

Evaluación de un interpolador geoespacial óptimo para predecir la precipitación mensual en el departamento del Huila.

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica
Manizales, 2019

Evaluación de un interpolador geoespacial óptimo para predecir la precipitación mensual en el departamento del Huila.

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster en Tecnologías de la Información Geográfica

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica
Manizales, 2019

Dedicado a Dios y a mi Familia

No existen más de dos reglas para escribir
tener algo que decir y decirlo.
Oscar Wilde

Agradecimientos

Primero a Dios, por darme la oportunidad, la fuerza, la templanza y el valor para finalizar esta nueva etapa de mi vida, a él por todas y cada una de las cimas y los logros que en mí ha forjado.

En segundo lugar, debo agradecer a mis padres, a mi madre Aleyda, ejemplo de vida, mujer incansable, ejemplo de trabajo y esfuerzo, a mi padre Eivar, un hombre sabio de pocas palabras, ejemplo de inteligencia y conocimiento, a ellos que tallaron y labraron en mí una buena persona, a ellos les debo todo lo que soy, la responsabilidad y el esfuerzo, ¡a ellos todo!

A Alejandra Parra, mi norte, los pies en la tierra, su entrega, su pasión, su amor, su impulso y su bondad. La finalización de este proyecto en gran parte fue gracias a ella; a ella mil gracias por apoyarme, confiar y creer en mí.

A mis hermanitas Sara y Camila, a Sara la templanza y la fortaleza, a Camila la sencillez y su calidad humana, a ellas les agradezco y dedico este pedacito de logro. Este pinito que se siembra y que deseo lo tomen de espejo para su futuro. A mi hermano y amigo Leonel, por su ejemplo, sabiduría e intelecto, a él muchas gracias por apoyarme y ser incondicional.

A mi familia, a mis abuelos, a mi abuelo Leandro por su constancia y experiencia, por ser la principal razón e impulsó para trabajar por el Agro, a él que ya está descansando eternamente, mil gracias por ayudar a formarme.

A la Federación nacional de cafeteros, al comité departamental de cafeteros del Huila, al centro de investigaciones de café (Cenicafé), a Juan Carlos García por confiar, darme su apoyo y enseñarme, y al servicio de Extensión del departamento del Huila, a la federación porque fue mi hogar y por estos 7 años de labores para el gremio.

A los profesores de la maestría y a la Universidad de Manizales, en especial al profesor Mario Giraldo, a él muchas gracias por su apoyo e instrucciones académicas, pues fue fundamental en el progreso y materialización de esta investigación.

A mis compañeros y amigos Ninibeth, Luz Adriana, Juan Camilo, Daniel y a Víctor, porque un pedacito de esto también es meritorio para ellos.

Resumen

Esta investigación evalúa las metodologías de carácter no determinístico kriging, empirical bayesian kriging y cokriging, y el estimador determinístico inverso ponderado de la distancia (IDW por sus siglas en inglés), para la producción de mapas de precipitación mensual en el departamento de Huila, Colombia. El análisis usó la serie histórica (1930-2017) de la precipitación del IDEAM¹, seleccionando las estaciones que poseen una serie temporal de más de 15 años. Se usaron los datos de 116 estaciones climáticas, como variables de entrada en los modelos de interpolación. A partir de 576 interpolaciones realizadas con rutinas completas en software R y Python, y con técnicas de validación cruzada, se concluyó que la técnica Empirical Bayesian Kriging, presenta la mejor predicción de la precipitación mensual en el departamento del Huila con resolución espacial de 1km². El interpolador fue usado para generar capas de precipitación bajo escenarios del fenómeno El Niño, La Niña y Neutro encontrando valores para los coeficientes de determinación (r^2) por encima de 0.83. Finalmente, la investigación encontró 68 áreas con potencial para establecer nuevas estaciones climáticas, así como la posibilidad de pronosticar el comportamiento de las lluvias a nivel departamental usando 80% de las estaciones actuales.

Palabras clave: Huila Colombia, precipitación, interpolación espacial, estaciones climáticas, geoprocreso.

¹ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Agencia del gobierno colombiano.

Abstract

This research evaluates the non-deterministic kriging, empirical bayesian kriging and cokriging methodologies, and the weighted inverse deterministic distance estimator (IDW), for the production of monthly precipitation maps in the department of Huila, Colombia. Historic series (1930-2017) of precipitation from IDEAM, from 116 stations with more than 15 years of records were selected as input variable in the interpolation models. Using complete routines in R and Python software, 576 interpolations were made and cross-validated. The results showed that Empirical Bayesian Kriging technique presents the best prediction of monthly precipitation in the department of Huila with spatial resolution of 1km². The interpolator was used to generate precipitation layers under El Niño, La Niña and Neutral scenarios producing coefficients of determination (r²) above 0.83 in its predictions. Finally, the research found 68 areas with the potential to establish new weather stations, as well as the possibility to forecast the behavior of the rain at the department level with the use of 80% of the current stations.

Keywords: precipitation, interpolation, spatial prediction, meteorology, geoprocess.

Tabla de Contenido

1.	Planteamiento del problema de investigación y su justificación.....	16
1.1	Descripción de la ubicación geográfica	16
1.2	Formulación del problema.....	17
1.3	Justificación	17
2.	Hipótesis de investigación.....	18
3.	Objetivos.....	19
3.1	Objetivos generales	19
3.2	Objetivos específicos	19
4.	Antecedentes	20
4.1	Referente contextual	20
4.2	Metodologías de interpolación espacial.....	20
4.2.1	Kriging ordinario	21
4.2.2	Inverso ponderado de la distancia (IDW).....	21
4.2.3	Interpolación segmentaria o Splines	22
4.2.4	Estadística geofuncional	22
4.2.5	Empirical bayesian kriging	22
4.3	Referente normativo y legal	22
5.	Referente teórico	23
5.1	Bases climáticas parametrizadas	23
5.2	Precipitación	24
5.3	Vulnerabilidad del café en Colombia a eventos El Niño, La Niña.	25
5.4	Análisis exploratorio de datos (AED).....	25
5.5	Validación de resultados	26
6.	Materiales y métodos	28
6.1	Información de referencia metodológica y diseño de Investigación	28
6.1.1	Tipo de investigación	28
6.1.2	Muestra, área y población de trabajo.....	28
6.2	Información e insumos para realizar las metodologías de interpolación .	30
6.2.1	Información climática y parametrización de la base de datos	30
6.2.2	Índice climático (ONI)	31
6.2.3	Información orográfica	32
6.2.4	Información de estaciones por ecorregión	34
6.2.5	Información de máscaras para realizar la interpolación	38
6.2.6	Información y principios para interpolar	40
6.3	Información y métodos para identificar el número y ubicación de nuevas estaciones	51
6.3.1	Información y selección de estaciones por ecorregión.....	51
6.3.2	Información de área de influencia con polígonos de voronoi de las estaciones climáticas	54
7.	Resultados y discusión	55
7.1	Selección, procesos y rutinas de interpolación.....	55

7.1.1	Salidas de interpolación.....	56
7.1.2	Validación, análisis de metodologías de interpolación y sus salidas estadísticas.....	60
7.1.3	Determinación del interpolador de la precipitación para el departamento del Huila, con base en los resultados 7.1.2.	62
7.1.4	Determinación del número límite de estaciones a Interpolar con base en los resultados 7.1.2.	62
7.2	Selección de sitios de futuras estaciones climáticas	63
7.2.1	Regresión de estaciones por ecorregión.....	63
7.2.2	Área de influencia por estación climática.....	63
7.2.3	Centroides de intersección por área de influencia por ecorregión....	65
7.2.4	Área de influencia de las estaciones futuras.....	66
7.2.5	Número y ubicación de nuevas estaciones.....	67
7.3	Análisis y cartografía temática de la precipitación en escenarios de variabilidad climática	71
8.	Conclusiones	78
8.1	Metodologías de Interpolación	78
8.2	Selección de nuevos sitios para futuras estaciones climáticas	78
8.3	Mínimo de estaciones para interpolar.....	79
8.4	Comportamiento espacial de la precipitación	79
8.5	Análisis de la precipitación los escenarios de variabilidad climática	80
9.	Recomendaciones	81
9.1	Metodologías de interpolación	81
9.2	Técnicas para ubicar nuevas estaciones.....	81
9.3	Porcentaje mínimo de estaciones a interpolar.....	81
9.4	Cartografía temática de precipitación	81
9.5	Precipitación los escenarios de variabilidad climática	82
10.	Referencias bibliográficas.....	83
11.	Anexos	88

Lista de figuras

Figura 1. Desviaciones de temperatura de la superficie del océano Pacífico	24
Figura 2. Georreferenciación de las estaciones climáticas	29
Figura 3. Modelo de Elevación Digital departamento del Huila.....	33
Figura 4. Ecorregiones departamento del Huila	35
Figura 5 Estaciones ecorregión 1	37
Figura 6 Estaciones ecorregión 2.....	37
Figura 7 Estaciones ecorregión 3.....	37
Figura 8 Máscara ecorregión 1	39
Figura 9 Máscara ecorregión 2	39
Figura 10 Máscara ecorregión 3.....	39
Figura 11. Histograma de frecuencias precipitación mensual Ecorregión 1.....	42
Figura 12. Histograma de frecuencias precipitación mensual Ecorregión 2.....	44
Figura 13. Histograma de frecuencias precipitación mensual Ecorregión 3.....	46
Figura 14. Boxplot precipitación mensual Ecorregión 1	47
Figura 15 Boxplot precipitación mensual Ecorregión 2.....	47
Figura 16 Boxplot precipitación mensual Ecorregión 3.....	47
Figura 17. Semivariograma Ecorregión 1	48
Figura 18. Semivariograma Ecorregión 2	48
Figura 19. Semivariograma Ecorregión 3.....	49
Figura 20. Análisis de tendencia Ecorregión No. 1	49
Figura 21. Análisis de tendencia Ecorregión No. 2.....	50
Figura 22. Análisis de tendencia Ecorregión No. 3.....	50
Figura 23. Índice de Moran de la precipitación departamento del Huila	51
Figura 24. Valor por agrupamiento precipitación departamento del Huila	51
Figura 25. Estaciones validación área de Influencia por ecorregión	52
Figura 26. Polígonos de Voronoi estaciones Huila	54
Figura 27. Salidas gráficas interpolaciones mes de enero	57
Figura 28. Salidas gráficas interpolaciones mes de junio	58
Figura 29. Salidas gráficas interpolaciones mes de octubre.....	59
Figura 30. Gráfico comportamiento estadístico del R^2	61
Figura 31. Gráfico comportamiento estadístico del ECM.....	61
Figura 32. Área de Influencia por Estación y Ecorregión.....	65
Figura 33. Centroides y área sin Influencia de estaciones climáticas.....	66
Figura 34. Centroides y ubicación de nuevas estaciones.....	67
Figura 35. Mapa de la ubicación de nuevas estaciones Climáticas.....	68
Figura 36. Mapas Temáticos precipitación Enero y febrero.....	72
Figura 37. Mapas Temáticos precipitación Marzo y abril.....	73
Figura 38. Mapas Temáticos precipitación Mayo y junio	74
Figura 39. Mapas Temáticos precipitación Julio y agosto	75
Figura 40. Mapas Temáticos precipitación Septiembre y octubre.....	76
Figura 41. Mapas Temáticos precipitación Noviembre y diciembre	77

Lista de Tablas

Tabla 1. Selección de estaciones climáticas catálogo IDEAM.....	30
Tabla 2. Promedios de precipitación por Ecorregiones dpto. Del Huila	34
Tabla 3. Estaciones totales por ecorregión y estaciones de validación.	36
Tabla 4. Estadística descriptiva mensual departamento del Huila.	40
Tabla 5. Lagsize por Ecorregión de interpolación.....	48
Tabla 6. Estaciones seleccionadas por ecorregión	53
Tabla 7. Interpolaciones por Ecorregión.....	55
Tabla 8. Interpolaciones por metodología	56
Tabla 9. Coeficiente de determinación R^2 promedio.....	60
Tabla 10. Error cuadrático medio promedio	60
Tabla 11. Coeficiente de determinación por estación.....	63
Tabla 12. Área de Influencia de las estaciones por Ecorregión.	64
Tabla 13. Ubicación espacial de las Nuevas estaciones para la precipitación.....	68

Lista de Anexos

Anexo 1. Base de datos Climática escenario Neutro departamento del Huila	88
Anexo 2. Base de datos Climática escenario El Niño departamento del Huila	92
Anexo 3. Base de datos Climática escenario La Niña departamento del Huila....	96
Anexo 4. Coeficiente de determinación R^2 del 95%	101
Anexo 5. Error Cuadrático Medio (ECM) del 95%	101
Anexo 6. Coeficiente de determinación R^2 del 90%	101
Anexo 7. Error Cuadrático Medio (ECM) del 90%	102
Anexo 8. Coeficiente de determinación R^2 del 80%	102
Anexo 9. Error Cuadrático Medio (ECM) del 80%	103
Anexo 10. Coeficiente de determinación R^2 del 70%	103
Anexo 11. Error Cuadrático Medio (ECM) del 70%	105
Anexo 12. Scripts para correr el Cokriging en R.....	105
Anexo 13. Scripts para correr el kriging en Python.....	109

GLOSARIO

Base de datos: conjunto de datos estructurado para permitir su almacenamiento, consulta y actualización en un sistema informático. Las bases de datos relacionales son un caso concreto en el que la información se organiza en relaciones (llamadas más frecuentemente “tablas”) que son conjuntos de tuplas (“registros”) cada una de las cuales integra información de un elemento en un conjunto de campos (uno por atributo del elemento).

Buffer: Una zona alrededor de una entidad del mapa medida en unidades de distancia o tiempo.²

Centroide: entidad vectorial de puntos, líneas o polígonos representada en un punto central, ubicado espacialmente en la intersección de las líneas transversales de la forma o figura del polígono. La metodología ZAE utilizó esta técnica para generar una malla de puntos como referencia geográfica sobre el sistema productivo cafetero.

Digitalizar: operación de codificar la información en cifras. La digitalización se aplica habitualmente a la codificación de la información gráfica (mapas y planos convencionales) pero puede ser aplicada con propiedad a todo tipo de información para la construcción de bases de datos digitales.

Ecorregiones: área biogeográfica relativamente grande que se distingue por el carácter único de su ecología, clima, geomorfología, suelos, hidrología, flora y fauna.

Escala: relación de proporción que existe entre las medidas de un mapa con la medida real.

Geoestadística: conjunto de técnicas desarrolladas por D.G. Krige (1951) que explotan la correlación espacial para realizar predicciones sobre una variable.

Georreferenciar: asignar coordenadas geográficas a un objeto o estructura; el concepto aplicado a una imagen digital implica un conjunto de operaciones geométricas que permiten asignar a cada pixel de la imagen un par de coordenadas (x, y) en un sistema de proyección

Grilla espacial: En cartografía, cualquier red de líneas paralelas y perpendiculares se superpone en un mapa y se usa como referencia. Estas cuadrículas se mencionan generalmente mediante la proyección del mapa o el sistema de coordenadas que representan, como la cuadrícula universal de Mercator transversal.³

² <https://support.esri.com/es/other-resources/gis-dictionary>, tomado (17/12/2018), GIS Dictionary.

³ <https://support.esri.com/es/other-resources/gis-dictionary>, tomado (17/12/2018), GIS Dictionary.

Interpolación: estimación del valor de una variable en un punto, a partir de otros datos próximos. Se entiende que el punto problema está dentro del rango de variación de los datos disponibles; en caso contrario se habla de extrapolación. La interpolación puede hacerse en un espacio de 1, 2 o más dimensiones. (Calvo, 2011)

Matriz: estructura de datos formada por elementos (celdas) dispuestos regularmente en filas y columnas. La matriz es la estructura más usada para la construcción de modelos digitales del terreno e imágenes digitales; en este último caso, cada elemento de una matriz se denomina pixel. Se habla de 'matriz regular' cuando filas y columnas están separadas por la misma distancia.

Método determinístico: método para predecir un valor en un lugar no muestral, utiliza los valores de los lugares muestrales que haya alrededor del lugar que se va a predecir. Los valores de los lugares más próximos al que se va a predecir tendrán más influencia y por lo tanto más peso que los que están más lejos.

Método no determinístico: técnica de interpolación geoestadística, genera superficies que incorpora las propiedades estadísticas de los datos muestrales y proporciona una medida de error de las mismas, siendo este un indicador de buena o mala predicción

Modelo: representación simplificada de un objeto o proceso en la que se representan algunas de sus propiedades, un modelo reproduce solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que queda, por tanto, representado por otro objeto o sistema de menor complejidad. Los modelos se construyen para conocer o predecir propiedades del objeto real.

Modelo digital del terreno: estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa; se trata, por tanto, de un modelo digital que representa una propiedad cuantitativa topográfica (por ejemplo, elevación, pendiente) o no (temperatura de la superficie del terreno, reflectancia).

Ráster: Según ESRI, 2017, son modelos de datos en el que la realidad se representa mediante piezas elementales que forman un mosaico regular, también denominadas teselas o píxeles; cada una es una unidad de superficie que recoge el valor medio de la variable representada (altitud, reflectancia ...); las teselas pueden ser cuadradas (celdas) o no (triangulares, hexagonales...) un modelo de datos ráster está basado en localizaciones. Cada pixel tiene un punto denominado centroide, el cual asume una sola georreferenciación para asociar todos los atributos o variables estimadas.

Resolución espacial: se refiere a la finura de detalles visibles en una imagen; cuanto menor es el área terrestre representada por cada píxel en una imagen digital, mayores son los detalles que pueden ser captados y mayor es la resolución espacial.

Shape (shapefile): un formato de almacenamiento de datos vectoriales para almacenar la ubicación, la forma y los atributos de las características geográficas. Un shapefile se almacena en un conjunto de archivos relacionados y contiene una clase de entidad.⁴

Validación: proceso de comprobación que permite reconocer si los datos y métodos responden a un estándar. Por ejemplo, en el caso de la investigación para la precipitación a escala mensual se refiere, por ejemplo, a si los datos mensuales históricos de una variable climática, corresponden con aquellos que puedan recolectarse de estaciones próximas a las del sitio de análisis.

⁴ <https://support.esri.com/es/other-resources/gis-dictionary>, tomado (17/12/2018), GIS Dictionary.

Introducción

El conocimiento del comportamiento del clima en general y de la precipitación en particular es de vital importancia para la producción y productividad agrícola ya que las variaciones climáticas definen y determinan las condiciones que favorecen o restringen de los cultivos. La precipitación es definida por Jaramillo, 2015, como “los depósitos de agua en estado líquido o sólido provenientes de la atmósfera”. En el departamento del Huila, Colombia, se registraron pérdidas en el sector agrario de 24.108 millones de pesos, que representa el 3.5% de la pérdida para el sector agrario a nivel Nacional, durante el periodo 2010-2011 (BID, CEPAL, 2012).

En estudios climáticos el uso de estaciones meteorológicas es de carácter limitado ya que solo permiten producir información confiable en el área de influencia donde se encuentra la estación. Sin embargo, las herramientas geoestadísticas de interpolación permiten generar información y extender las capas de predicción de los elementos meteorológicos, con el objetivo de estimar el valor de una variable meteorológica sobre áreas sin información. Dichas técnicas nos permiten generar la descripción de fenómenos climáticos en el espacio, y de apreciar el comportamiento de la precipitación en escenarios de variabilidad climática.

Según Da Silva (2000), las herramientas SIG “han permitido la integración de modelos regionales que definen la aptitud climática”, dicha aptitud puede convertirse en una limitante y oportunidad para los cultivos, que puede determinar acciones de manejo agronómico como: 1. la definición de las épocas de siembra adecuadas, 2. el manejo y aplicación de enmiendas edáficas, 3. aplicación de fertilizantes, como una forma de disminuir los efectos causados por la distribución, exceso o disminución de la precipitación.

De esta forma, es de gran interés para la ciencia agroclimatológica poder establecer métodos de interpolación para realizar estimaciones climáticas, que permitan entender la dinámica meteorológica y los fenómenos que se presentan en la región que intervienen en la agricultura, así como la inclusión de herramientas espaciales en el manejo agrícola, que permitan brindar soluciones a los productores en el campo agrario o en diferentes sectores sociales.

