetro X_0 .



Fuente: Elaboración propia.

13.7 Diagrama de caja y bigotes para C_2

Ilustración 59. Diagrama de caja y bigotes para el parámetro C2.



Fuente: Elaboración propia.

Las imágenes anteriormente mostradas, representan los diagramas de caja y bigotes para cada parámetro, estos diagramas evidencian grupos de datos numéricos a través de sus cuartiles, las líneas paralelas a las cajas se denominan “bigotes” y representan la variabilidad de los cuartiles tanto en la zona inferior como superior, también en ellos es posible identificar datos atípicos que se representan por medio de puntos fuera de los extremos.

En el caso del parámetro C_1 se evidencia que, para cada periodo de retorno, la brecha de agrupadores o “Caja” no es muy amplia y así mismo no hay simetría, también se refleja un gran número de valores atípicos por cada periodo de retorno.

Para el parámetro X_0 , los agrupadores poseen un ancho mayor, y los datos atípicos por periodo de retorno disminuyen.

En el último parámetro C_2 se evidencia una mayor simetría en las cajas y de hecho para el periodo de retorno de 2 años ningún dato es atípico.

13.8 Correlación Múltiple.

La correlación múltiple se realizó a lo largo del territorio nacional con las 108 estaciones de estudio para el desarrollo de este proyecto, donde se evaluaron las siguientes variables mostradas, ver la tabla que se muestra a continuación:

Tabla 66. Variables Correlación Múltiple.

ESTACIONES												
NOMBRE DE ESTACIÓN	ALTURA	PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL	C1 TR= 2 AÑOS	C1 TR=50 AÑOS	C1 TR= 100 AÑOS	X0 TR= 2 AÑOS	X0 TR=50 AÑOS	X0 TR= 100 AÑOS	C2 TR= 2 AÑOS	C2 TR=50 AÑOS	C2 TR= 100 AÑOS
Apto A. Padilla	4	76.98	542.28	6544.05	382796.47	521294.18	38.15	119.16	126.51	1.09	1.58	1.61
Mocari	14	85.54	1190.68	21914.52	477248.88	671280.06	73.13	95.90	98.14	1.29	1.72	1.76
Galerazamba	20	85.26	793.77	7250.50	37744.71	46849.87	37.96	62.74	65.89	1.09	1.23	1.25
Apto Rafael Nuñez	2	112.84	1152.24	19027.10	78546.08	98087.19	56.91	91.27	96.61	1.20	1.30	1.32
Universidad tec. Magdalena	7	75.46	481.71	4234.00	5362.46	5694.02	37.09	31.72	31.31	0.99	0.89	0.88
Manaure	1	65.77	363.66	13737.45	48145.18	55339.07	47.15	55.15	55.80	1.24	1.32	1.32
Apto Sesquicentena	1	124.71	1845.54	1230.51	1614.85	1725.65	14.04	13.94	14.07	0.76	0.65	0.64
Sta Rosa de Simití	650	94.91	1678.39	5324.29	43291.40	62373.59	30.55	68.07	74.89	1.07	1.28	1.32
Apto Rafael Barvo	166	85.30	1001.19	17288.21	192359.21	253141.41	41.57	78.91	83.48	1.28	1.56	1.59
Apto Alfonso López	138	83.07	884.57	5312.16	23413.23	35451.17	35.97	74.73	85.19	1.02	1.12	1.17
Carmen de Bolivar	152	70.75	981.95	6798.31	55085.16	75025.22	27.90	55.09	59.23	1.11	1.37	1.40
A. E Cortissoz	14	81.36	949.61	15096.57	336359.44	486457.06	46.56	104.84	112.56	1.22	1.60	1.64
Las Flores	8	76.34	653.88	19718.78	87069.51	107252.86	56.42	82.34	85.91	1.24	1.38	1.39
Padelma	20	94.96	1143.30	19461.22	53405.75	62668.90	54.61	72.49	74.89	1.25	1.25	1.26
La Macarena	248	97.20	2251.10	2724.40	9234.19	10787.39	23.74	36.61	38.11	0.94	1.01	1.02
El viento	295	43.80	76.10	7876.06	39290.34	47716.79	35.43	59.29	61.89	1.17	1.26	1.27
Las gaviotas	171	59.60	255.60	8921.35	3763.80	3560.72	44.35	30.12	28.74	1.07	0.81	0.79