Ejemplos recientes en Colombia muestran el potencial de usar la interpolación como una herramienta para predecir y conocer el comportamiento espacial de la precipitación. García, et al. (2014), usando la información histórica de la red climática cafetera, generaron las capas climáticas diarias para las variables de precipitación, brillo solar, temperatura máxima, temperatura media, y temperatura mínima con resolución espacial de 5 km². A partir de estas capas y con base en resultados previos de investigación, los investigadores modelaron 21 indicadores bioclimáticos usando análisis multivariado y produciendo una primera aproximación para una Zonificación Agroclimática Cafetera Colombiana. En la investigación *“Definición de las zonas agroecológicas para la caficultura del Huila y ajustes en el*

sistema productivo” desarrollada por Cenicafé en el marco del proyecto de CT&I con recursos del Sistema General de Regalías, Quiroga et al. 2016 y 2017, adaptaron metodologías de interpolación climática con información del histórico climático de IDEAM y la red climática cafetera FNC©. En la investigación que aquí presento se realizaron comparaciones entre herramientas de predicción validadas por metodologías estadísticas de validación cruzada y coeficientes de determinación (r^2) bajo el criterio experto del investigador, generando dominios de recomendación agronómica para los caficultores del departamento del Huila.

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

Conocer la dinámica climática es una herramienta fundamental para la toma de decisiones con el fin de limitar los efectos negativos a nivel social causados por el riesgo y la pérdida de producción y productividad de los cultivos. El departamento del Huila cuenta con 241 estaciones de la red meteorológica de IDEAM, la cual está conformada por estaciones convencionales y automáticas. Desarrollar una metodología para conocer la distribución espacial del clima es de gran interés, ya que permite describir el comportamiento de las lluvias y realizar el análisis de los periodos húmedos y secos para esta región. Esta investigación busca definir una técnica de interpolación, que permita conocer el comportamiento espacial de la precipitación acumulada mensual en el departamento del Huila.

1.1 Descripción de la ubicación geográfica

El área de estudio corresponde al departamento del Huila, este se encuentra conformado por 37 municipios, orográficamente se encuentra entre las cordilleras Oriental y Central, y posee un área de 19.900 km², que representa el 1.8% del territorio nacional (Huila, 2017). A su vez el Huila cuenta con todos los pisos térmicos, iniciando desde el cálido en la zona del desierto de la Tatacoa, hasta el piso frío ubicado en el Nevado Huila, que se encuentra ubicado sobre la cordillera central en el municipio de Teruel. Su ubicación espacial se encuentra entre los 3° 55' y 1° 30' de latitud Norte, y los 74°25' y 76°35' de longitud Oeste del meridiano.

El departamento del Huila es ampliamente afectado por la variabilidad climática con los fenómenos El Niño y La Niña, los cuales producen restricciones económicas al sector agrario. En los estimativos de la corporación Autónoma del Alto Magdalena (CAM) el 53% del territorio es dedicado a la producción agrícola, con más de un millón de hectáreas destinadas a actividades agropecuarias (CAM, 2014), a su vez el departamento del Huila cuenta con 35 municipios cafeteros con un total de 154.709 hectáreas, 81.560 caficultores y 101.452 fincas (SIC@, 2016), esta área cafetera se encuentra ubicada geográficamente sobre las vertientes de las cordilleras central y oriental en los flancos ubicados sobre la vertiente del cañón del río Magdalena, con alturas desde los 700 hasta los 2.300 m s.n.m.

1.2 Formulación del problema

Este proyecto evalúa diferentes alternativas de interpolación, con la finalidad de verificar qué modelo es el adecuado para predecir la precipitación a escala mensual para departamento del Huila. La comparación de metodologías de interpolación carácter no determinístico kriging, empirical bayesian kriging y cokriging, y el estimador determinístico inverso ponderado de la distancia (IDW), serán ajustadas con base en la metodología propuesta por Giraldo et al. 2012, con software R y la propuesta por Quiroga et al. 2017 (Cenicafé, 2017) en el software Python en ArcGIS, el resultado permitirá definir el interpolador que presente la mejor predicción y menor error sobre la precipitación para el departamento del Huila.

1.3 Justificación

Parte de la variabilidad en la precipitación en Colombia es explicada por los cambios generados por la Oscilación decadal del pacífico, sumada la interacción de la dinámica de los fenómenos El Niño y La Niña sobre los valles interandinos en Colombia. Es posible conocer la dinámica de la precipitación a escala local en áreas no monitoreadas usando técnicas de interpolación espacial. Sin embargo, primero es necesario identificar metodología de interpolación espacial que produzca los valores más confiables para predecir la precipitación a escala mensual en el departamento del Huila. En este trabajo, el uso de métodos estadísticos, geoprocetos y metodologías geoestadísticas no determinísticas y determinísticas, permite encontrar que método es el indicado para predecir la interpolación de la precipitación en el departamento del Huila a nivel mensual.

Así mismo, aplicando técnicas estadísticas es posible conocer el número mínimo de estaciones climáticas y su posible ubicación espacial que permiten predecir confiablemente la precipitación en el departamento del Huila, sin perder la significancia estadística. Además de conocer las áreas potenciales para la ubicación de nuevas estaciones climáticas, permitirán mejorar el análisis de la variable y ajustar la interpolación espacial de la precipitación. Este conocimiento es de gran importancia para analizar el comportamiento espacial de la precipitación sobre el departamento del Huila, y predecir para la identificación de riegos, amenazas, y vulnerabilidades que sobre el factor social y económico agrario se presentan durante escenarios climáticos La Niña y El Niño.

2.Hipótesis de investigación

- ✓ De los métodos de interpolación existe uno que presenta los mejores resultados estadísticos en su predicción.
- ✓ Hay un número límite de estaciones climáticas necesarias para interpolar sin reducir la significancia estadística
- ✓ Hay espacios geográficos en el departamento del Huila con vacíos en la información climática debido a la baja continuidad de información y ausencia de estaciones climáticas.
- ✓ Usando un interpolador espacial optimo se puede predecir la precipitación en escenarios climáticos Neutro, El Niño y La Niña.
- ✓ La cartografía temática de la precipitación mensual ayuda a la interpretación de los fenómenos climáticos para el departamento del Huila.

3. Objetivos

3.1 Objetivos generales

- Evaluar interpoladores espaciales para estimar la variación espacial de las lluvias para el departamento del Huila bajo diferentes escenarios climáticos.

3.2 Objetivos específicos

- Comparar las metodologías de interpolación espacial por métodos de validación cruzada usando el coeficiente de determinación (R^2) y la estimación de los cuadrados medios del error (ECM), para determinar el mejor interpolador para la precipitación mensual en el departamento del Huila.
- Analizar el comportamiento espacial de la precipitación en el departamento del Huila.
- Identificar vacíos en la red climática del Huila con el fin de definir el número y la ubicación de nuevas estaciones climáticas.
- Identificar el número límite de estaciones climáticas necesarias para interpolar, conservando la significancia estadística para las áreas actuales.
- Generar la cartografía temática de la precipitación, en escenarios El Niño y La Niña, a escala mensual para el departamento del Huila, con resolución espacial de 1 km².

4. Antecedentes

4.1 Referente contextual

El departamento del Huila, hace parte en la región sur del área andina colombiana, está conformada por 37 municipios, localizados entre los 3°55'12" y 1°30'04" de latitud norte, y los 74°25'24" y 76°35'16" de longitud al oeste del meridiano (Figura 3), el departamento está ubicado geográficamente entre las cordilleras Oriental y Central, con un área de 19.900 km² (Huila, 2017). Además, posee gran capacidad de producción agrícola y pecuaria, el 53% del territorio es dedicado a la producción agrícola, con más de un millón de hectáreas destinadas a actividades agropecuarias (CAM, 2014). El departamento registró pérdidas en el sector agrario por 24.108 millones de pesos, que representan el 3.5% de la pérdida para el sector agrario a nivel Nacional, entre el año 2010-2011 a causa de excesos en la precipitación provocados por el fenómeno de La Niña (BID, CEPAL, 2012). Los resultados del presente estudio, resaltan la importancia de conocer la precipitación en eventos de variabilidad climática y anticipan la planificación agrícola, con la finalidad de realizar intervenciones en el sistema productivo y evitar pérdidas económicas a los productores del departamento del Huila.

El conocimiento del comportamiento del clima en general y de la precipitación es de importancia para la producción y productividad del sector agrícola; pues la distribución de la lluvia indica la presencia de periodos húmedos y secos, que son fundamentales en la planificación de labores agrarias, sociales y de gestión de riesgo, para un área específica. Sobre los anteriores referentes se genera la necesidad de conocer el comportamiento climático de la precipitación, para lo cual se define el uso de técnicas de interpolación como herramientas fundamentales, para predecir fenómenos en el espacio, y describir el comportamiento de la precipitación en el departamento del Huila. Portales et al. (2010), definió la precipitación como una variable climatológica de complejidad en su predicción, dependiendo del factor geográfico y topográfico que presente la zona, para lo cual la presente investigación incluye un modelo en donde se integra el modelo de elevación digital como técnica de comparación.

4.2 Metodologías de interpolación espacial

Múltiples técnicas de interpolación, se utilizan para generar un alcance sobre los espacios no muestreados para elementos climáticos entre estos:

- i. En México Núñez et al. (2013) realizaron una interpolación espacial con la técnica segmentaria o Spline en donde usó datos de precipitación media

mensual de 201 estaciones en la cuenca del río Bravo/Grande, el resultado explicó entre el 70 y 82% de la variación sobre la interpolación espacial.

- ii. Pérez et al. (2016) utilizaron la técnica Kriging ordinario y kriging universal para la región de Cuenca en Ecuador, usando el histórico 2003-2009 de la precipitación, determinaron que el interpolador kriging universal presenta un mayor ajuste sobre los valores anuales con temporalidad mensual.
- iii. La actividad *Definición de las zonas agroecológicas para la caficultura del Huila y ajustes en el sistema productivo* desarrollada por Cenicafe (Quiroga et al., 2017), usando metodologías de interpolación se definió el uso de la técnica Spline ajustada con el software Anusplin, usando el histórico de elementos climáticos como: precipitación, temperatura y brillo solar con temporalidad diaria con resolución espacial de 1km², generaron una predicción espacial de los anteriores elementos climáticos sobre la superficie cafetera del departamento del Huila.

Las metodologías de interpolación se han convertido en una importante herramienta de predicción climática, existen diversas metodologías de interpolación espacial entre estas:

4.2.1 Kriging ordinario

La técnica se utilizó por primera vez sobre el año 1960 para evaluar en campo yacimientos minerales. Según Díaz Viera et al. (2002), Kriging es un término al cual se le denomina como el “*mejor estimador linealmente insesgado*” de un punto y al mejor promedio lineal ponderado de un bloque; para Giraldo et al. 2002 Kriging como interpolador es definido como “*el conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción*”. Kriging como interpolador no determinístico, se utilizó en la investigación “Definición de las zonas agroecológicas para la caficultura del Huila y ajustes en el sistema productivo” desarrollada por Cenicafe (García et al., 2017), los autores generaron una rutina en Python que interpoló a nivel diario la precipitación, con resultados ajustados a los valores reales verificados mediante R² y validación cruzada de las variables interpoladas con resolución espacial de 1km².

4.2.2 Inverso ponderado de la distancia (IDW)

Jordan & bellifante realizaron un estudio para identificar la erosividad generada por la lluvia, su área de estudio fue el campo de Gibraltar en la provincia de Cádiz (España), la investigación determinó la precipitación mensual y genero su acumulado anual en el área de estudio, con el uso de los registros históricos de 109 estaciones pluviométricas integrados en el interpolador IDW. El uso del interpolador produjo 12 archivos ráster con la precipitación mensual, generando

así, la cartografía mensual de la erosividad de la lluvia, haciendo uso del índice de erosividad pluviométrica propuesto por Wischmeier (1959).

4.2.3 Interpolación segmentaria o Splines

Las funciones Spline están formadas por varios polinomios, cada uno definido en un intervalo y que se unen entre sí bajo ciertas condiciones de continuidad (Apaza et al., 2012). La técnica Spline fue usada por García et al. 2014, y generó la primera base para la recomendación regional para el cultivo de café en Colombia. Esta investigación utilizó el histórico climático de las estaciones de la FNC, e interpoló los elementos climáticos sobre una máscara cafetera con resolución espacial de 5 km², con el uso de la metodología Spline del software Anusplin (Hutchinson, 1997) y adaptado en su última versión 4.4 por Hutchinson & Xu, 2004.⁵

4.2.4 Estadística geofuncional

En el documento *Definición de las zonas agroecológicas para la caficultura del Huila y ajustes en el sistema productivo* desarrollada por Cenicafé, se integró esta técnica de interpolación desarrollada por Giraldo et al. (2012), que es un script completo usando el software R. En este trabajo se analizó una base de datos con el histórico climático del departamento del Huila con temporalidad diaria en escenarios El Niño oscilación sur (ENOS).

4.2.5 Empirical bayesian kriging

En la investigación *Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan* (2007), se utilizó la técnica kriging ordinario para generar la distribución espacial del contenido de materia orgánica. En la actividad de Zonificación Agroecológica desarrollada por (Quiroga et al., 2017) se adoptó la técnica de kriging ordinario e interpoló con la herramienta Empirical Bayesian Kriging del módulo Geostatistical Analyst de ArcGIS 10.3, como el mejor interpolador para la variable de materia orgánica, a partir de la validación cruzada de las interpolaciones y el uso del coeficiente de determinación (R²).

4.3 Referente normativo y legal

Como normativa el uso de la base de datos climática para el departamento del Huila fue solicitada al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), dicha solicitud se realizó de manera formal al (IDEAM) a través de su página web <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>. La información llegó en un archivo plano listo para depurar y parametrizar la Data Base Climática del departamento del Huila. Los ráster

⁵ Anusplin, ver 4.4, <http://fennerschool.anu.edu.au/files/anusplin44.pdf>

utilizados en la presente investigación se obtuvieron de la página oficial del SIGOT <http://sigotn.igac.gov.co/>, sobre la información espacial la mayor parte de la misma se trabajó y depuro mediante geoprocursos en el software ArcGIS Desktop: Release 10.2 Redlands, (ESRI, 2012).

5. Referente teórico

5.1 Bases climáticas parametrizadas

La Organización Meteorológica mundial (OMM), ha definido una serie de métodos para asegurar el control y la calidad de los datos en el documento “Directrices sobre la gestión de datos climáticos” desarrollado por la OMM en el año 2007; para Colombia el “Protocolo para el control de la Calidad de la Información meteorológica en las etapas de obtención, evaluación, verificación, cálculo y procesamiento” desarrollado en el año 2005 por IDEAM, basados en los criterios del investigador, permite ajustar las necesidades de uso de la información para depurar y parametrizar el histórico climático.

Los fenómenos conocidos como El Niño, La Niña - Oscilación del Sur - ENOS, son la causa de la variabilidad climática en la franja tropical del océano Pacífico, en la escala interanual. El Niño y su fase opuesta La Niña, son las componentes oceánicas del ENOS y corresponden, en términos generales, a la aparición en tiempo, de aguas superficiales más cálidas (El Niño) o más frías (La Niña) que es lo normal en el Pacífico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia. Para Maturana et al. 1997, El Niño Oscilación del Sur (ENOS), corresponde a un evento climático natural que se desarrolla en el océano Pacífico ecuatorial central, la fase cálida de ENOS conocida como El Niño se manifiesta, principalmente, por un aumento de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y una disminución de los vientos alisios en el lado este del océano Pacífico. Jaramillo et al. 2005 describe el fenómeno El Niño como ciclos climáticos definidos por la interacción entre la atmósfera y el océano pacífico. La temperatura media normal del océano se considera la temperatura media entre los años 1971 y 2000. Los eventos El Niño son generados por el incremento de la temperatura de al menos 0.5°C durante 3 meses consecutivos sobre la media normal en las aguas superficiales del océano pacífico sobre aguas del mar ecuatorial sobre la región 3.4, es un fenómeno recurrente pero no periódico y ocurre cada dos a siete años, generando hasta un 20% de reducción en la precipitación anual, una mayor exposición de brillo solar y un aumento en la temperatura, afectando especialmente los valles interandinos en Colombia, Jaramillo et al. (2005). Según Jaramillo et al. (2005), en los eventos La Niña ocurre un caso contrario donde el enfriamiento del océano Pacífico sobre las costas suramericanas presentan una fase fría de 0,5°C por debajo de la temperatura normal por al menos 3 meses consecutivos. (Figura 1), generando aumento en la nubosidad, aumento de la precipitación y disminución del brillo solar.

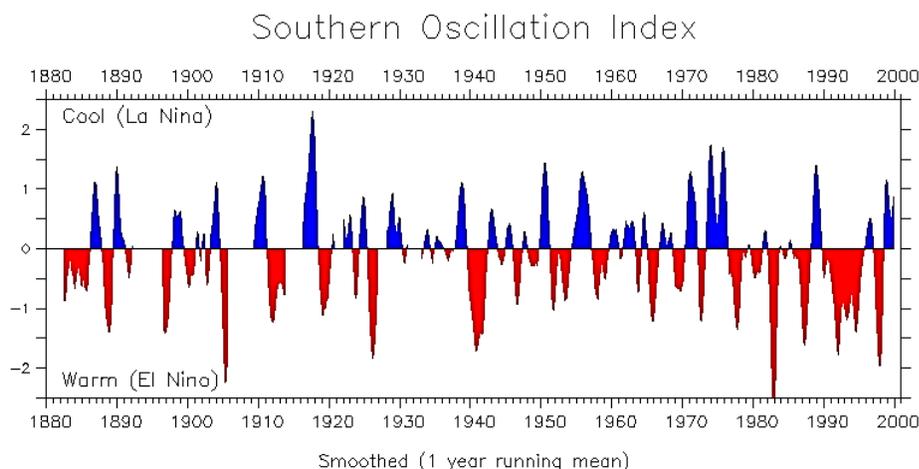


Figura 1. Desviaciones de temperatura de la superficie del océano Pacífico

La investigación *“Relación entre el Índice Oceánico de El Niño y la Lluvia, en la región Andina central de Colombia”* (Ramírez Builes & Jaramillo Robledo, 2009) determinó el comportamiento bimodal de la lluvia sobre los valles interandinos en Colombia, con valores máximos entre abril-mayo y octubre-noviembre, los cuales están asociados al paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), los vientos provenientes del Choco denominado “chorro del Choco”, contribuyen con las altas precipitaciones que se presentan entre septiembre y noviembre, sobre los 5° y 6° latitud Norte. Ramírez et al. 2009 identificó que los eventos El Niño tienen tendencia a desarrollarse en los periodos de abril a junio y alcanzan su máximo nivel durante los periodos de diciembre a febrero; para Poveda et al. (2001), los eventos El Niño típicamente se desarrollan sobre el curso de dos años calendario.

5.2 Precipitación

La precipitación es definida por la OMM, como “la precipitación de partículas líquidas de agua de diámetro mayor de 0.5 mm o de gotas menores, pero muy dispersas”, este elemento presenta una variabilidad espacial estrechamente relacionada con la altura; en valles interandinos este elemento sufre modificaciones en escenarios climáticos El Niño y La Niña además otros factores como el viento y su dirección; además Jaramillo en 2005 define un fenómeno climático denominado “efecto Foehn” que hace presencia en las cordilleras sobre los valles interandinos de la región colombiana.

Para Jaramillo et al. (2005), la precipitación hace referencia a “algún depósito de agua sólida o líquida proveniente de la atmósfera y, por tanto, es aplicable a la lluvia, nieve, granizo, rocío y neblina”. La lluvia en Colombia está influenciada por la Zona de Confluencia intertropical, los sistemas atmosféricos de la Amazonía y los sistemas atmosféricos del océano Pacífico; estos fenómenos

climáticos de escala mundial generan diferentes condiciones a escala nacional con especial influencia sobre los valles interandinos.

5.3 Vulnerabilidad del café en Colombia a eventos El Niño, La Niña.

Como ejemplos de variabilidad climática se tendrían sequías, inundaciones y las condiciones resultantes de los eventos de El Niño y La Niña Oscilación del Sur (ENSO), sobre la zona cafetera Colombia, dichos eventos producen cambios en la distribución y magnitud de elementos climáticos como la precipitación y el brillo solar, presentando alteraciones sobre las condiciones normales como: bajo efectos de eventos La Niña la precipitación se incrementa entre un 30% a un 50% y bajo las condiciones El Niño dicha variable se reduce entre un 8% y un 24%. (Ramírez et al., 2011).

Según Ramírez et al. 2011 la floración de los cafetos presenta una relación estrecha a condiciones de fotoperiodo, entre la distribución de periodos húmedos y secos, y cambios en la temperatura del aire. Las condiciones ambientales regidas bajo el evento El Niño se caracterizan por el incremento del número de días de déficit hídrico, aumento en el brillo solar y la temperatura, debido entre otras a la disminución de la nubosidad, lo que traduce condiciones favorables para la floración de los cafetos traducida bajo condiciones favorables de otras variables como el suelo y la capacidad de retención de humedad pueden presentar una mejor producción del cultivo, condición contraria bajo eventos La Niña donde el ambiente presenta características como reducción del déficit hídrico, disminución del brillo solar y la temperatura, condiciones que generan disminución en la floración de los cafetos presentando una menor producción en el cultivo.

El recurso hídrico en exceso como en déficit presenta restricciones en el cultivo de café, la sobresaturación del suelo asociada a excesos en la precipitación limita el crecimiento del sistema radical generando así cafetos con deficiencias nutricionales, defoliación, paloteo, baja producción y calidad del grano; caso contrario en déficit hídrico asociado a las bajas precipitaciones sobre la zona cafetera pueden generar daños en la cosecha, definidos en temporalidad con etapas de floración o llenado de fruto, produciendo pasillas, flotes o granos parcialmente formados. (Peña et al., 2012)

5.4 Análisis exploratorio de datos (AED)

La finalidad del Análisis Exploratorio de Datos (AED) es examinar los datos previamente a la aplicación de cualquier técnica estadística. De esta forma el analista consigue un entendimiento básico de sus datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas. El AED “proporciona métodos sencillos para organizar y preparar los datos, detectar fallos en el diseño y recogida de datos, tratamiento y evaluación de datos ausentes, identificación de casos atípicos y

comprobación de los supuestos subyacentes en la mayor parte de las técnicas multivariantes.” (Salvador & Gallardo, 2003) El uso de esta técnica permite al investigador determinar: agrupamientos, la normalidad, gráficas y distribución adecuadas para presentar en la investigación.

El primer paso consiste en realizar un análisis estadístico descriptivo, gráfico y numérico de las variables del problema, con el fin de tener una idea inicial de la información contenida en el conjunto de datos, así como detectar la existencia de posibles errores en la codificación de los mismos. El tipo de análisis a realizar depende de la escala de medida de la variable analizada. Se sugieren las representaciones gráficas y resúmenes descriptivos numéricos más aconsejables para realizar dicho análisis. (Salvador y Gallardo, 2003)

Una segunda parte del AED consiste en identificar la forma y distribución de la variable. Si la variable analizada es continua o discreta con un elevado número de valores distintos se tabula como una distribución de frecuencias agrupadas y se representa gráficamente mediante histogramas, diagramas de tallos y hojas y boxplots con el fin de estudiar la forma de la distribución y analizar, en particular, la posible existencia de varias modas en la misma que pongan de manifiesto la presencia de diversos grupos homogéneos en la muestra. Finalmente, el AED presenta el estudio de la normalidad de la variable, muchos métodos estadísticos se basan en la hipótesis de normalidad de la variable objeto de estudio. De hecho, si la falta de normalidad de la variable es suficientemente fuerte, muchos de los contrastes utilizados en los análisis estadístico-inferenciales no son válidos. Incluso aunque las muestras grandes tiendan a disminuir los efectos perniciosos de la no normalidad, el investigador debería evaluar la normalidad de todas las variables incluidas en el análisis. (Salvador & Gallardo, 2003)

Existen varios métodos para evaluar la normalidad de un conjunto de datos que pueden dividirse en dos grupos: los métodos gráficos y los contrastes de hipótesis. Contrastes muy utilizados son los test de asimetría y curtosis cuyos estadísticos muestrales vienen dados por:

$$z_{\text{asimetria}} = \text{asimetría} / \text{raíz}(6/N)$$

$$z_{\text{curtosis}} = \text{curtosis} / \text{raíz}(24/N)$$

donde N es el tamaño muestral. Si es cierta la hipótesis de normalidad ambos se distribuyen asintóticamente según una N (0,1).

5.5 Validación de resultados

La validación cruzada (Cross validation) consiste en usar todos los datos muestrales para estimar el modelo de auto correlación, en donde a cada paso se remueve un dato muestral de la base de datos y luego se predice con el resto de la muestra, y finalmente se compara el valor predicho de ese punto con el valor observado. En el estudio de Pérez Paredes et al. (2016) se realizó validación

cruzada entre las metodologías para evaluar la efectividad de las interpolaciones; en la actividad *Definición de las zonas agroecológicas para la caficultura del Huila y ajustes en el sistema productivo* desarrollada por (García et al., 2017), se realizó una validación cruzada de metodologías con kriging ordinario, estadística geofuncional y anusplin, para definir qué interpolador presentó el mejor interpolador, bajo la supervisión del criterio experto; el 20% de la base de datos se utilizó para la validación.

La técnica **Prediction standar error** del software ArcGIS, utiliza los resultados de la herramienta Cross Validation y genera un mapa temático que presenta los rangos de errores, este mapa permite verificar las zonas que presentan menor ajuste en la predicción.

La técnica kriging del Software ArcGIS usa la **validación**. Se divide la muestra en dos partes, una parte se utiliza como probador (test dataset), y la otra (training dataset) se utiliza para calcular la tendencia y la autocorrelación a utilizarse en la predicción. En la ciudad de Manizales, para determinar la magnitud e intensidad de la lluvia para el año 2008, Cortés C. et al. 2009, realizaron interpolaciones y analizaron el ajuste con la técnica de validación Error Cuadratico Medio (ECM).

6. Materiales y métodos

6.1 Información de referencia metodológica y diseño de Investigación

El enfoque de esta investigación es mixto, pues combina características cuantitativas que permiten definir y medir la precipitación, a su vez la precipitación es un fenómeno que se mueve en escenarios de variabilidad climática con características que se pueden definir de manera cualitativa. El diseño de la investigación Determinación de la mejor técnica de interpolación espacial para predecir la precipitación mensual en el departamento del Huila, es de tipo experimental, pues mediante el uso capas climáticas con base en el uso de la precipitación mensual acumulada para el departamento del Huila, y tomando como medidas de control los datos reales versus los simulados, se pudo referenciar mediante estadísticos de validación, los valores que presentan las predicciones medidas en la investigación, realizando el control y validez de las metodologías presentadas por el investigador.

6.1.1 Tipo de investigación

Este trabajo presenta dos tipos de investigación, una de tipo descriptivo, en donde se propuso con los resultados de la interpolación, generar una descripción para la precipitación mensual, para los escenarios Neutro, El Niño y La Niña. El otro tipo de investigación es correlacional, donde mediante el uso de técnicas de validación, se determina que interpolador presenta la mejor predicción de la precipitación a escala mensual; además se genera la descripción del comportamiento climático de la lluvia para el departamento y los cambios que presenta la variable en escenarios de variabilidad climática.

6.1.2 Muestra, área y población de trabajo

Esta investigación es de tipo cuantitativo, donde se usan mediciones de la precipitación a escala mensual en estaciones climáticas de IDEAM. El muestreo usado fue probabilístico seleccionando las submuestras de forma aleatoria simple, con el uso de la función RAND en el software Excel del paquete de Microsoft office.

La población se generó con la depuración de la base de datos climática obtenida del IDEAM. Definida la base de datos a integrar en los modelos de interpolación, se requirió que la entrada de datos a estimar tenga un orden según el interpolador que se vaya a utilizar; además se integró el uso de la máscara del departamento del Huila obtenida de un modelo de elevación digital (DEM), para atribuir los valores de la interpolación con resolución espacial de 1km². La programación de las líneas de código de las metodologías de interpolación, requirió organizar los scripts de

predicción, según la metodología indicada por cada autor y el requerimiento del software.

El área de trabajo está constituida en el espacio geográfico del departamento del Huila, después de tener el espacio geográfico se procede a generar la ubicación espacial de las estaciones climáticas, en donde se realizó la verificación de la ubicación geográfica de cada una de las estaciones de la red climática IDEAM (Figura No. 2)

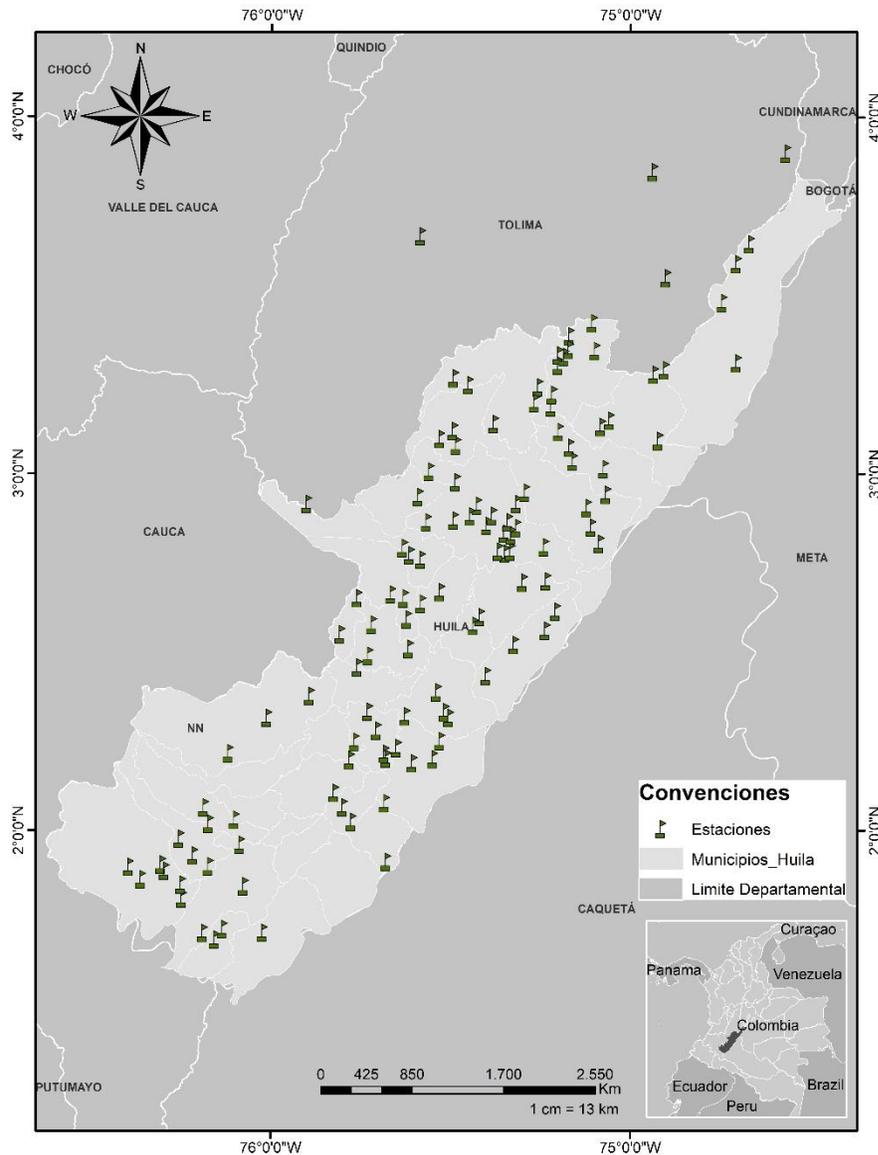


Figura 2. Georreferenciación de las estaciones climáticas

6.2 Información e insumos para realizar las metodologías de interpolación

6.2.1 Información climática y parametrización de la base de datos

Para obtener el catálogo de las bases de datos climáticas se procedió a generar el registro del usuario en la página web oficial del IDEAM, obtenido en <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Usuarios&lTipo=usuario&lFuncion=login&>, para generar una solicitud oficial de las estaciones con el histórico de la precipitación a nivel diario, se siguen los pasos indicados en la siguiente dirección web <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>, donde la información obtenida es de libre acceso y se entrega en medio magnético en un archivo comprimido por correo electrónico. La información entregada se describe en la Tabla 1. Esta información es necesaria para generar una base de datos robusta para validar las metodologías e integrar los datos en las interpolaciones de la precipitación.

Tabla 1. Selección de estaciones climáticas catálogo IDEAM

Estaciones Departamento del Huila	
Categoría	
Agrometeorológica	6
Climatológica Ordinaria	35
Climatológica Principal	10
Limnigráfica	28
Limnimétrica	35
Pluviográficas	13
Pluviométricas	117
Sinóptica Secundaria	1
Total	245

Luego de obtener la información del histórico climático del departamento del Huila, se procedió a depurar y parametrizar, utilizando los registros históricos desde el año 1930 hasta el año 2017 bajo el protocolo de calidad (IDEAM, 2015), se ajustó con el criterio de uso de al menos 15 años de histórico y con al menos 330 días de información por año. Bajo los criterios anteriormente nombrados se depuraron las estaciones climáticas que no cumplieron con los siguientes parámetros:

1. Estaciones poseedoras de continuidad temporal a 15 años.
2. Estaciones que integran la precipitación en sus bases de datos.
3. Regularidad en la información

Establecidos los parámetros para la selección de las estaciones, se usaron 116 estaciones que cumplieron los requisitos y 4 sobre el departamento del Tolima con

la finalidad de mejorar la predicción espacial, teniendo en cuenta que los criterios orográficos de las estaciones del Tolima presentan continuidad geográfica y altitudinal similar a las del departamento del Huila (Figura 2).

Para generar la base de datos Climática en escenarios Neutro, La Niña y El Niño, con base en el histórico de la Información climática, se utilizó la información de la precipitación diaria obtenida en cada una de las estaciones IDEAM solicitadas (Anexo 1 al 3).

La metodología para la obtención de los datos se describirá a continuación:

1. Ajustar los datos enviados que son archivos planos en formato .txt en Excel
2. Con el uso del paquete Office se desplegó la información del archivo de texto en un libro de Excel delimitado por comas.
3. Se realizó una minería de datos para eliminar los NA, que son datos faltantes, perdidos o erróneos, los datos negativos y datos fuera de los rangos permitidos por la variable.
4. Se realizó un análisis de los datos faltantes con el uso de tablas dinámicas en Excel, se procedió a ubicar las estaciones con mayoría de datos faltantes para excluirlas de la actividad.
5. Con las estaciones seleccionadas se genera la primera base datos.
6. Después de tener seleccionadas las estaciones se procede a ubicar la información diaria por estación con la temporalidad anual, utilizando el percentil 70 a nivel diario para los 365 días del año.
7. Con el set de datos diarios del percentil 70 metodología de la OMM, se generó la base de datos climática por escenarios climáticos Neutro, El Niño y La Niña.
8. Luego de generar la base climática a nivel diario se procedió a generar los acumulados mensuales en escenarios descritos en Índice climático (ONI) 6.2.2.
9. Con la base climática, definida por escenarios climáticos se procedió a realizar la predicción con el escenario Neutro, para definir el interpolador.

6.2.2 Índice climático (ONI)

La obtención del índice se realizó a través de la página web del servicio Climático de los Estados Unidos (NOAA) http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products//ONI_v5.php, la página despliega un índice mensual que presenta los periodos húmedos en color azul que corresponden a escenarios climáticos La Niña y los periodos secos en color rojo que corresponden a escenarios climáticos El Niño y en gris los periodos Neutro desde el año 1955. Estos escenarios se adaptaron con ayuda de tablas en Excel, utilizando las fechas de los eventos e integradas a la base climática acumulando los datos mensuales. La obtención de una base de datos con el índice climático nos permitió identificar los periodos Neutro, El Niño y

La Niña, con la finalidad de generar tres bases de datos para comparar los resultados mensuales de las interpolaciones por escenario climático.

6.2.3 Información orográfica

Las características orográficas del Huila como la elevación y la pendiente, fueron obtenidas de la página web del servicio geológico de los Estados Unidos <https://earthexplorer.usgs.gov/>, donde es posible obtener la información en formato ráster de libre uso. La información obtenida fue: el modelo de elevación digital (DEM) de 1km² para Colombia, este modelo de elevación se verificó contra las alturas de los datos reales tomados por IDEAM que presentan las estaciones climáticas, esta información permitió utilizar la altitud como covariable en la rutina de interpolación Cokriging. La metodología para obtener el Modelo de elevación digital para el departamento del Huila (Figura 3) se describirá a continuación:

1. Insumos: Shape departamental del Huila de IGAC
Modelo de Elevación Digital (DEM) de Colombia de 1km² de USGS
ArcGIS, ArcMap, Licenciado, ESRI, Universidad de Manizales
2. Con la función de geoproceto “extract” del software ArcGIS, se realiza una extracción del DEM sobre el Shape del departamento del Huila
3. El resultado generado es el archivo tipo ráster con el modelo de elevación digital para el departamento del Huila con resolución espacial de 1 km².

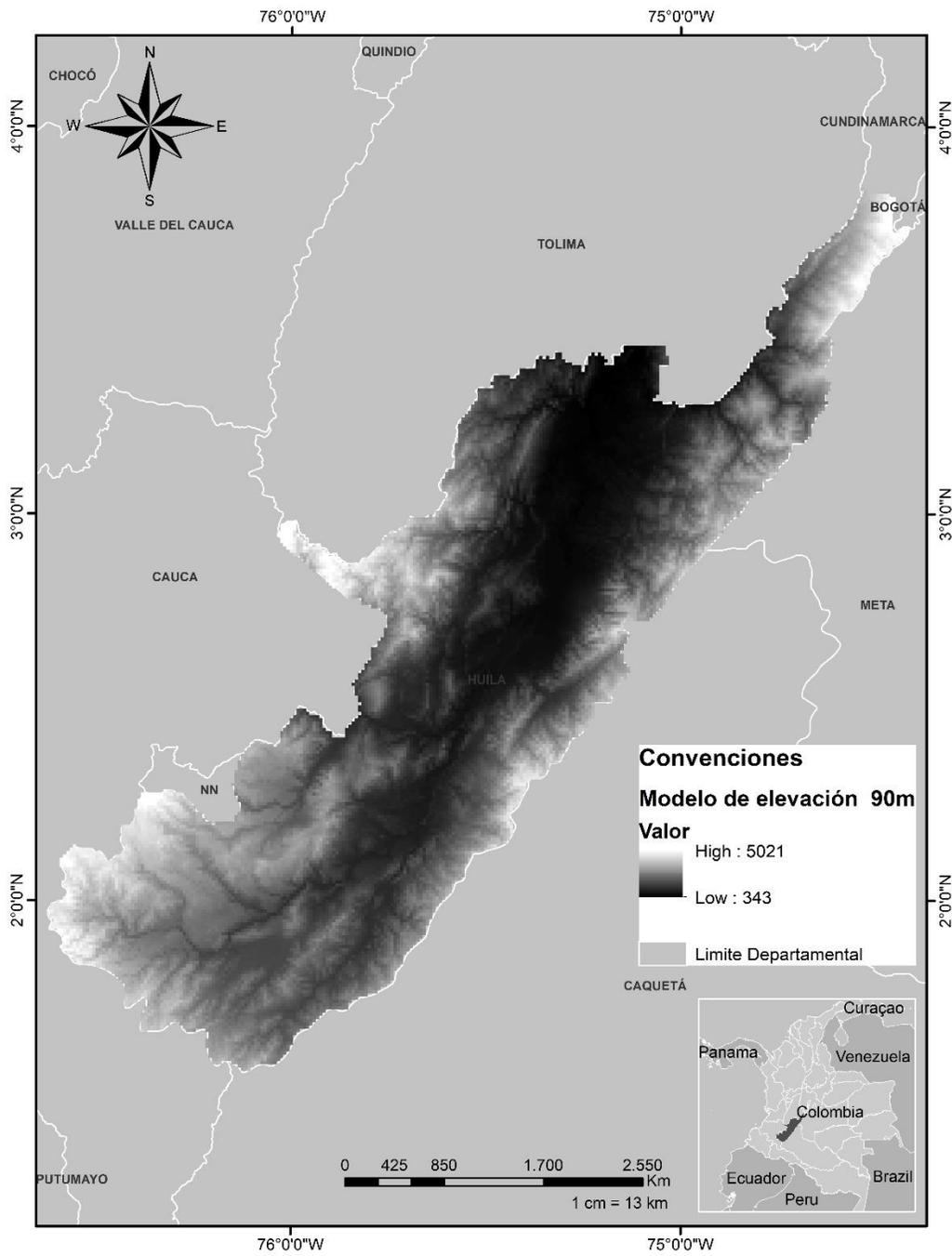


Figura 3. Modelo de Elevación Digital departamento del Huila

6.2.4 Información de estaciones por ecorregión

Con el fin de mejorar la interpolación, el área de interpolación se segmentó bajo criterios estadísticos, orográficos y biofísicos. Lo anterior definió fraccionar el área de trabajo en ecorregiones. La Tabla 2 presenta el valor promedio mensual de las estaciones por ecorregión, las ecorregiones se segmentaron de la siguiente manera:

Tabla 2. *Promedios de precipitación por Ecorregiones dpto. Del Huila*

Ecorregión	Promedio de precipitación (mm)	% (+/-) precipitación
Ecorregión 1. Cordillera Central	1591.46	0
Ecorregión 2. Cordillera Oriental	1157.96	-37%
Ecorregión 3. Macizo Colombiano	2021.48	+27%

La ecorregión 1 se caracteriza por presentar un promedio de 1591 mm en su precipitación acumulada, posee 49 estaciones climáticas, además está ubicada sobre la margen izquierda de la vertiente del río Magdalena, especialmente distribuida sobre el margen Occidental de la cordillera Central e iniciar en el sur del departamento en el municipio de La Plata, en la figura 4 se encuentra en color verde. La ecorregión 2 presenta el promedio de precipitación más bajo con 1157 mm (Tabla 2), tiene 49 estaciones climáticas, está ubicada geográficamente sobre la margen derecha del río Magdalena, sobre la vertiente occidental de la cordillera Oriental y está distribuida desde el sur del departamento en el municipio de Altamira, representada en color amarillo en la Figura 4. Finalmente, la tercera ecorregión muestra una mayor precipitación, con un promedio de 2021 mm y 18 estaciones climáticas, está ubicada sobre la zona del macizo colombiano, esta ecorregión cubre el nacimiento del río Magdalena hasta encontrar límites sobre su norte con los municipios de Altamira y La Plata, presenta una tonalidad roja (Figura No. 4).