Tuparro Bocas Tomo	167	126.15	2152.97	4821.07	8854.83	10133.59	36.21	52.33	55.20	1.00	0.95	0.95
El tapón	116	111.35	2467.49	11187.90	337410.04	340727.93	53.18	129.26	130.68	1.13	1.51	1.49
Base aérea Apiay	400	111.22	2172.59	1232.58	6838.19	8815.24	21.31	53.21	58.25	0.74	0.88	0.91
Salinas de Upin	450	146.19	4323.33	7725.18	595277.74	923498.62	58.28	207.22	227.80	1.00	1.53	1.57
HDA las margaritas	150	103.15	1883.53	2440.24	112271.65	165867.35	30.57	91.43	97.60	0.92	1.38	1.42
Tauramena	460	96.86	4655.99	2108.36	6455.13	7611.39	34.20	56.60	59.82	0.83	0.87	0.88
Apto Yopal	325	187.24	2406.33	2552.28	11429.64	14462.07	26.83	57.05	62.10	0.86	0.99	1.02
Saravena	148	112.52	2635.03	1946.16	1347.71	1346.26	24.43	12.47	11.40	0.81	0.63	0.61
Apto Santiago Perez	128	87.69	1653.77	3474.79	1896.82	1850.23	23.45	14.92	14.18	0.96	0.73	0.71
Apto Pto Carreño	57	131.27	2301.95	10109.78	25636.43	33361.40	47.83	86.11	95.32	1.08	1.09	1.12
San José Guaviare	165	78.12	2225.79	4269.75	14504.00	16992.45	26.83	44.11	46.24	1.01	1.08	1.09
Villagarzón	440	126.04	4360.75	2246.25	2552.66	2691.57	28.83	33.45	34.45	0.83	0.73	0.72
Apto G. Artunduaga	244	123.14	3435.36	2064.12	4056.44	4514.46	25.13	36.86	38.58	0.81	0.80	0.80
Araracuara	130	106.28	2807.08	4682.27	2900.54	2857.54	37.03	32.50	32.30	0.97	0.77	0.75
San Vicente Caguán	300	91.08	1287.48	1796.61	4688.42	5330.84	16.65	29.34	30.97	0.84	0.88	0.89
Sibundoy	2100	47.32	1421.04	274.51	926.00	1082.11	7.53	6.08	6.17	0.68	0.80	0.82
Michoacán	2100	45.75	1636.28	411.64	1531.72	1796.24	8.40	8.86	9.02	0.76	0.90	0.91
A Vasquez Cobo	84	114.50	3065.52	3785.66	21770.30	27922.13	28.28	58.06	62.57	0.93	1.14	1.17
Apto El Carano	75	171.63	7420.08	2217.35	6123.46	7004.51	30.46	49.29	51.75	0.80	0.87	0.88
Sta Leticia	2085	96.06	1741.54	2069.40	6421.73	7483.93	31.57	46.16	48.00	0.96	1.02	1.03
Paletara	2900	121.16	1149.66	943.58	4461.44	5300.16	18.83	24.08	24.57	0.93	1.09	1.10
Apto G. L. Valencia	1752	80.31	2029.37	4813.65	3618.44	3614.47	26.56	18.05	17.21	1.05	0.90	0.88
Universidad del Valle	996	68.42	1257.11	5727.63	232437.50	399570.06	45.50	120.48	132.32	1.06	1.54	1.61
Palmira ICA	118	63.65	1359.25	8428.13	33973.55	39944.94	43.01	53.15	54.13	1.16	1.28	1.30
ICA Balboa	960	48.91	684.51	2365.86	2122.10	2174.78	22.99	10.81	9.83	0.97	0.84	0.83
Apto Farfán	980	64.22	1984.30	6014.37	8968.05	9554.97	32.71	32.93	32.95	1.13	1.10	1.09
Cumbarco	1749	72.72	2266.29	1978.33	3481.97	3786.77	16.24	13.77	13.55	0.92	0.93	0.93
Granja el Mira	16	125.53	2271.03	1139.79	604.74	597.82	25.37	6.66	5.18	0.72	0.48	0.46