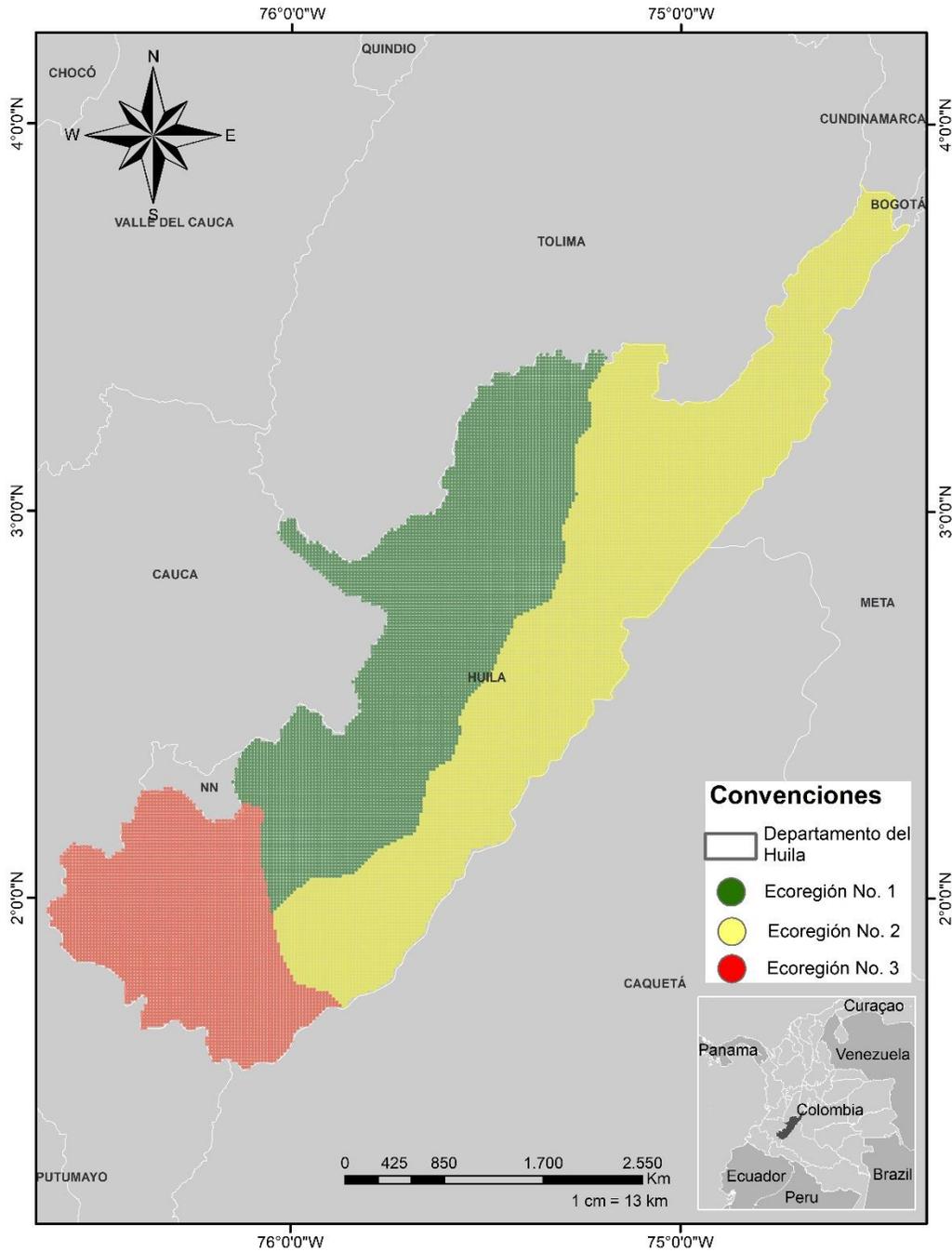


Figura 4. Ecorregiones departamento del Huila

Se generó la selección de 116 de las estaciones climáticas para interpolar la precipitación mensual bajo criterios de OMM y del investigador, el principio de la interpolación requirió utilizar las estaciones que están presentes en las ecorregiones climáticas mencionadas en 6.2.3., con el uso de la herramienta Join

Spatial del software ArcGIS se obtuvo el número y ubicación de las estaciones que corresponden a cada ecorregión (Figuras 5 a 7).

- A su vez para realizar la validación de las metodologías de interpolación propuestas, se requiere identificar el número límite de estaciones climáticas necesarias para interpolar sin afectar la significancia estadística, mediante la disminución de la cantidad de estaciones por ecorregión en un 5%, 10%, 20% y 30% (Tabla 3).

Tabla 3. *Estaciones totales por ecorregión y estaciones de validación.*

Ecorregión	Estaciones Totales	(5%)	(10%)	(20%)	(30%)
Central	49	3	5	10	15
Oriental	49	2	5	10	15
Macizo	18	1	2	4	6
Total	116	6	12	24	36

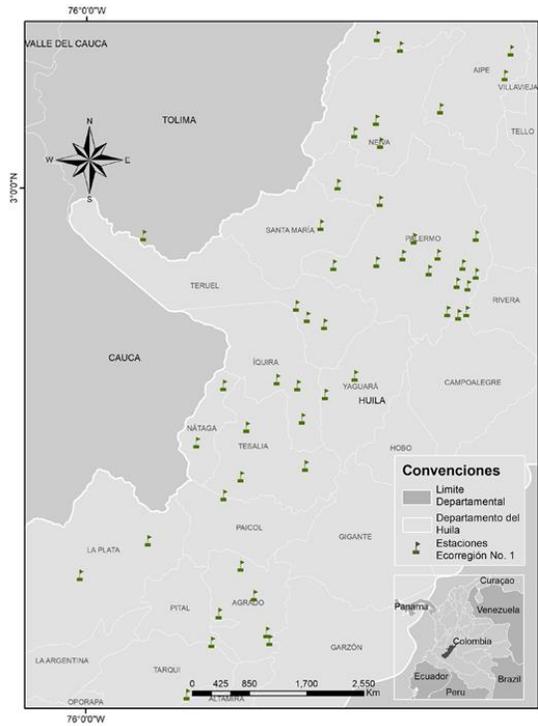


Figura 5 Estaciones ecorregión 1

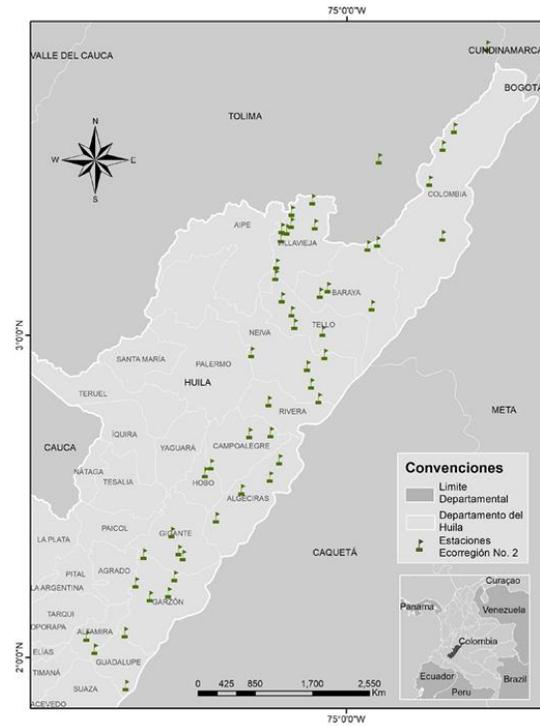


Figura 6 Estaciones ecorregión 2

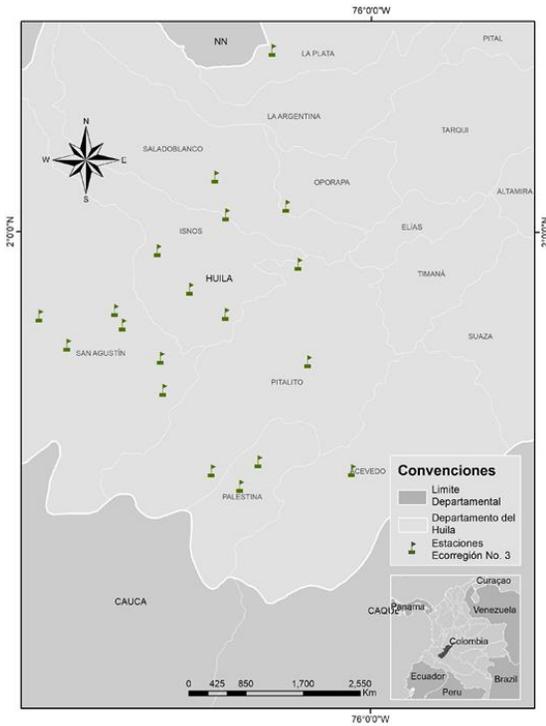


Figura 7 Estaciones ecorregión 3

6.2.5 Información de máscaras para realizar la interpolación

Se generaron 3 máscaras tipo ráster para realizar la interpolación utilizando el modelo de elevación digital (DEM) para el departamento del Huila, obtenido en 6.2.2, con la finalidad de asignar sobre éste los resultados de la interpolación. La metodología para generar los archivos ráster de las ecorregiones es la siguiente:

1. Insumos: Modelo de elevación digital para el departamento del Huila, generado en 6.2.3.
Shape Ecorregiones segmentado por la vertiente del río Magdalena y el macizo colombiano 6.2.4.
2. Con la función de geoproceto “extract” del software ArcGIS, se realiza una extracción del DEM sobre el Shape de Ecorregiones
3. El resultado generado es el archivo tipo ráster con 3 atributos por zona para el departamento del Huila con resolución espacial de 1 km².
4. Con la función “select by attributes” se seleccionan cada una de las regiones y se extrae en un archivo individual, generando así tres máscaras con la misma resolución espacial segmentada por el concepto de ecorregiones como aparece en las figuras 8, 9 y 10.

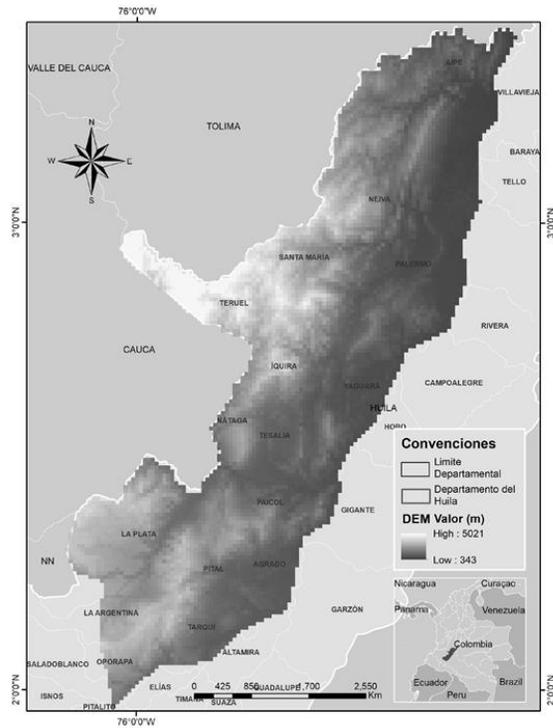


Figura 8 Máscara ecoregión 1

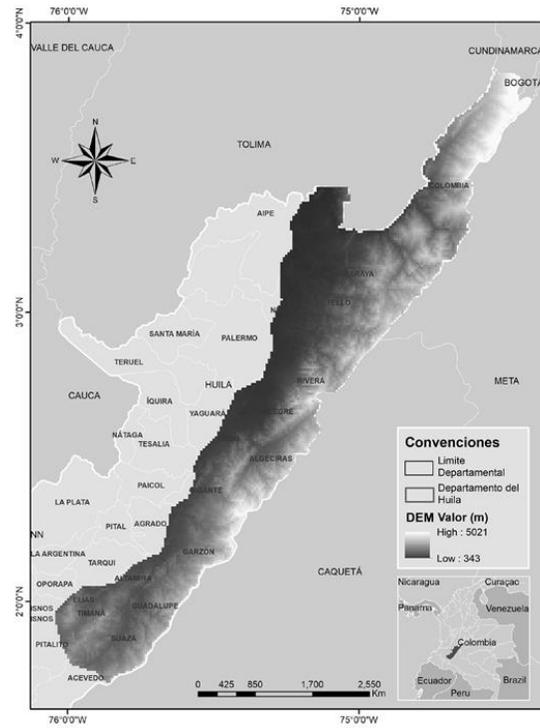


Figura 9 Máscara ecoregión 2

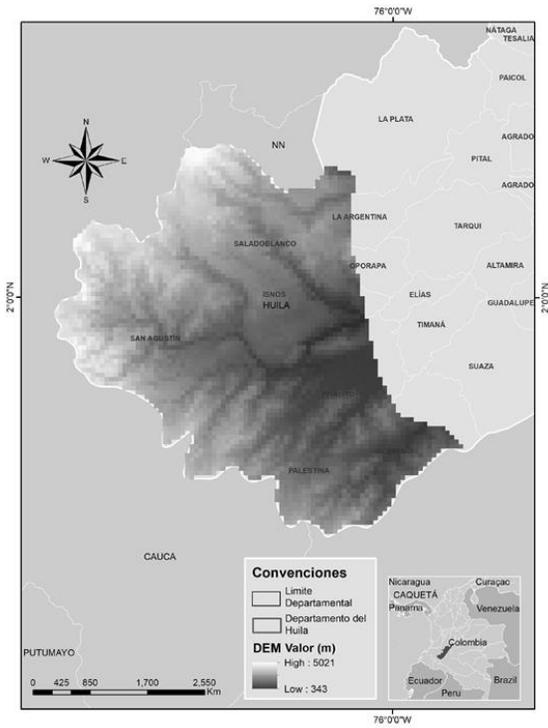


Figura 10 Máscara ecoregión 3

6.2.6 Información y principios para interpolar

Como principios fundamentales, se realizaron una serie de pasos previos a interpolar, como la depuración, normalización de la base de datos, previamente realizada en 6.2.1, como el primer procedimiento para iniciar el análisis de la base de datos resultante, luego se generan estadísticos de validación de tendencia de la variable, un análisis del patrón espacial de la variable y los semivariogramas por ecorregión, con el fin de reconocer el comportamiento de la variable a nivel espacial y mejorar la interpolación.

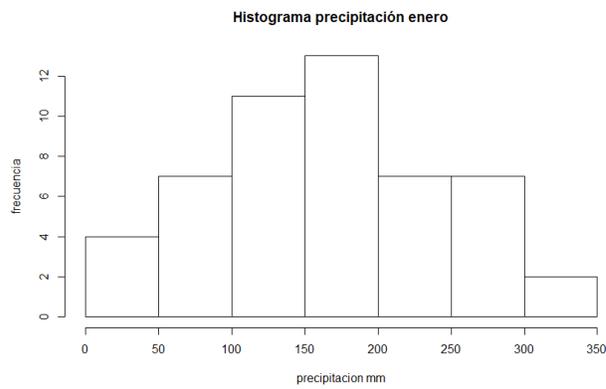
6.2.6.1. Análisis exploratorio de datos

El previo conocimiento de las variables de interpolación, para nuestro caso la precipitación mensual (Anexo 1), sobre esta base de datos se realizó el análisis exploratorio, que incluye la estadística descriptiva de la variable a escala mensual y los histogramas de frecuencia, para cada una de las estaciones discriminadas por ecorregión. Las figuras 11 la 16, y la Tabla 4 presentan los análisis exploratorios.

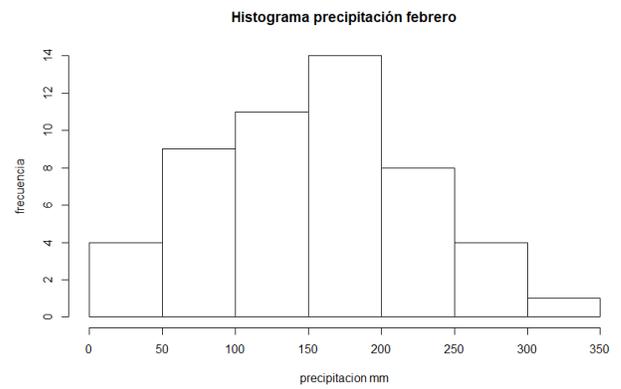
Revisados los resultados estadísticos, se procedió analizar la continuidad espacial de la precipitación y se realizaron las interpolaciones de las 4 metodologías propuestas, para organizar la predicción de los interpoladores: Empirical bayesian kriging, Ordinary Kriging, Inverse weighted of distance y Cokriging.

Tabla 4. *Estadística descriptiva mensual departamento del Huila.*

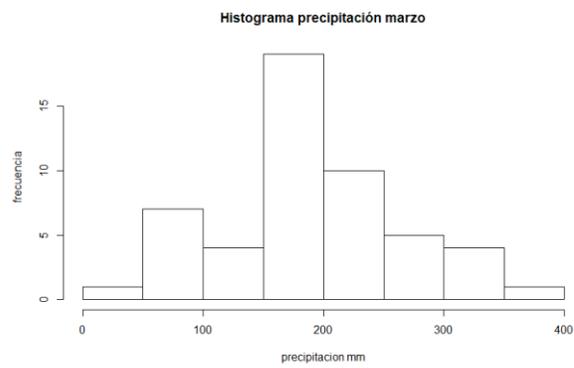
Ecorregión No. 1												
Item	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Min.	34.6	19.7	40.6	29.6	10.2	1.2	0	0	1.8	72.8	63	47.85
1st Qu.	110.3	96.66	166.8	94.24	55.66	8.43	4.695	1.155	16.7	143.4	223.7	167.15
Median	164.1	151.8	190.3	150.4	84.1	22.64	13.98	4.75	31.8	177.1	261.6	227.6
Mean	165.1	153.9	189.3	156.88	100.3	37.26	24.795	15.62	39.01	182.1	281.7	211.66
3rd Qu.	212.6	199.05	224.2	204.59	136.18	52.59	33.135	23.465	52.02	203.2	354.1	264.5
Max.	338.8	302.6	354.8	343.64	259	169.38	128.9	95.3	148	329.5	455.8	381.74
Ecorregión No. 2												
Min.	16.6	12.1	30	27.74	12	0	0	0	1.2	49.3	58.2	32.3
1st Qu.	45.56	46.01	76.5	68	44.36	13.25	10.36	1.78	11.71	93.12	164.7	88.73
Median	70.44	74.74	111.3	103.4	98.05	50.31	32.13	17.89	35.16	131.78	189.3	112.44
Mean	78.5	74.14	109.9	112.77	103.25	70.96	55.03	37.06	48.05	140.27	202.3	126.02
3rd Qu.	108.04	89.74	142.3	151.74	144.56	99.72	65.71	47.69	65.46	185.38	242.9	153.67
Max.	232.48	256.12	198.8	253.14	356.03	414.07	414.24	312.72	234.17	263.84	370.7	378.58
Ecorregión No. 3												
Min.	55.4	60.38	108.2	122.3	159.7	155	130.7	101	78.53	106.7	109.7	84.64
1st Qu.	79.64	96.21	144.6	156.1	179	202.8	167.2	127.7	91.12	132	140.7	123.57
Median	90.5	107	158.8	190	217.9	237.8	208.2	156.9	113.25	152.7	157.1	135.2
Mean	104.19	114.26	167.9	190.4	217.5	244.5	206.3	158.9	121.68	166.2	170.2	140.04
3rd Qu.	118.65	119.44	181.1	228.6	253.4	294.7	236.8	188	138.65	187.1	191.8	149.25
Max.	199.2	227.8	279.3	244.2	280.5	330.4	290.5	250.3	197.9	319.5	308.4	257.5