Ricaurte	1181	89.81	3590.85	1243.84	6244.68	7733.23	32.41	49.82	51.94	0.81	1.01	1.03
Mercaderes	1174	70.00	1358.26	3280.25	17267.40	21822.54	26.65	46.20	48.95	1.01	1.20	1.22
Sierra LA	1870	84.81	2330.53	2005.64	4028.79	4604.57	24.57	39.23	41.96	0.87	0.87	0.87
Obonuco	2710	35.90	743.51	324.55	1141.57	1339.75	9.85	8.74	8.85	0.76	0.89	0.90
San Bernardo	2190	66.56	1973.46	967.07	1997.62	2203.32	13.40	13.78	13.83	0.82	0.85	0.85
El paraíso	3120	39.29	1008.19	1226.49	8015.09	9940.24	24.10	38.95	40.48	0.93	1.14	1.16
Bajo calima	66	152.46	6213.01	3183.59	2583.22	2586.60	37.66	28.19	27.20	0.85	0.73	0.71
La misión	14	312.67	5966.76	2217.35	6123.46	7004.51	30.46	49.29	51.75	0.80	0.87	0.88
Cent. Admo la unión	934	57.73	1906.33	10037.85	36167.20	42077.20	44.94	53.05	53.83	1.21	1.32	1.33
Sautata	2	97.37	1673.89	12095.72	154546.93	211499.21	47.78	94.41	100.05	1.21	1.43	1.46
Cañasgordas	1294	70.80	2235.30	2765.83	2422.21	2493.52	28.95	15.62	14.61	0.96	0.82	0.81
Apto Camilo Daza	250	66.69	726.22	2393.70	5283.19	5933.38	23.25	31.50	32.56	0.93	0.92	0.92
Iser Pamplona	2340	46.62	912.02	475.60	815.96	883.95	8.97	7.17	7.01	0.74	0.74	0.74
Salazar	860	116.53	2577.33	2421.82	22490.62	34599.43	27.14	73.21	82.92	0.84	1.11	1.17
Tibú	50	120.76	2413.84	2827.49	6456.13	7176.56	31.34	29.42	29.29	0.89	0.90	0.90
Sevilla	1320	47.72	1222.49	1848.56	8816.47	10703.60	23.91	37.66	39.24	0.97	1.13	1.15
Parque arqueológico	1800	53.49	1429.98	3042.02	14104.31	16947.42	24.77	34.76	35.82	1.03	1.19	1.21
Altamira	180	66.80	896.14	1892.48	2170.42	2273.44	21.96	14.17	13.53	0.91	0.84	0.84
Resina	2102	66.12	2125.46	904.43	1378.23	1476.55	18.19	12.80	12.32	0.82	0.80	0.80
Algeciras	1155	71.55	1044.82	1286.02	1034.69	1060.70	16.17	10.20	9.80	0.82	0.64	0.62
Apto Benito Salas	439	93.81	1288.24	6773.10	21544.44	25430.24	37.40	57.68	60.57	1.05	1.13	1.14
Jabalcon	332	94.76	1415.20	26164.57	191620.03	217776.54	76.35	132.43	137.22	1.25	1.43	1.43
Media luna	485	95.24	1477.19	10556.17	38236.82	44611.29	49.65	66.42	68.23	1.12	1.24	1.26
Guamo	332	88.45	1283.46	12530.43	8593.43	8545.61	49.65	42.01	41.34	1.15	0.98	0.96
Pasca	2256	42.85	835.95	1730.38	2020.92	2105.82	22.84	17.45	16.92	0.97	0.90	0.89
Obs met nacional	2556	47.70	925.97	6343.36	11395.82	12431.19	33.42	35.68	35.96	1.18	1.17	1.17
Tibaitata	2543	35.43	641.20	2606.00	1636.83	1664.92	20.20	6.16	5.27	1.09	0.87	0.86
Las juntas	1765	63.22	1475.49	1348.70	9995.56	12613.12	35.81	61.46	64.24	0.88	1.09	1.11