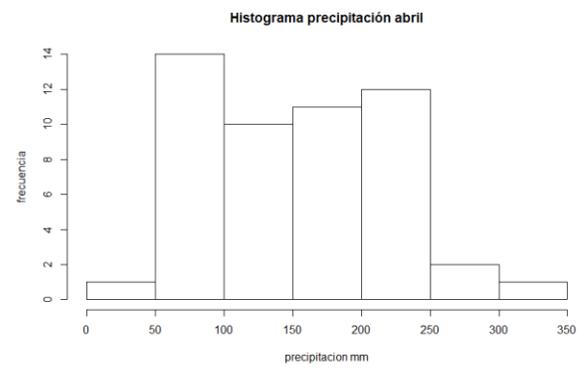
Mes 1



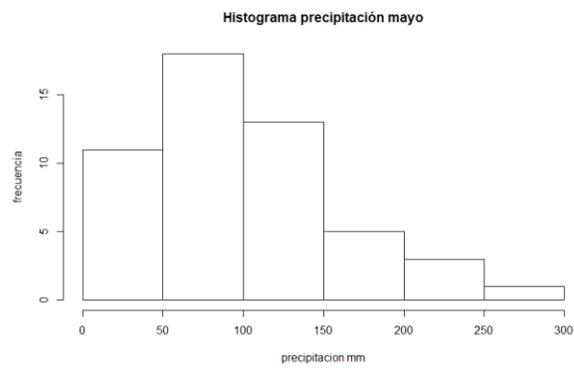
Mes 2



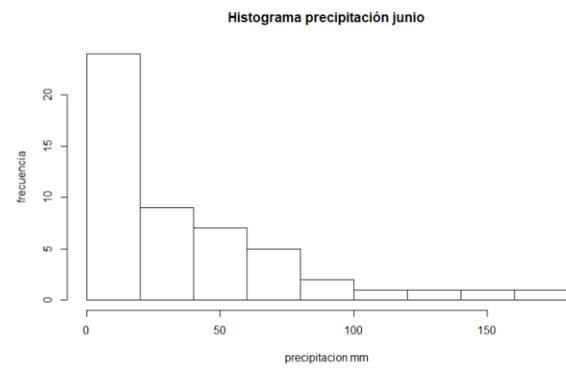
Mes 3



Mes 4



Mes 5



Mes 6

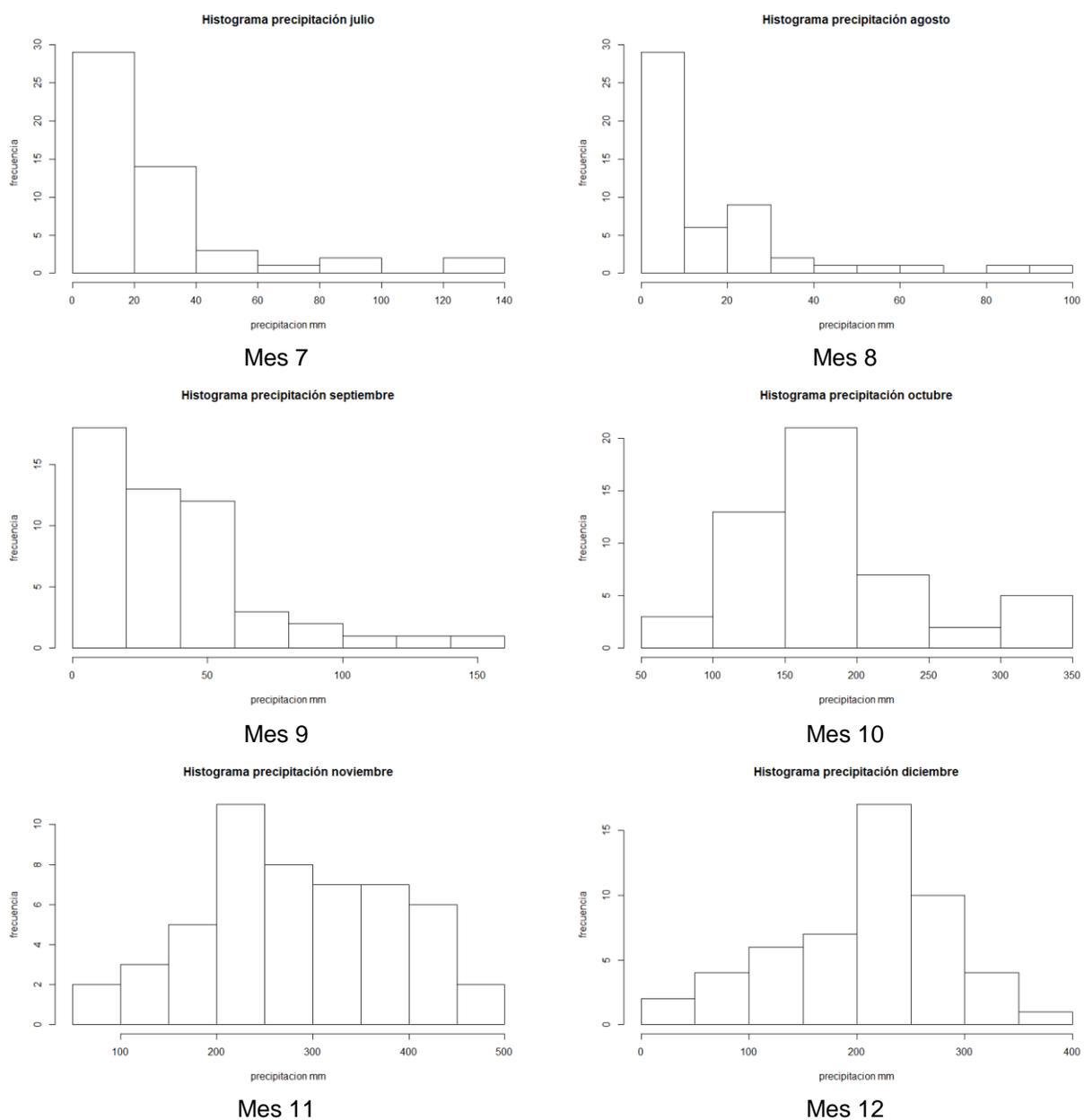
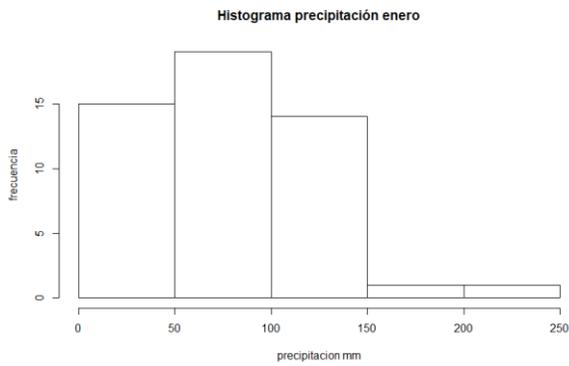
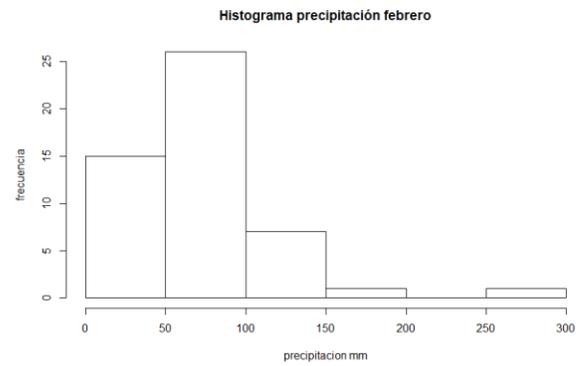


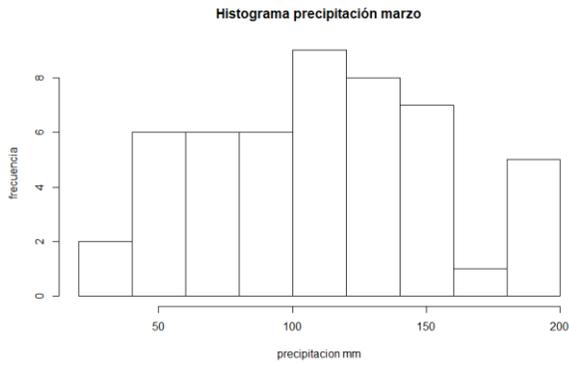
Figura 11. Histograma de frecuencias precipitación mensual Ecorregión 1.



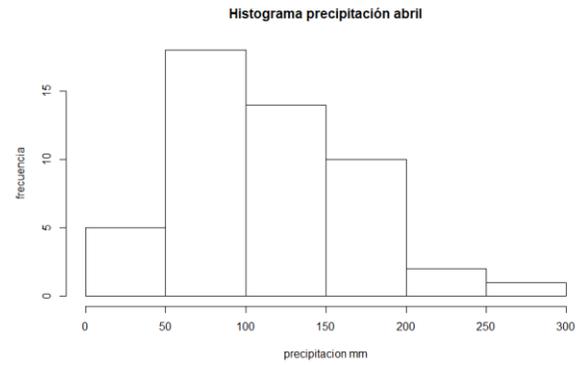
Mes 1



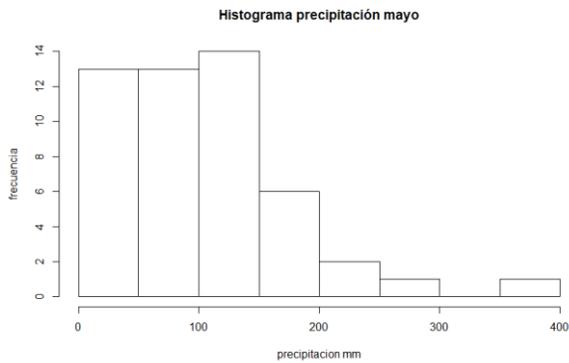
Mes 2



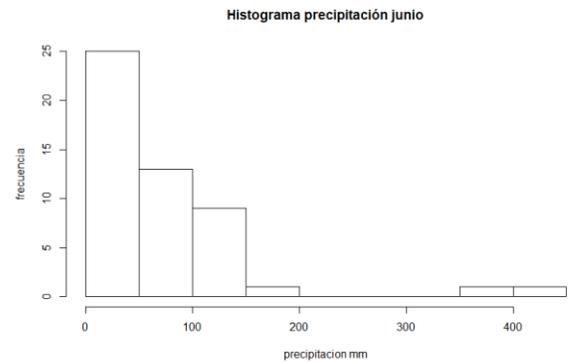
Mes 3



Mes 4



Mes 5



Mes 6

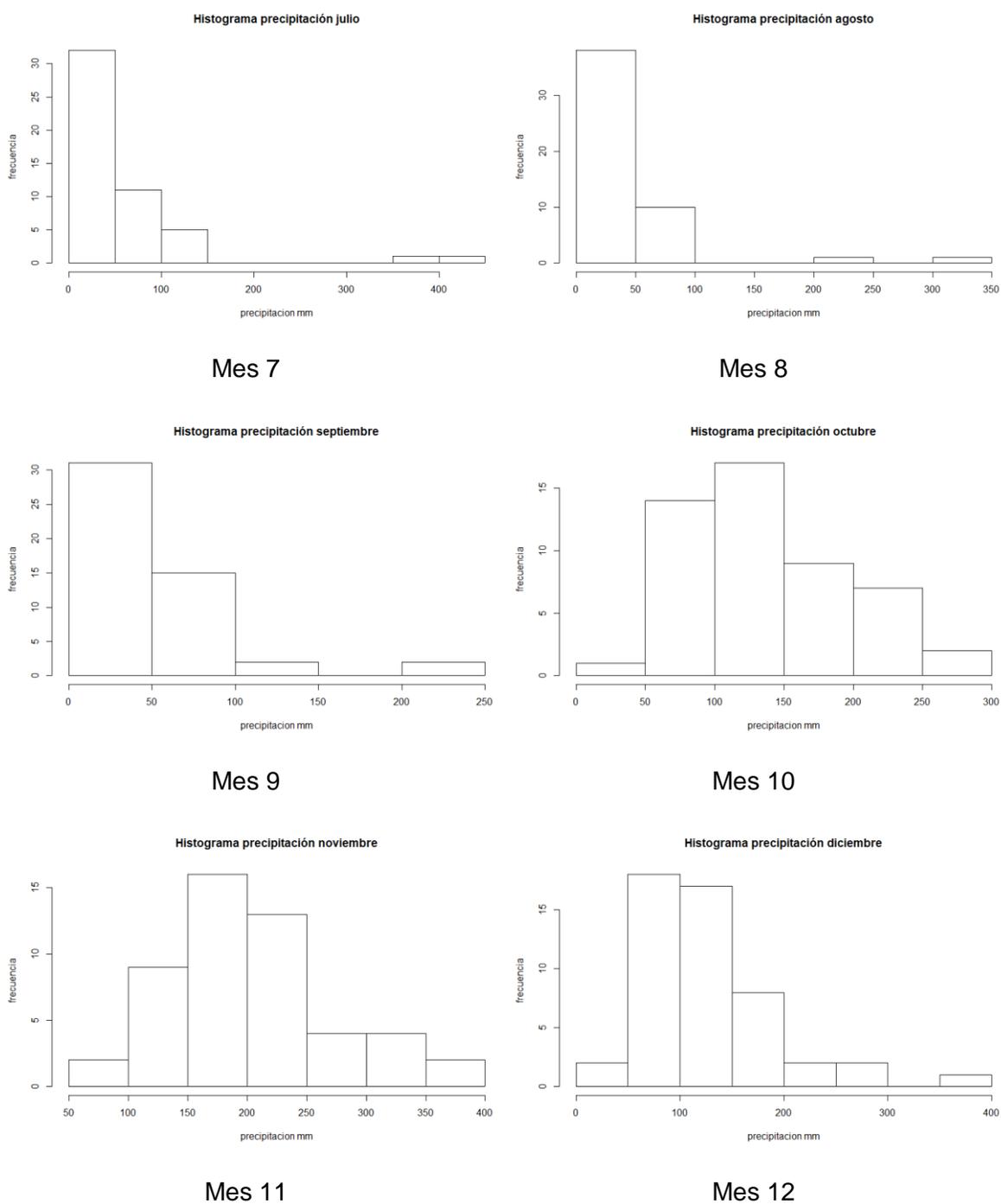
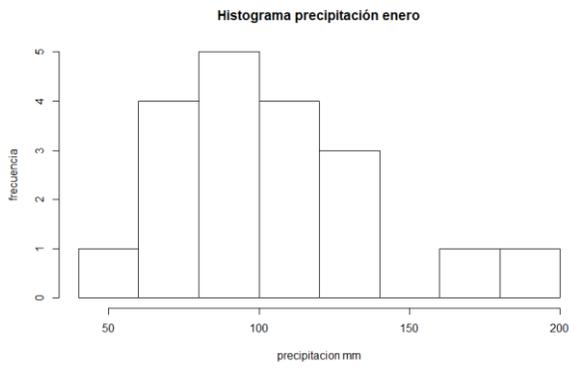
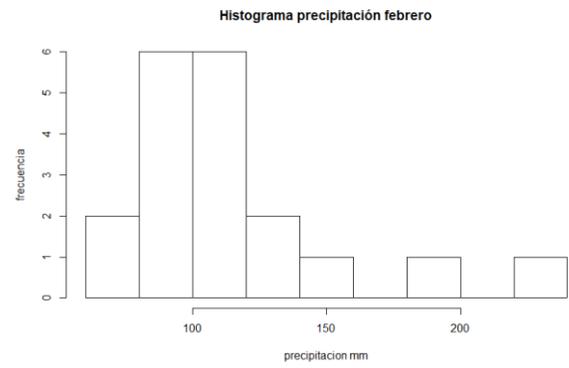


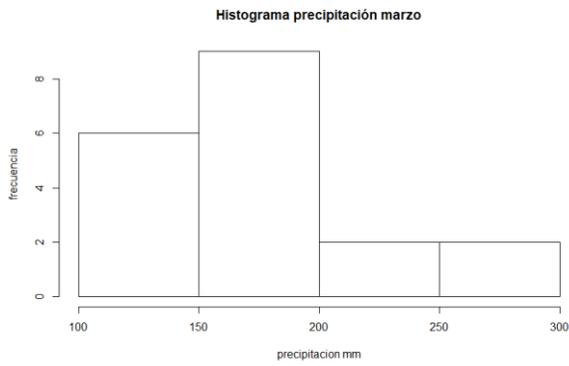
Figura 12. Histograma de frecuencias precipitación mensual Ecorregión 2.