Pastales	1602	72.59	1780.39	5516.64	33862.42	45796.86	47.09	83.43	89.52	1.07	1.22	1.25
El secreto	1482	75.66	1782.94	2802.93	25467.26	33513.17	36.87	66.13	69.67	0.95	1.20	1.23
El rancho	2670	65.76	1237.32	686.70	5263.05	7020.29	45.01	53.64	55.27	0.81	1.10	1.14
El placer	2170	84.06	2035.27	3132.89	1819.10	1835.00	37.57	18.03	16.68	0.99	0.76	0.74
La esmeralda	1965	98.77	1908.70	1452.27	1909.26	2074.28	23.03	8.45	7.79	0.85	0.73	0.73
El darien	1920	80.96	1845.16	5315.68	17039.13	24152.07	54.87	101.80	113.73	1.04	1.06	1.10
El palmar	2200	45.84	1204.96	2373.95	3296.02	3655.10	53.01	30.69	29.85	1.00	0.94	0.95
El salto	1139	82.85	1211.19	3399.32	6361.40	6963.59	27.59	28.76	28.89	0.95	0.92	0.92
Apto Planadas	1355	80.48	1822.08	2911.28	5678.11	6324.67	25.86	34.27	35.45	0.97	0.95	0.95
Demostración GJA	908	94.24	2616.89	9379.24	85857.85	119458.24	44.50	80.01	85.44	1.10	1.38	1.42
San Francisco	1325	107.83	4948.92	2544.50	2489.71	2538.52	21.81	21.37	21.46	0.87	0.77	0.76
Apto pto Berrío	150	117.85	2469.25	11820.40	33907.76	42393.19	48.97	79.12	85.11	1.10	1.14	1.16
Landázuri	935	97.58	2871.87	7231.85	328928.20	615639.01	38.81	116.73	130.94	1.06	1.57	1.65
Apto Yariguies	126	116.12	2731.73	17487.52	72970.22	94679.15	61.02	99.33	106.47	1.14	1.27	1.30
El centro	114	118.16	2558.78	29246.67	161221.58	199015.47	66.18	82.71	84.54	1.28	1.48	1.50
UIS	118	68.09	1105.12	3079.94	3264.31	3410.89	23.38	22.77	22.91	0.97	0.86	0.85
Simijaca	2590	41.88	850.61	1378.79	3116.22	3473.40	15.97	16.48	16.55	0.94	0.99	0.99
Isla del santuario	2580	47.92	860.64	2187.83	6089.43	6920.87	20.48	23.37	23.66	1.00	1.07	1.08
Villa de Leyva	2215	51.26	1000.01	3924.96	4025.40	4145.88	27.14	20.14	19.47	1.08	0.98	0.97
El cucharo	975	59.27	1175.71	2752.62	2433.23	2484.34	22.75	13.11	12.28	0.98	0.86	0.85
Surbata Bonza	2485	37.17	801.06	2820.42	4514.33	4860.58	24.28	21.87	21.66	1.09	1.05	1.05
UPTC	2690	31.85	651.41	1788.79	3111.33	3423.42	22.80	13.91	13.42	1.03	1.03	1.03
Apto el edén	1229	83.73	2105.56	6676.03	4729.17	4711.00	36.04	22.41	21.16	1.08	0.93	0.92
Apto Matecana	1199	78.58	2868.98	4437.52	8335.24	9189.14	32.48	29.75	29.59	1.00	1.03	1.03
Veracruz	17	82.36	2252.69	3173.86	1805.52	1765.71	24.36	14.04	13.09	0.96	0.75	0.73
Apto la Nubia	2104	59.46	1530.19	2016.75	1963.73	2028.10	22.87	14.19	13.47	0.97	0.86	0.85
Las brisas	4133	41.84	1312.32	229.46	654.21	748.11	12.40	9.00	8.89	0.71	0.80	0.81
Sonsón	2.18	60.28	2320.55	743.49	1147.04	1228.87	14.31	12.76	12.60	0.79	0.76	0.75

Mesopotamia	2408	86.04	3375.37	1184.33	1835.99	1974.20	21.59	19.89	19.75	0.80	0.74	0.74
ITA ANDES	1180	63.02	2038.01	2847.70	8672.65	9970.42	24.20	30.79	31.49	1.00	1.09	1.10
Sta Isabel	2652	120.15	4458.10	4829.22	163103.21	236901.32	42.64	112.66	120.71	0.94	1.43	1.48
A. Olaya Herrera	1490	56.12	1693.13	4084.02	15294.07	18132.77	25.52	35.62	36.81	1.07	1.21	1.22
Guayabito	1440	113.56	3836.96	5134.39	36619.72	55944.73	38.41	88.76	100.29	0.97	1.18	1.23
Sta María	850	130.43	4623.13	1349.73	948.38	962.23	16.62	0.89	-0.14	0.74	0.59	0.58
Inst Agr Macanal	1300	71.71	2192.93	418.57	442.82	459.78	16.21	5.78	4.94	0.67	0.59	0.58

Fuente: Elaboración propia

De este mismo modo, se procedió a realizar la correlación para cada parámetro en los tres periodos de retorno respectivamente y con las variables de estudio tales como; Altura, Precipitación máxima anual promedio, Precipitación promedio anual, como se muestra a continuación:

Tabla 67. Correlación Múltiple C1 Tr= 2 años con Altura.