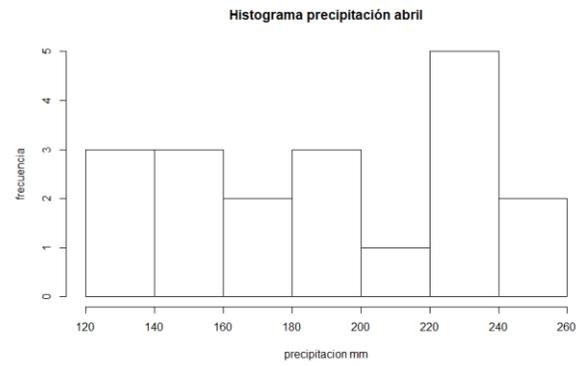
Mes 1



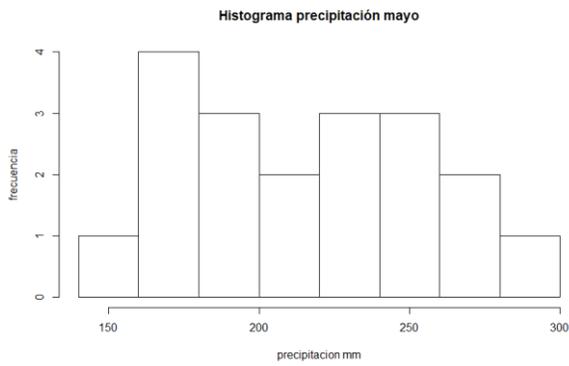
Mes 2



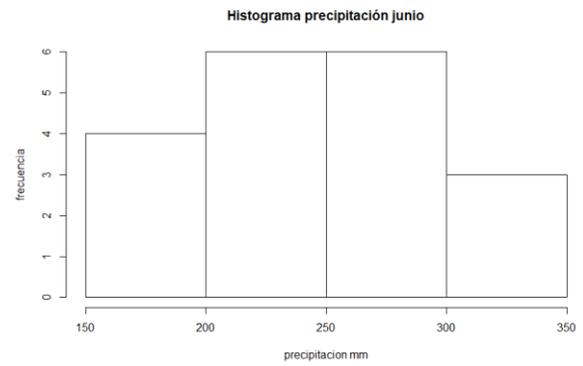
Mes 3



Mes 4



Mes 5



Mes 6

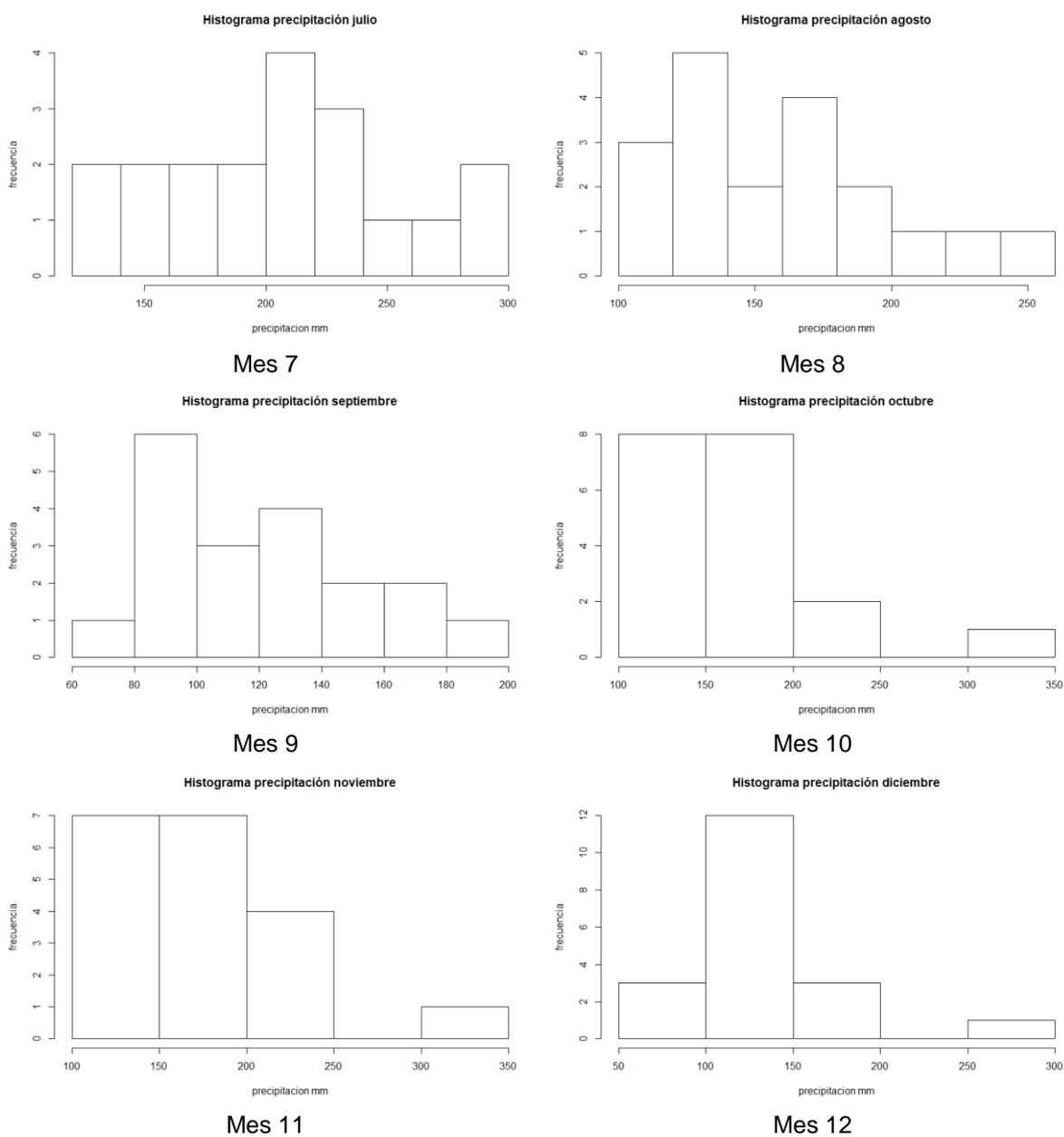


Figura 13. Histograma de frecuencias precipitación mensual Ecorregión 3

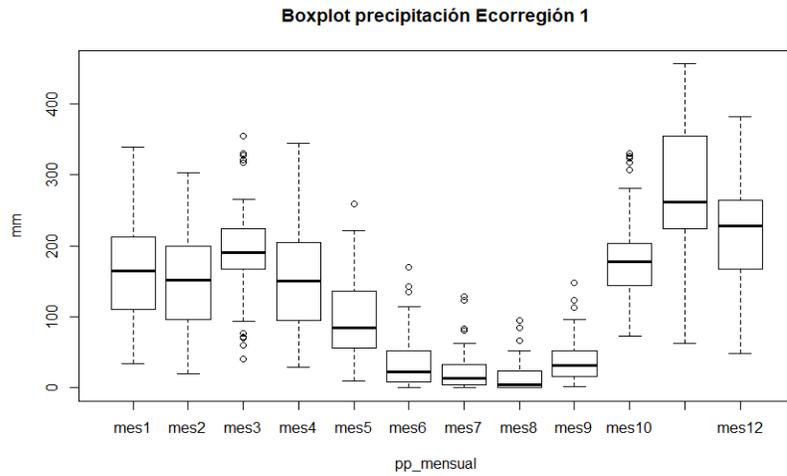


Figura 14. Boxplot precipitación mensual Ecorregión 1

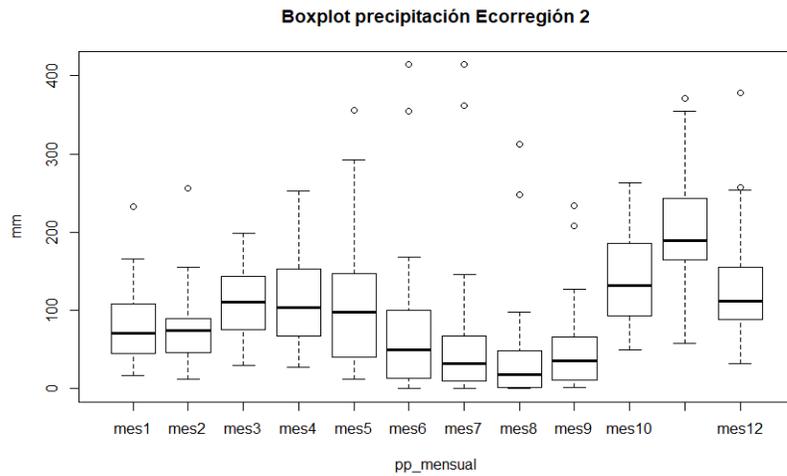


Figura 15 Boxplot precipitación mensual Ecorregión 2

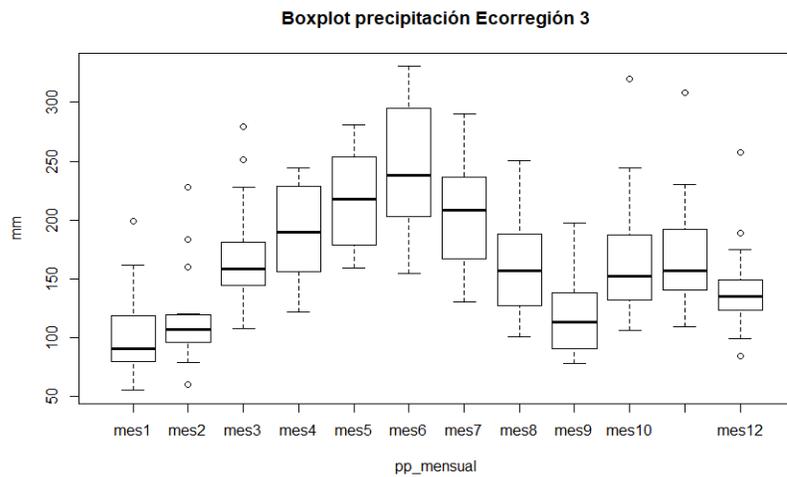


Figura 16 Boxplot precipitación mensual Ecorregión 3

6.2.6.2. Semivariograma por ecorregión

Como requisito para generar una interpolación se debe realizar y analizar el semivariograma de los datos, con la finalidad de conocer el alcance o el **Lagsize**, es decir, la distancia máxima a la que una estación presenta influencia en el espacio, esta información permite conocer la vecindad en que se pueden buscar muestras para estimar el valor de un punto específico (Figuras No. 17, 18 y 19). El análisis de los semivariogramas, indican el área de influencia que presentan las estaciones para cada una de las ecorregiones de interpolación. La Tabla 5 presenta el resultado del Lagsize por ecorregión.

Tabla 5. *Lagsize por Ecorregión de interpolación*

Id	Ecorregión	Lagsize (km)
1	Ecorregión 1	19.24
2	Ecorregión 2	21.96
3	Ecorregión 3	5.78

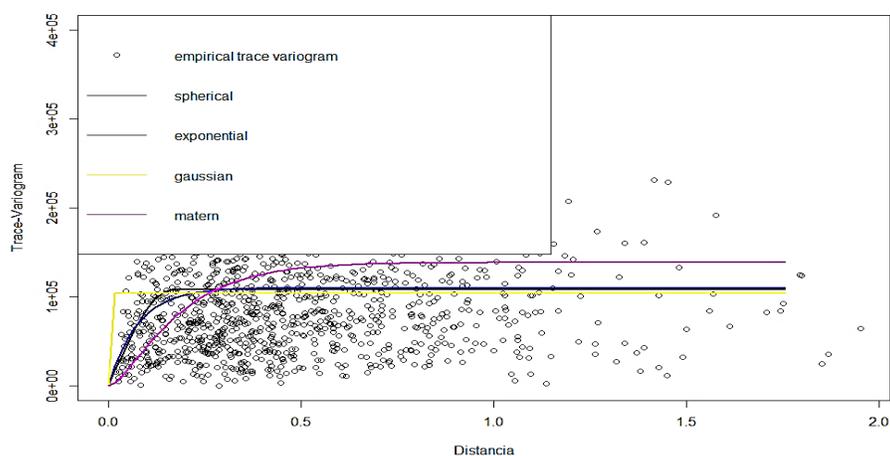


Figura 17.
Semivariograma
Ecorregión 1

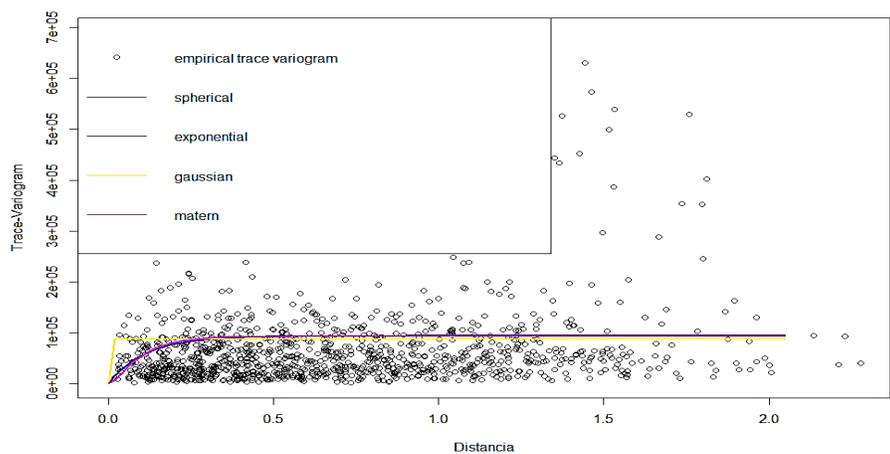


Figura 18.
Semivariograma
Ecorregión 2

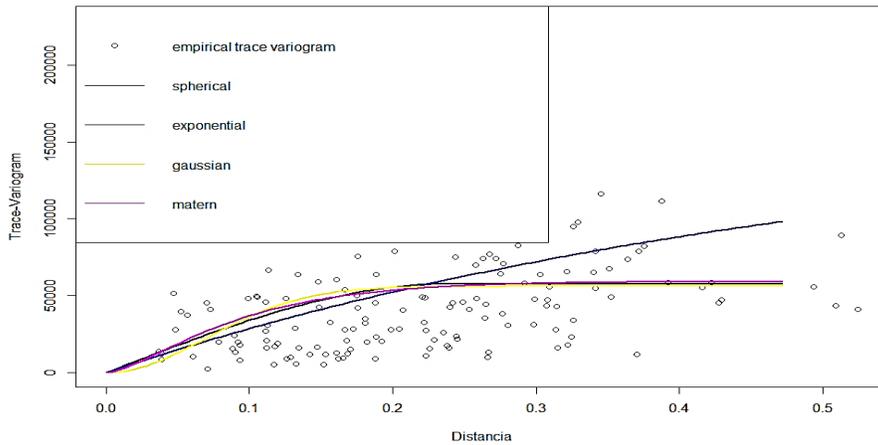


Figura 19. Semivariograma Ecorregión 3

6.2.6.3 Análisis de tendencia

Otro de los requisitos para generar la interpolación es realizar el análisis de tendencia que valida la ubicación espacial y la tendencia entre las estaciones, con el módulo de Geostatistical Analyst y usando la herramienta Trend Analyst del software ArcGIS se genera esta medida. Los resultados **no presentan tendencia** y generan la posibilidad de realizar predicciones con metodologías **no determinísticas**, como la mejor técnica de estimación a utilizar. Las figuras 20 a 22 presentan los resultados.

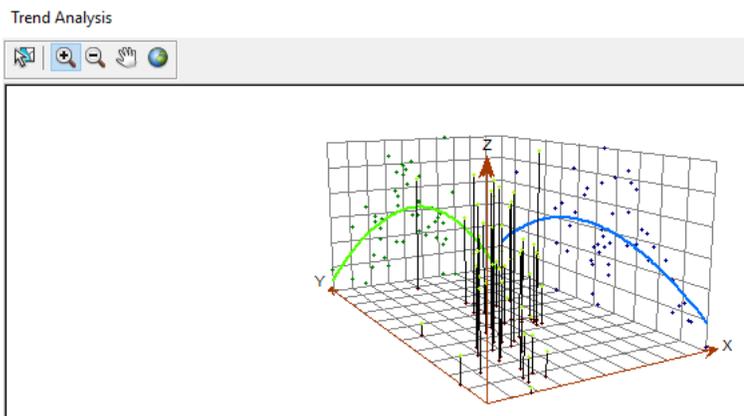


Figura 20. Análisis de tendencia Ecorregión No. 1

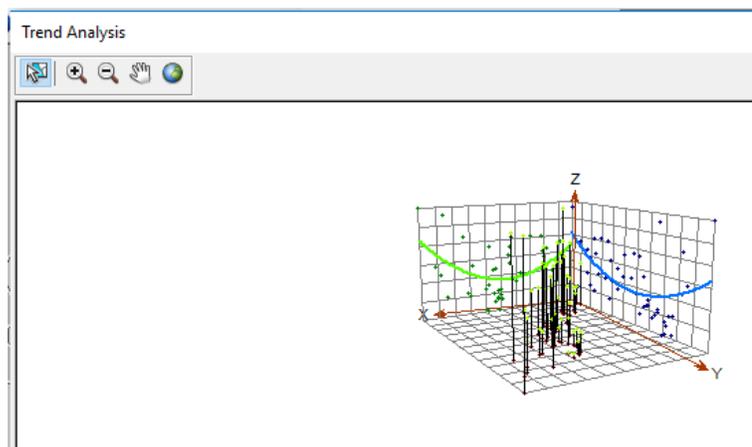


Figura 21. Análisis de
tendencia Ecorregión No.
2

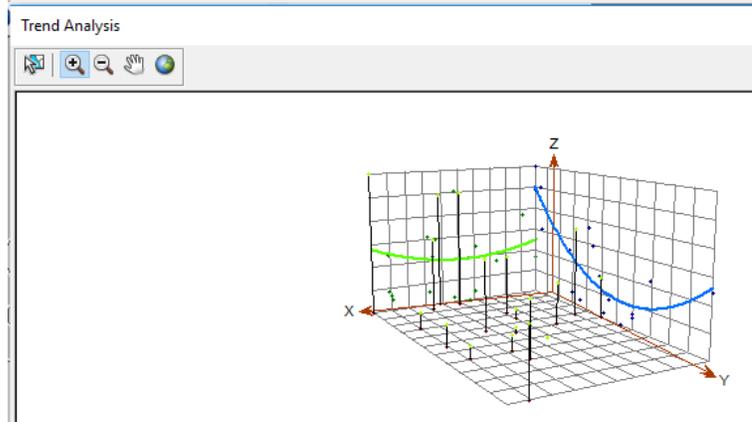


Figura 22. Análisis de
tendencia Ecorregión No.
3

6.2.6.4. Análisis de patrón espacial de la variable

Con el uso de la herramienta de autocorrelación espacial de Moran del software ArcGIS, se identificó el agrupamiento, la extensión y localización de la variable, y se determinó la posibilidad de utilizar técnicas de predicción espacial.

Las figuras 23 y 24, presentan los análisis de los agrupamientos. El índice de moran es 0.39, además de ser positivo; el z-score presenta un valor de 5.25 que indica un alto nivel de agrupamiento de la variable en el espacio. Los resultados validan el uso de técnicas de interpolación para generar la predicción de la precipitación mensual, los resultados obtenidos se producen con el software ArcGIS con las aplicaciones spatial autocorrelation y High/Low clustering, ambas herramientas de análisis espacial

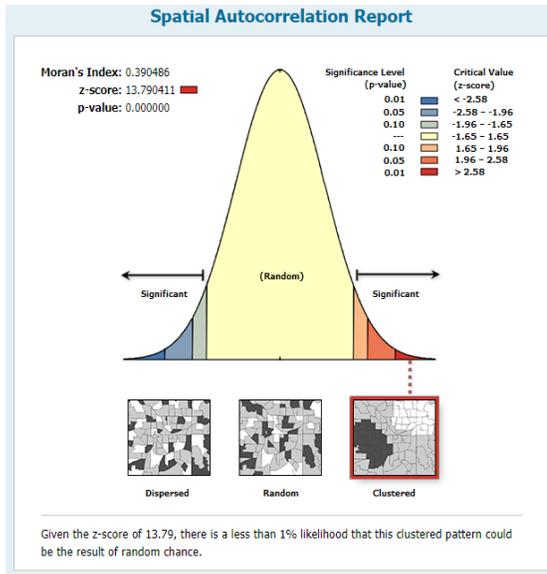


Figura 23. Índice de Moran de la precipitación departamento del Huila

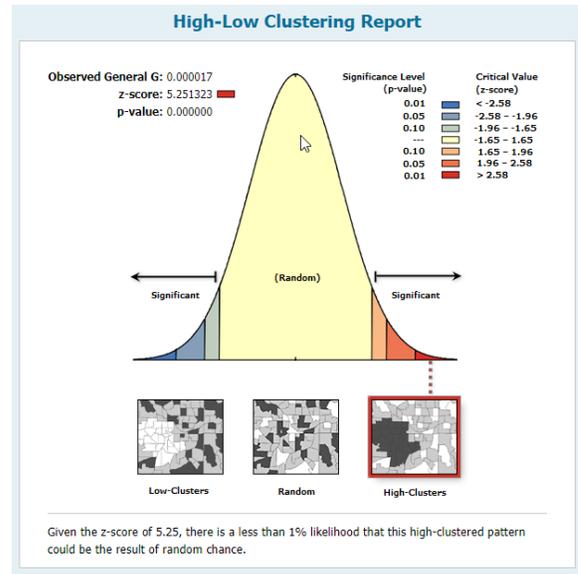


Figura 24. Valor por agrupamiento precipitación departamento del Huila

6.3 Información y métodos para identificar el número y ubicación de nuevas estaciones

6.3.1 Información y selección de estaciones por ecorregión

Se realizó la selección aleatoria de una estación climática por cada una de las tres ecorregiones, a su vez se utilizó el coeficiente de determinación R^2 con 5 estaciones ubicadas en un rango inferior a 40 km (Tabla 6), este análisis se realiza para determinar el área de influencia que presenta cada una de las estaciones climáticas por ecorregión. La Figura 25 presenta las estaciones seleccionadas espacialmente.