CORRELACIÓN MÚLTIPLE C1 TR= 2 AÑOS		
Correlación C1 Tr= 2 años y Altura		
	C1 TR= 2 AÑOS	ALTURA
C1 TR= 2 AÑOS	1	
ALTURA	-0.45080	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 68. Correlación Múltiple C1 Tr= 2 años con Precipitación máxima anual promedio.

CORRELACIÓN MÚLTIPLE C1 TR= 2 AÑOS		
Correlación C1 Tr= 2 años y Precipitación máxima anual promedio		
	C1 TR= 2 AÑOS	PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO
C1 TR= 2 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO	0.1183	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 69. Correlación Múltiple C1 Tr= 2 años con Precipitación promedio anual.

CORRELACIÓN MÚLTIPLE C1 TR= 2 AÑOS		
Correlación C1 Tr= 2 años y Precipitación promedio anual		
	C1 TR= 2 AÑOS	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL
C1 TR= 2 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL	-0.1421	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 70. Correlación Múltiple C1 Tr= 50 años con Altura.

CORRELACIÓN MÚLTIPLE C1 TR= 50 AÑOS		
Correlación C1 Tr= 50 años y Altura	C1 TR=50 AÑOS	ALTURA
C1 TR=50 AÑOS	1	
ALTURA	-0.2680	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 71. Correlación Múltiple C1 Tr= 50 años con Precipitación máxima anual promedio.

CORRELACIÓN MÚLTIPLE C1 TR= 50 AÑOS		
Correlación C1 Tr= 50 años y Precipitación máxima anual promedio	C1 TR=50 AÑOS	PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO
C1 TR=50 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO	0.1435	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 72. Correlación Múltiple C1 Tr= 50 años con Precipitación promedio anual.

CORRELACIÓN MÚLTIPLE C1 TR= 50 AÑOS		
Correlación C1 Tr= 50 años y Precipitación promedio anual	C1 TR=50 AÑOS	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL
C1 TR=50 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL	0.0245	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 73. Correlación Múltiple C1 Tr= 100 años con Altura.

CORRELACIÓN MÚLTIPLE C1 TR= 100 AÑOS		
Correlación C1 Tr= 100 años y Altura		
	C1 TR= 100 AÑOS	ALTURA
C1 TR= 100 AÑOS	1	
ALTURA	-0.2412	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 74. Correlación Múltiple C1 Tr= 100 años con Precipitación máxima anual promedio.

CORRELACIÓN MÚLTIPLE C1 TR= 100 AÑOS		
Correlación C1 Tr= 100 años y Precipitación máxima anual promedio		
	C1 TR= 100 AÑOS	PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO
C1 TR= 100 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO	0.1402	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 75. Correlación Múltiple C1 Tr= 100 años con Precipitación promedio anual.

CORRELACIÓN MÚLTIPLE C1 TR= 100 AÑOS		
Correlación C1 Tr= 100 años y Precipitación promedio anual		
	C1 TR= 100 AÑOS	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL
C1 TR= 100 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL	0.0415	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 76. Correlación Múltiple X0 Tr= 2 años con Altura.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA X0 TR= 2 AÑOS		
Correlación X0 Tr= 2 años y Altura	X0 TR= 2 AÑOS	ALTURA
X0 TR= 2 AÑOS	1	
ALTURA	-0.4082	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 77. Correlación Múltiple X0 Tr= 2 años con Precipitación máxima anual promedio.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA X0 TR= 2 AÑOS		
Correlación X0 Tr= 2 años y Precipitación máxima anual promedio	X0 TR= 2 AÑOS	PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO
X0 TR= 2 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO	0.2256	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 78. Correlación Múltiple X0 Tr= 2 años con Precipitación promedio anual.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA X0 TR= 2 AÑOS		
Correlación X0 Tr= 2 años y Precipitación promedio anual	X0 TR= 2 AÑOS	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL
X0 TR= 2 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL	0.0182	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 79. Correlación Múltiple X0 Tr= 50 años con Altura.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA X0 TR= 50 AÑOS		
Correlación X0 Tr= 50 años y Altura	X0 TR=50 AÑOS	ALTURA
X0 TR=50 AÑOS	1	
ALTURA	-0.3612	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 80. Correlación Múltiple X0 Tr= 50 años con Precipitación máxima anual promedio.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA X0 TR= 50 AÑOS		
Correlación X0 Tr= 50 años y Precipitación máxima anual promedio	X0 TR=50 AÑOS	PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO
X0 TR=50 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO	0.3050	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 81. Correlación Múltiple X0 Tr= 50 años con Precipitación promedio anual.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA X0 TR= 50 AÑOS		
Correlación X0 Tr= 50 años y Precipitación promedio anual	X0 TR=50 AÑOS	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL
X0 TR=50 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL	0.1176	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 82. Correlación Múltiple X0 Tr= 100 años con Altura.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA X0 TR= 100 AÑOS		
Correlación X0 Tr= 100 años y Altura	X0 TR= 100 AÑOS	ALTURA
X0 TR= 100 AÑOS	1	
ALTURA	-0.3523	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 83. Correlación Múltiple X0 Tr= 100 años con Precipitación máxima anual promedio.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA X0 TR= 100 AÑOS		
Correlación X0 Tr= 100 años y Precipitación máxima anual promedio	X0 TR= 100 AÑOS	PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO
X0 TR= 100 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO	0.3078	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 84. Correlación Múltiple X0 Tr= 100 años con Precipitación promedio anual.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA X0 TR= 100 AÑOS		
Correlación X0 Tr= 100 años y Precipitación promedio anual	X0 TR= 100 AÑOS	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL
X0 TR= 100 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL	0.1238	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 85. Correlación Múltiple C2 Tr= 2 años con Altura.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA C2 TR= 2 AÑOS		
Correlación C2 Tr= 2 años y Altura	C2 TR= 2 AÑOS	ALTURA
C2 TR= 2 AÑOS	1	
ALTURA	-0.2857	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 86. Correlación Múltiple C2 Tr= 2 años con Precipitación máxima anual promedio.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA C2 TR= 2 AÑOS		
Correlación C2 Tr= 2 años y Precipitación máxima anual promedio	C2 TR= 2 AÑOS	PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO
C2 TR= 2 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO	-0.1530	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 87. Correlación Múltiple C2 Tr= 2 años con Precipitación promedio anual.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA C2 TR= 2 AÑOS		
Correlación C2 Tr= 2 años y Precipitación promedio anual	C2 TR= 2 AÑOS	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL
C2 TR= 2 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL	-0.3728	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 88. Correlación Múltiple C2 Tr= 50 años con Altura.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA C2 TR= 50 AÑOS		
Correlación C2 Tr= 50 años y Altura	C2 TR=50 AÑOS	ALTURA
C2 TR=50 AÑOS	1	
ALTURA	-0.1971	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 89. Correlación Múltiple C2 Tr= 50 años con Precipitación máxima anual promedio.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA C2 TR= 50 AÑOS		
Correlación C2 Tr= 50 años y Precipitación máxima anual promedio	C2 TR=50 AÑOS	PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO
C2 TR=50 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO	-0.0209	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 90. Correlación Múltiple C2 Tr= 50 años con Precipitación promedio anual.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA C2 TR= 50 AÑOS		
Correlación C2 Tr= 50 años y Precipitación promedio anual	C2 TR=50 AÑOS	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL
C2 TR=50 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL	-0.1950	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 91. Correlación Múltiple C2 Tr= 100 años con Altura.

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA C2 TR= 100 AÑOS		
Correlación C2 Tr= 100 años y Altura	C2 TR= 100 AÑOS	ALTURA
C2 TR= 100 AÑOS	1	
ALTURA	-0.1890	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 92. Correlación Múltiple C2 Tr= 100 años con Precipitación máxima anual promedio

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA C2 TR= 100 AÑOS		
Correlación C2 Tr= 100 años y Precipitación máxima anual promedio	C2 TR= 100 AÑOS	PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO
C2 TR= 100 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL PROMEDIO	-0.0115	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 93. Correlación Múltiple C2 TR= 100 años con Precipitación promedio anual

CORRELACIÓN MULTIPARAMÉTRICA C2 TR= 100 AÑOS		
Correlación C2 Tr= 100 años y Precipitación promedio anual	C2 TR= 100 AÑOS	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL
C2 TR= 100 AÑOS	1	
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL	-0.1820	1

Fuente: Elaboración propia.

10.9 Anexos digitales

El siguiente link posee la recopilación de diversos archivos en MS-EXCEL, los cuales fueron base para sustentar toda la información expuesta en el presente documento:

https://upbeduco-my.sharepoint.com/:f/g/personal/maria_alvarez_2016_upb_edu_co/Es4dBRI07cZDs_DYTv5o5IcB_PD5I0e9HXqt8B7KoOSUUnA?e=ws5Pt2