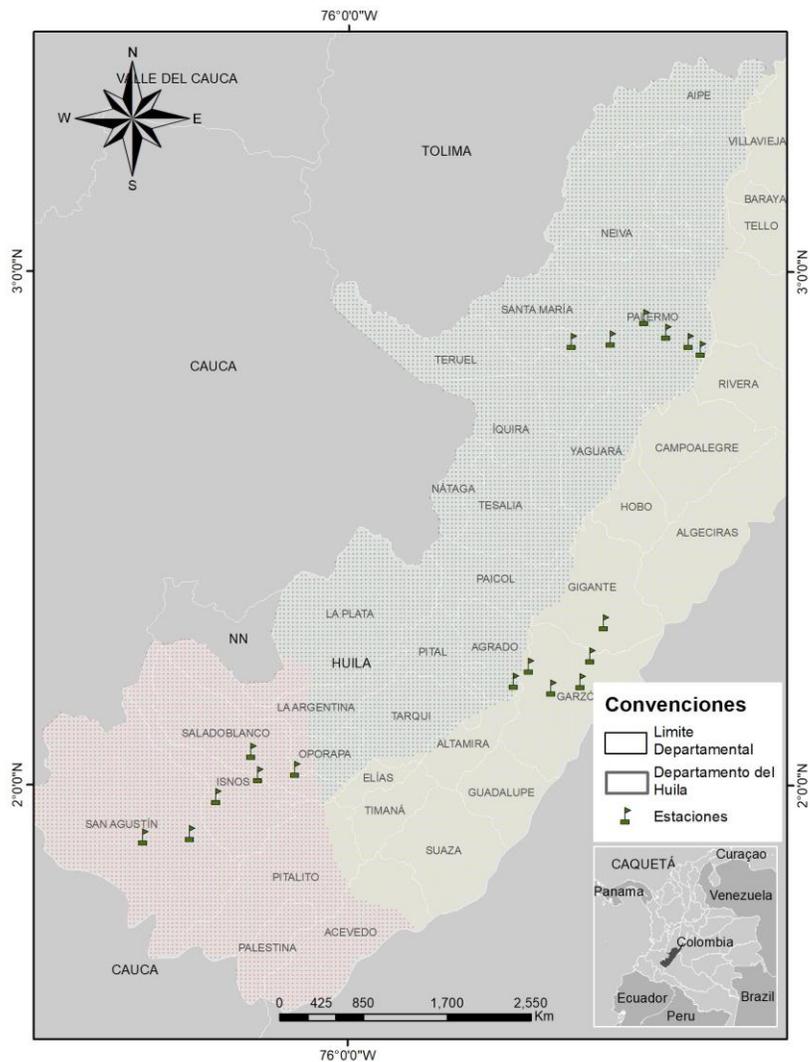


Figura 25. Estaciones validación área de Influencia por ecorregión

Tabla 6. Estaciones seleccionadas por ecorregión

	Estacion	distancia (km)	Altura	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Ecorregión 1	21090150	0	450	62.00	40.25	203.00	110.65	71.73	46.70	7.00	14.00	65.77	261.67	191.93	103.13
	21090110	3.1	454	65.27	52.99	115.08	141.52	67.48	61.23	14.47	17.32	49.70	204.29	217.74	127.60
	21090140	8.2	480	99.80	46.80	183.25	148.67	85.08	32.50	24.25	9.00	86.08	221.00	233.00	141.00
	21120130	13.9	560	108.52	87.73	174.17	166.50	90.20	38.57	12.38	9.00	58.81	289.04	236.60	184.72
	21120090	19.5	700	109.36	128.40	165.71	230.14	142.17	49.86	24.50	17.43	64.56	289.80	234.60	211.30
	21120100	27.8	1105	148.55	181.70	169.14	257.69	167.00	79.52	83.13	39.71	93.78	289.06	271.20	227.70
Ecorregión 2	21060100	0	1460	57.78	104.00	122.33	208.00	190.33	100.40	124.43	71.00	91.13	171.00	157.78	82.11
	21065040	7.7	1270	45.10	80.63	101.53	175.22	156.16	82.30	97.87	58.37	72.49	147.40	106.97	88.37
	21060040	13.68	1330	47.44	89.50	138.17	199.00	175.00	91.00	89.14	45.00	88.25	157.47	120.44	95.33
	21060080	18	990	34.67	50.88	88.17	139.40	109.25	77.80	71.57	42.00	50.00	116.78	112.78	84.00
	21040040	18.66	688	35.00	62.91	69.67	98.60	115.25	82.40	53.71	19.50	45.00	106.67	121.89	71.94
	21030090	23.13	755	38.50	60.39	78.14	138.43	89.77	61.57	57.25	43.43	42.22	94.70	112.60	76.30
Ecorregión 3	21040030	0	1614	57.50	114.94	119.43	187.29	128.50	112.57	135.00	127.86	100.33	152.71	114.11	98.20
	21010060	8	1763	71.00	130.00	114.43	204.43	153.50	147.43	206.88	157.57	127.37	156.94	163.40	104.90
	21010220	10.1	1625	75.50	169.94	182.38	241.00	186.50	227.86	263.25	229.43	143.67	212.40	213.50	136.08
	21010250	18	2000	50.83	108.22	95.93	116.34	136.93	134.20	176.08	142.49	110.17	125.03	147.85	122.72
	21010230	26.5	1949	42.36	112.93	84.06	170.41	151.78	112.23	164.94	129.93	71.61	136.44	111.96	101.25
	21010160	35.8	1724	63.15	86.98	99.95	181.53	218.34	209.27	190.32	169.35	101.11	118.30	141.34	89.21

7. Resultados y discusión

7.1 Selección, procesos y rutinas de interpolación

Después de utilizar los insumos y métodos de las 4 rutinas de interpolación descritos en 6.2, se procedió a iniciar el proceso predictivo usando el escenario climático **Neutro** para los 12 meses del año. Se generaron 4 archivos espaciales tipo shape con la información climática de las estaciones discriminadas por ecorregión, en donde se reducen el número de estaciones a interpolar bajo una selección aleatoria en un 5%, 10%, 20% y 30%, como lo presenta la Tabla 3, esta reducción se realiza para identificar el número límite de estaciones a interpolar. A continuación, se describen los insumos y los pasos para realizar la predicción espacial.

1. Shape precipitación ecorregión 1 a escala mensual para el 5%, 10%, 20% y 30% de estaciones para validar los resultados (Figura 7)
2. Shape precipitación ecorregión 2 a escala mensual para el 5%, 10%, 20% y 30% de estaciones para validar los resultados (Figura 6)
3. Shape precipitación ecorregión 3 a escala mensual para el 5%, 10%, 20% y 30% de estaciones para validar los resultados (Figura 5)
4. Ráster con la máscara de la ecorregión 1 (Figura 8)
5. Ráster con la máscara de la ecorregión 2 (Figura 9)
6. Ráster con la máscara de la ecorregión 3 (Figura 10)
7. Modelo de Elevación Digital (DEM) dpto. del Huila (Figura 3)
8. Rutinas de Interpolación EBK, Cokri, OK y IDW.

Cada una de las rutinas de interpolación usa los insumos de las estaciones a interpolar, por meses: mes1, mes2, ... mes12, y la máscara en formato ráster sobre la cual el script entregará los resultados de la interpolación. Cada ecorregión tiene un script propio (Anexo 12 al 15), donde se cambia el shape de entrada de las estaciones climáticas descritas en la tabla 3. La tabla 7 presenta la cantidad de interpolaciones generadas por ecorregión.

Tabla 7. *Interpolaciones por Ecorregión*

Ecorregión No.	Interpolaciones			Total
	1	2	3	
Ecorregión Nombre	Central	Oriental	Macizo	
95% Estaciones	12	12	12	36
90% Estaciones	12	12	12	36
80% Estaciones	12	12	12	36
70% Estaciones	12	12	12	36
Total	48	48	48	144

Se realizaron 12 interpolaciones para cada mes del año, adicionalmente se realizó la validación estadística con el uso del 95%, 90%, 80% y 70% de los datos, por cada una de las ecorregiones, las estaciones restantes el 5%, 10%, 20% y 30%, se utilizan como testigos para validar las interpolaciones. El total de interpolaciones por metodología es de 144, la tabla 8 presenta el total de interpolaciones bajo las 4 metodologías propuestas por la investigación.

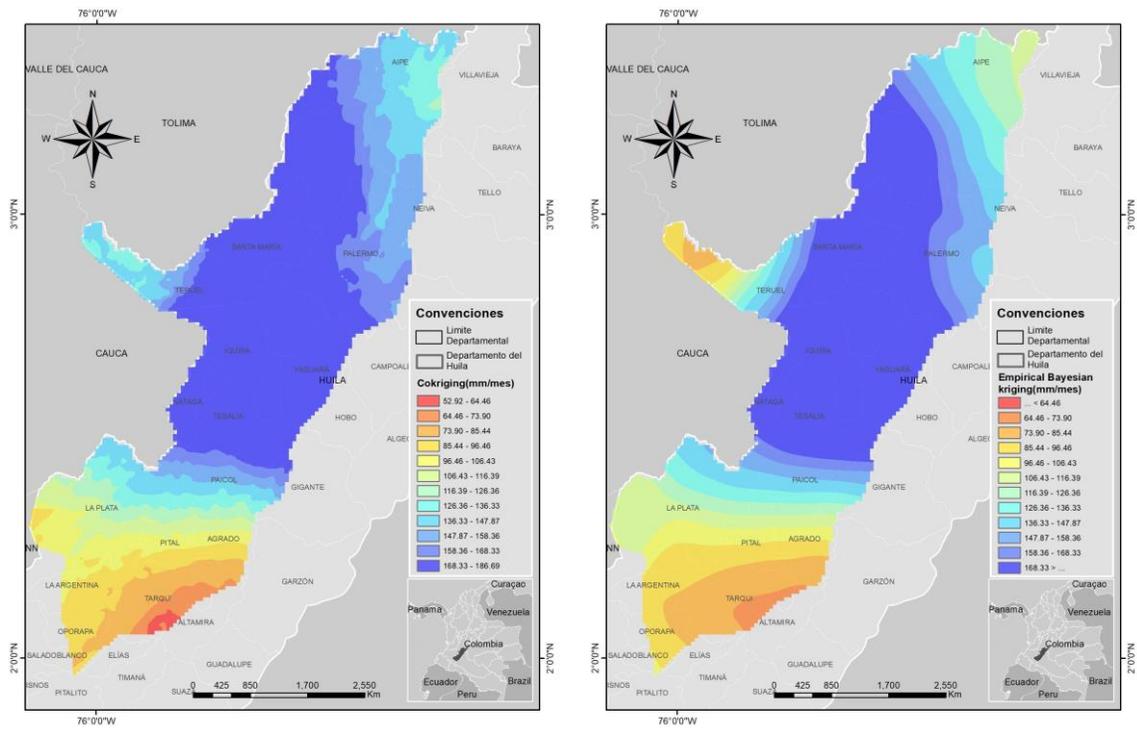
Tabla 8. *Interpolaciones por metodología*

Ítem	Metodología	Interpolaciones
1	Empirical Bayesian Kriging	144
2	Ordinary kriging	144
3	Inverse weighed of Distance	144
4	CoKriging	144
Total		576

7.1.1 Salidas de interpolación

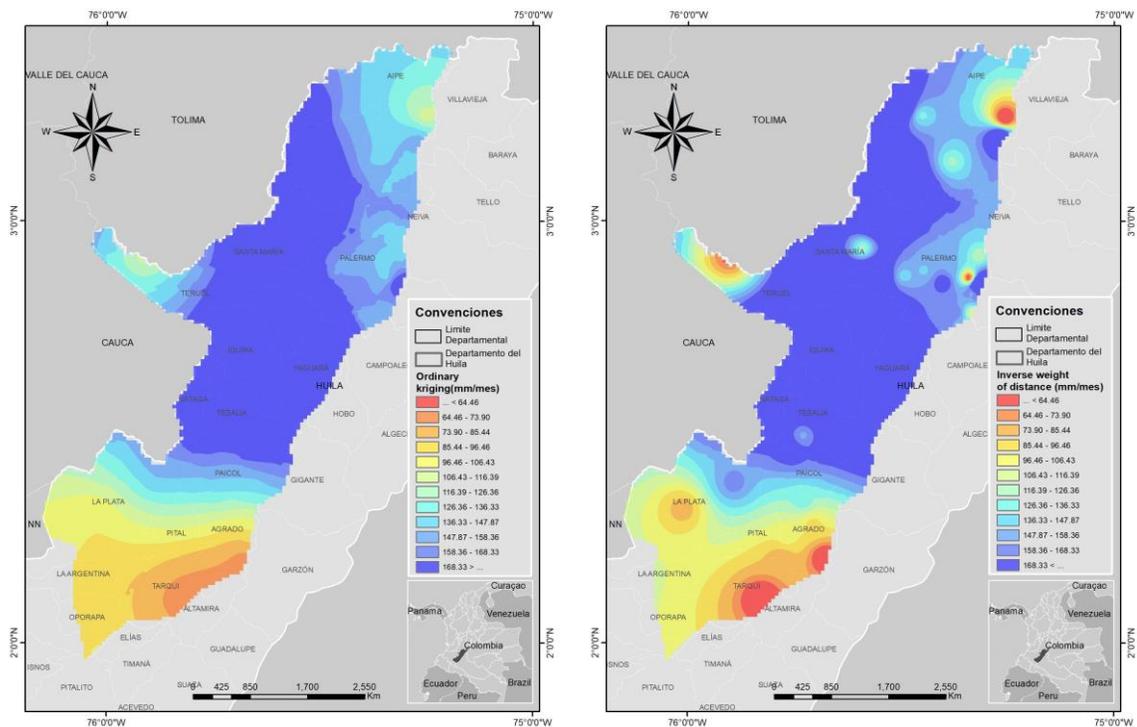
El resultado de las rutinas descritas en 7.1, entrega un archivo ráster por cada interpolación con la máscara ajustada para cada una de las ecorregiones; se obtienen 576 salidas totales de interpolación mensual con resolución espacial de 1 km².

A continuación, se presentan las salidas de enero, junio y octubre, debido a que por su histórico estadístico presentan los valores acumulados extremos, mostrando los periodos húmedos y secos para el departamento del Huila, además se presentan los resultados del 90% de los datos interpolados para la ecorregión 1, con el desarrollo de las 4 metodologías aplicadas: CoKriging, Empirical Bayesian, Inverse weighed of Distance y Kriging, Ordinary kriging (Figuras 27 a 29).



1. Cokriging

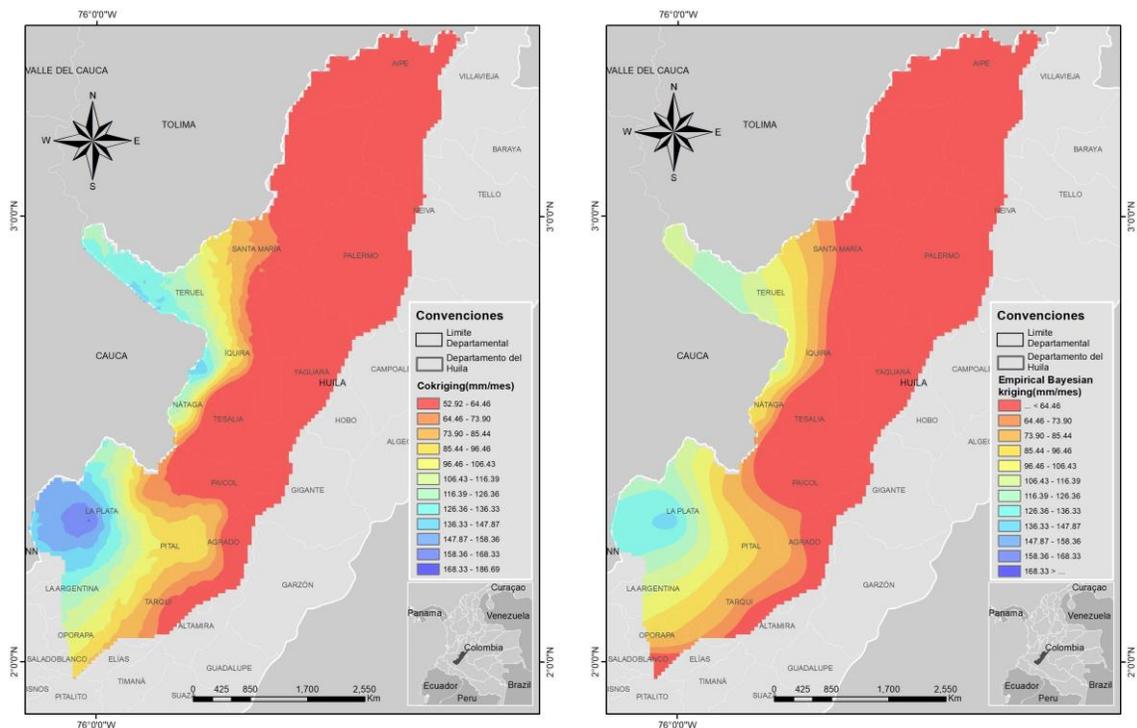
2. Empirical bayesian kriging



3. Ordinary kriging

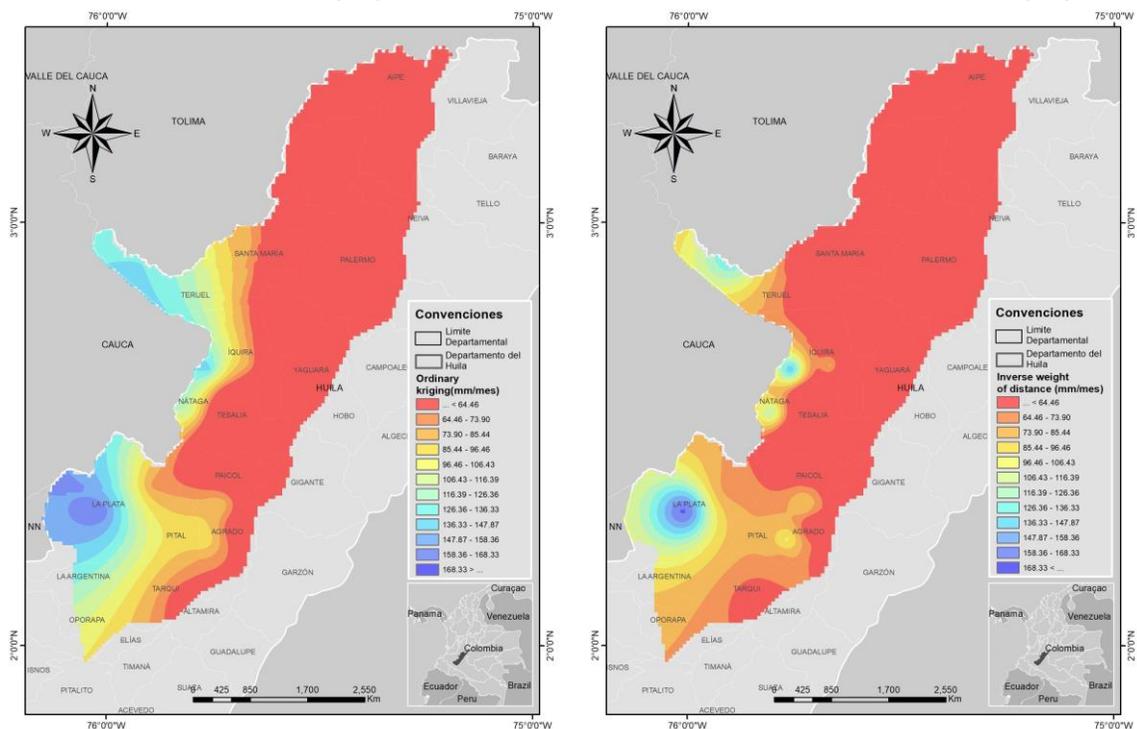
4. Inverse weight of distance

Figura 27. Salidas gráficas interpolaciones mes de enero



1. Cokriging

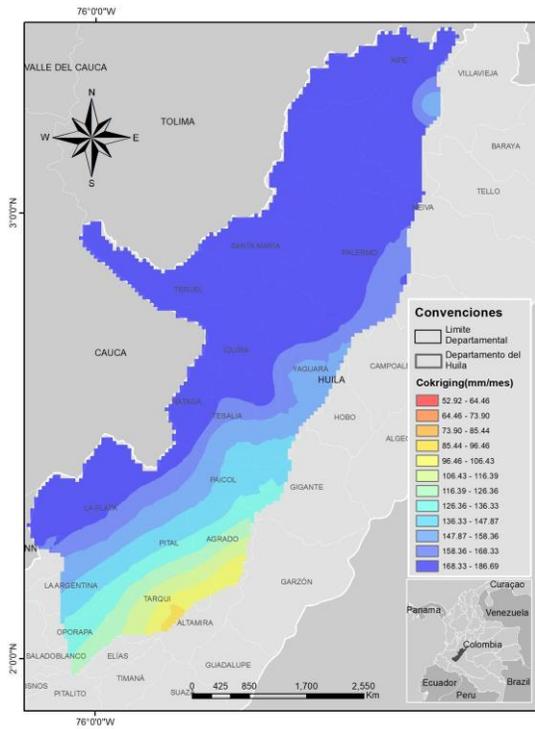
2. Empirical bayesian kriging



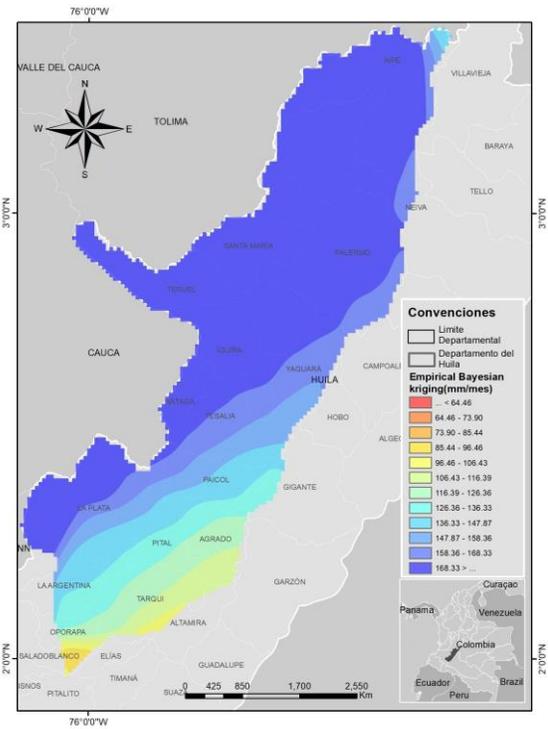
3. Ordinary Kriging

4. Inverse weight of distance

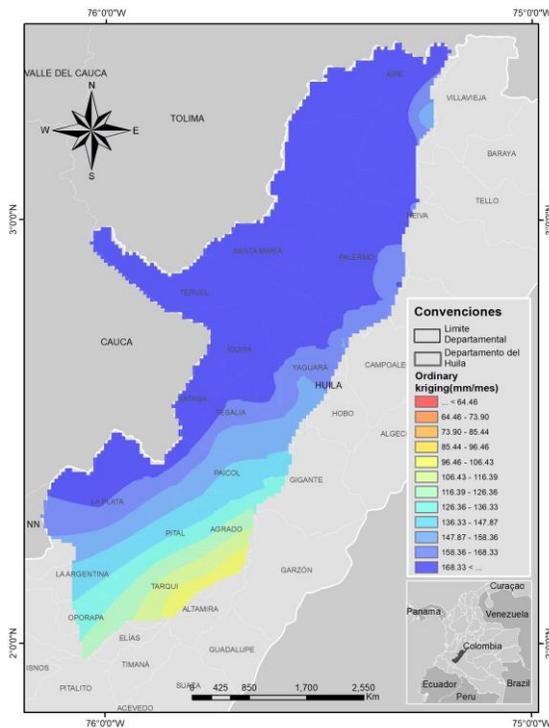
Figura 28. Salidas gráficas interpolaciones mes de junio



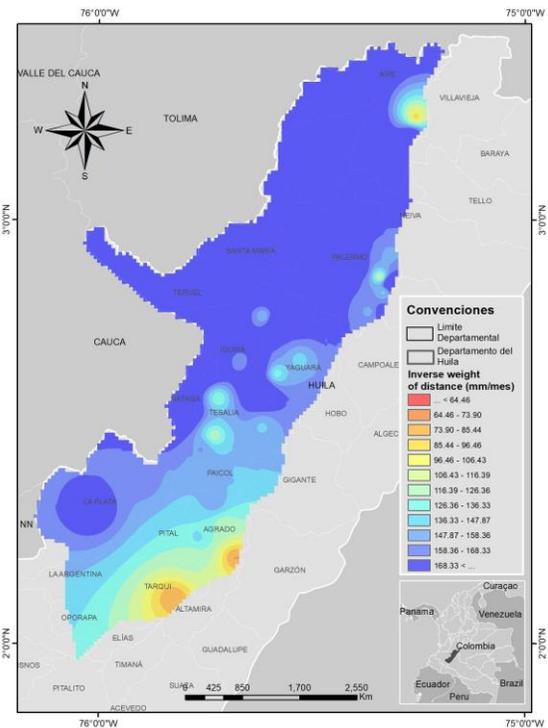
1. Cokriging



2. Empirical bayesian kriging



3. Ordinary Kriging



4. Inverse weight of distance

Figura 29. Salidas gráficas interpolaciones mes de octubre

7.1.2 Validación, análisis de metodologías de interpolación y sus salidas estadísticas

Para realizar análisis y validación de las salidas de interpolación, se utilizó el software ArcGIS, y se empleó la herramienta **Extract multi values to points**. Se realizó la extracción, de los valores de las capas ráster, de las estaciones que no se integraron en las interpolaciones, es decir las estaciones testigos con el 5%, 10%, 20% y 30% de aquellas fuentes que no entraron en el proceso de interpolación (Figuras No. 5 a 7). Los anexos 4 a 11 relacionan, la cantidad de estaciones que se utilizaron para realizar la validación cruzada, empleando métodos estadísticos de coeficiente de determinación R^2 y error cuadrático medio (ECM).

Con un código en el software R Studio, se genera la validación estadística. Los anexos 4 a 11 presentan los resultados de validación para cada una de las estaciones interpoladas con la que se realizó la validación cruzada, las proporciones de estimación se realizaron de forma aleatoria para el 95%, 90%, 80% y 70% de las estaciones seleccionadas. El resultado de los análisis de los estadísticos de validación comparativa de las 4 metodologías de interpolación propuestas, 3 metodologías de predicción no determinísticas y 1 determinística, utilizando los promedios del coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (ECM), se presentan en la Tabla 9 a 10 y las Figuras No. 30 a 31.

Tabla 9. *Coefficiente de determinación R^2 promedio*

Metodología	5%	10%	20%	30%
Cokriging	0.81	0.81	0.83	0.80
Empirical Bayesian Kriging	0.85	0.86	0.84	0.83
Inverse weight of distancia	0.86	0.83	0.85	0.83
Ordinary Kriging	0.85	0.82	0.84	0.81

Tabla 10. *Error cuadrático medio promedio*

Metodología	5%	10%	20%	30%
Cokriging	22.28	25.20	27.70	27.42
Empirical Bayesian Kriging	16.93	21.53	27.31	26.49
Inverse weight of distancia	19.44	23.03	27.32	26.38
Ordinary Kriging	17.91	22.78	27.33	28.22

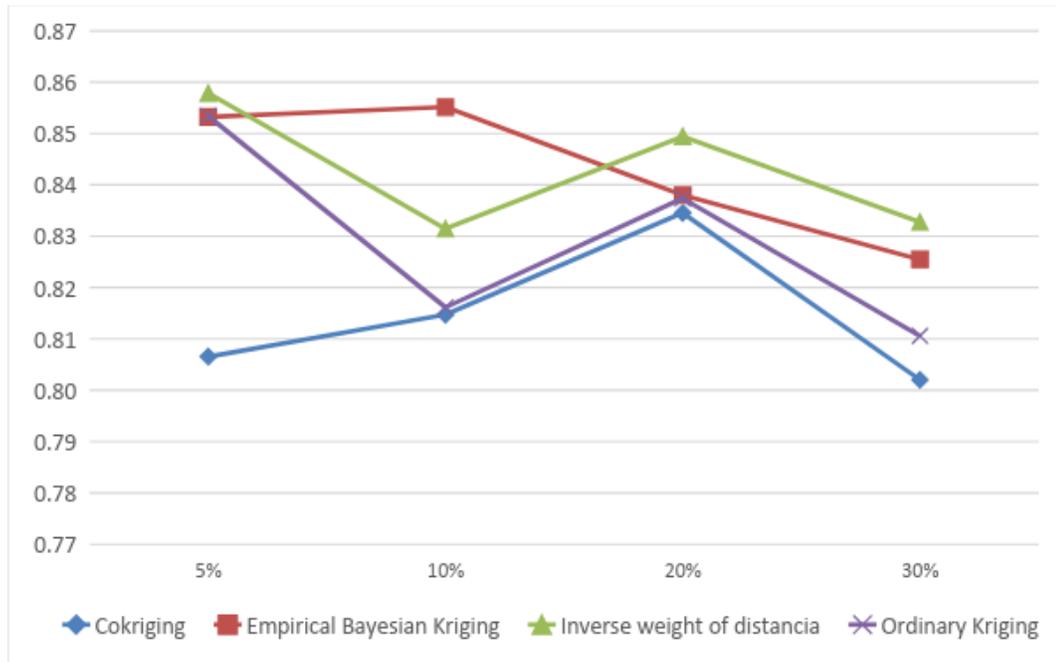


Figura 30. Gráfico comportamiento estadístico del R^2

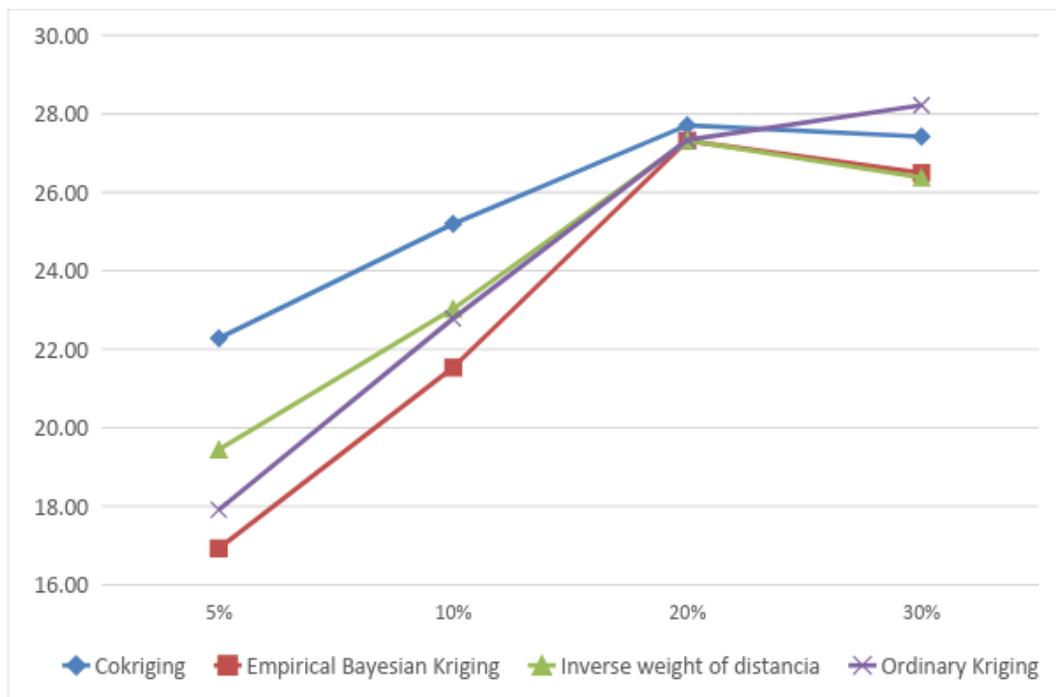


Figura 31. Gráfico comportamiento estadístico del ECM

7.1.3 Determinación del interpolador de la precipitación para el departamento del Huila, con base en los resultados 7.1.2.

Las Tablas 9 y 10 identifican a las metodologías Empirical Bayesian Kriging y Kriging Ordinario, en sus coeficientes de determinación con una alta significancia y similaridad estadística, ya que los valores promediados muestran el mayor ajuste en sus resultados, sin embargo, los resultados del ECM presenta el menor error sobre la metodología **Empirical Bayesian Kriging (EBK)**, lo que permitió definir la técnica **EBK** como la metodología a usar para predecir la precipitación acumulada mensual para el departamento del Huila.

El grafico No. 30 muestra una mejor tendencia y una mayor significancia sobre el R^2 , en la metodología **EBK**, además el menor **ECM**, se presenta para las interpolaciones en donde se utilizaron el **95%** y **90%** de estaciones interpoladas, se determina una mejor tendencia que sobre el resto de las interpolaciones realizadas (Grafico No. 31). Con base en los resultados estadísticos se resuelve que, la interpolación de la precipitación acumulada mensual, debe realizarse con la metodología **Empirical Bayesian Kriging**, ya que presenta la mejor predicción sobre las metodologías propuestas.

7.1.4 Determinación del número límite de estaciones a Interpolar con base en los resultados 7.1.2.

El grafico 31 muestra que los resultados de los promedios del ECM, presentan una tendencia de aumento del 5% hasta el 20%. La predicción muestra una tendencia de estabilidad en los errores del 20% al 30%. Bajo los anteriores conceptos se determina como el número mínimo de estaciones para interpolar en **92 muestras con precipitación mensual acumulada**, equivalente al 80% estaciones climáticas usadas en la predicción de la precipitación (Tabla 3).

Es concluyente determinar en el grafico 31, que bajo la tendencia de similaridad en los ECM sobre el 20% de las estaciones en adelante, no se generará un numero de aumento; pero si es determinante el uso de **todas las estaciones climáticas posibles para interpolar**, con la finalidad de generar la mejor predicción espacial de la precipitación mensual acumulada para el departamento del Huila.

7.2 Selección de sitios de futuras estaciones climáticas

7.2.1 Regresión de estaciones por ecorregión

La Tabla 11 presenta los resultados estadísticos de la regresión de las estaciones por ecorregión, con la aplicación del coeficiente de determinación R^2 y con el uso de la información de la Tabla 7. La Tabla 11 presenta la similaridad del comportamiento de la precipitación frente a las estaciones vecinas.

Tabla 11. *Coeficiente de determinación por estación*

Ecorregión	Estación	Distancia (km)	R^2 squared	ECM
Ecorregión 1	21090110	3.1	0.810	36.775
	21090140	8.2	0.891	27.803
	21120130	13.9	0.866	30.849
	21120090	19.5	0.717	44.881
	21120100	27.8	0.601	53.278
Ecorregión 2	21065040	7.7	0.939	12.492
	21060040	13.68	0.889	16.892
	21060080	18	0.838	20.467
	21040040	18.66	0.700	27.826
	21030090	23.13	0.770	24.342
Ecorregión 3	21010060	8	0.709	17.757
	21010220	10.1	0.631	20.002
	21010250	18	0.249	28.524
	21010230	26.5	0.648	16.509
	21010160	35.8	0.310	27.347

7.2.2 Área de influencia por estación climática

Con el análisis realizado por los semivariogramas en 7.1.1 por estación, se determinó el **Lagsize**, esta herramienta calculó la influencia que presenta la ubicación espacial, para cada una de las estaciones que se interpolaron (Tabla 6). Bajo el criterio del investigador y con la metodología presentada en 6.3, se realizaron los coeficientes de determinación entre las estaciones cercanas 7.2.1, con la finalidad de mejorar el criterio de área de influencia por estación y compararla con el Lagsize producto del semivariograma. Los resultados en la ecorregión 1 y 2, se utilizaron los promedios de las distancias de los coeficientes (R^2) superiores a 0.8, además se redujo un 10%, de margen de error en la estimación del área de influencia. En la ecorregión No. 3, se usó el promedio de la distancia de los coeficientes (R^2) superiores a 0.7, y se redujo el 10% de margen de error para estimar el área de influencia. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. *Área de Influencia de las estaciones por Ecorregión.*

Id	Ecorregión	Distancia (km)
1	Ecorregión 1	10.1
2	Ecorregión 2	11.8
3	Ecorregión 3	7.2

Al revisar los resultados del **Lagsize** en la tabla 5, y los resultados de los promedios de la regresión en la tabla 12. Se determinó utilizar los resultados de la metodología de regresión, como el resultado del área de influencia para las estaciones por ecorregión (Figura No. 32)

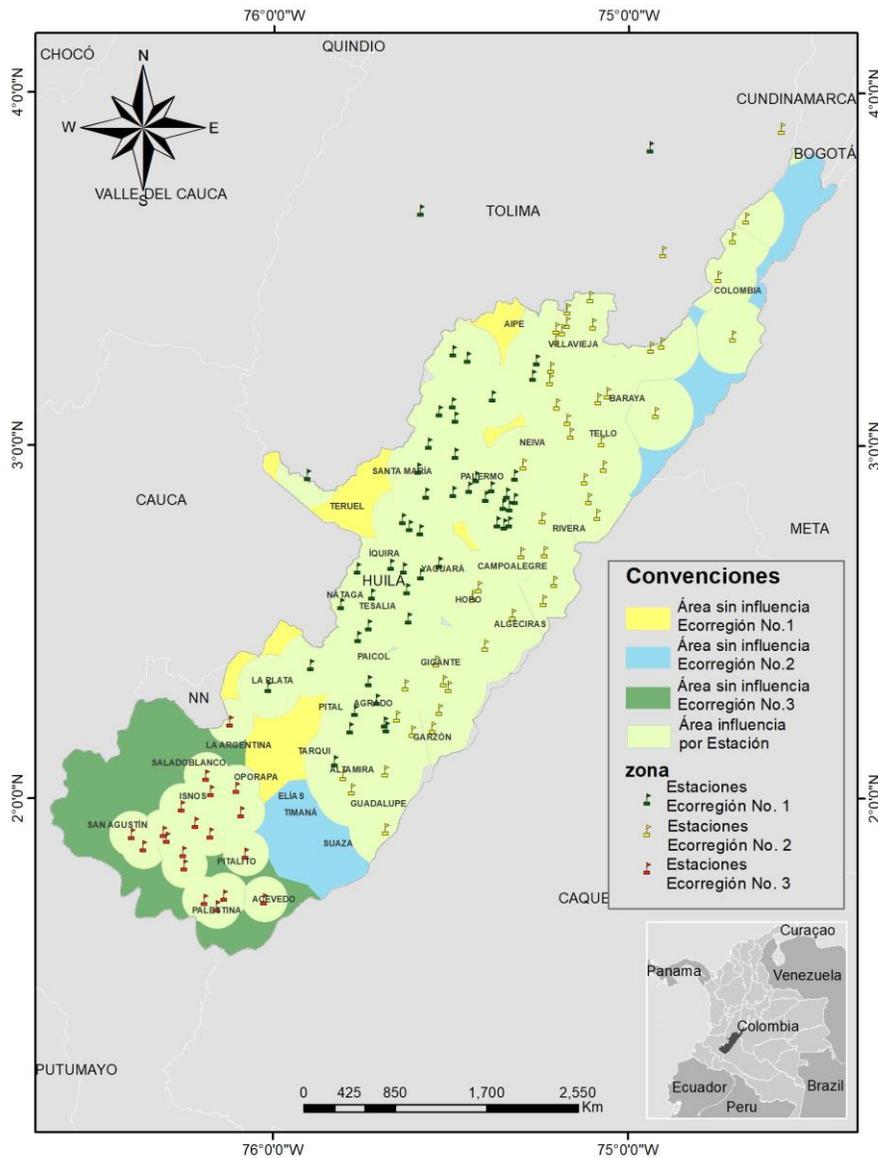


Figura 32. Área de Influencia por Estación y Ecorregión.

7.2.3 Centroides de intersección por área de influencia por ecorregión

Luego de reconocer el área de influencia que presenta las estaciones por ecorregión, se procedió con herramientas de geoprocreso a generar la conversión de los polígonos que no presentan área de influencia. En color amarillo se presentan para la ecorregión No. 1, color azul el área sin influencia de estaciones en la ecorregión No. 2 y tonalidad verde para la ecorregión No. 3. Los centroides se obtuvieron con el uso de herramientas, que permiten encontrar los centroides de los ráster generados sobre los polígonos sin influencia. (Figura No. 33).

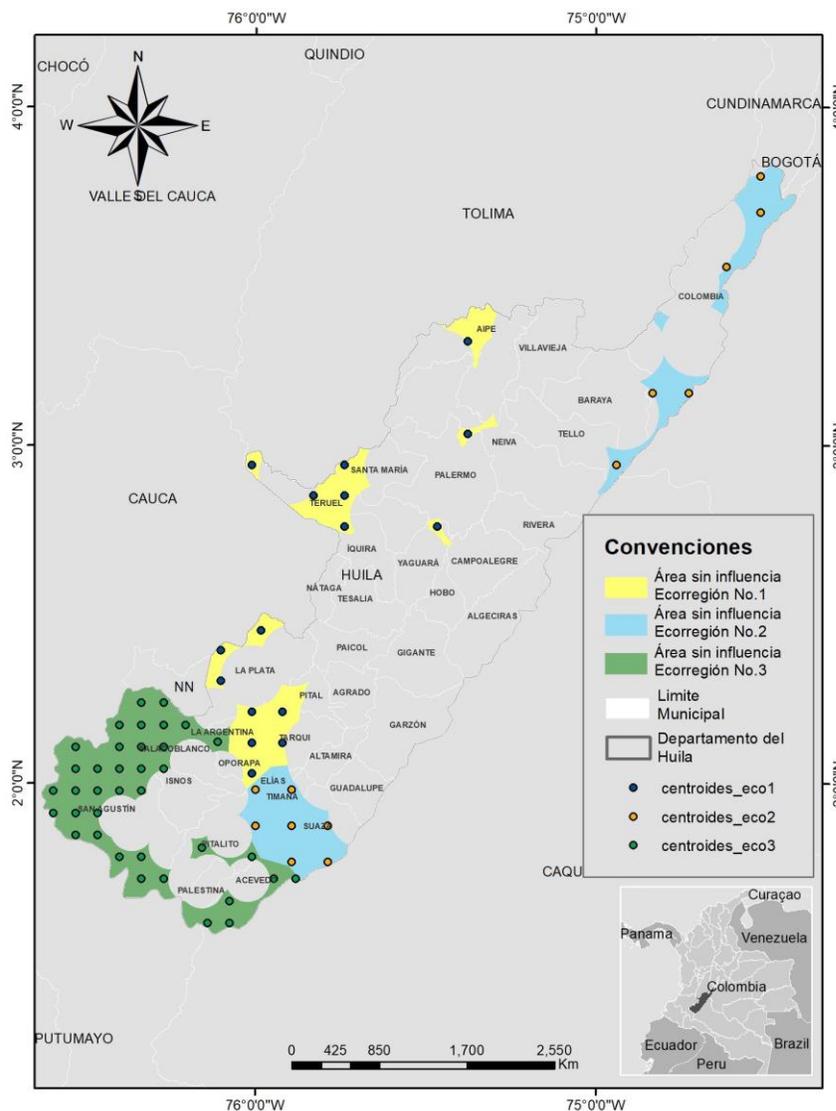


Figura 33. Centroides y área sin Influencia de estaciones climáticas.

7.2.4 Área de influencia de las estaciones futuras

Se utilizaron las áreas de influencia para determinar el alcance de la precipitación acumulada a escala mensual de las estaciones futuras. En los centroides, se utiliza el mismo criterio desarrollado por la metodología en el ítem No. 7.2.2. (Tabla 9), con el uso de la herramienta **Buffer**, con la que se generó el área de influencia, se propone la futura ubicación de las nuevas estaciones climáticas y el rango de alcance que ellas presentan utilizando la distancia que se presenta entre cada uno de los centroides (Figura 34).

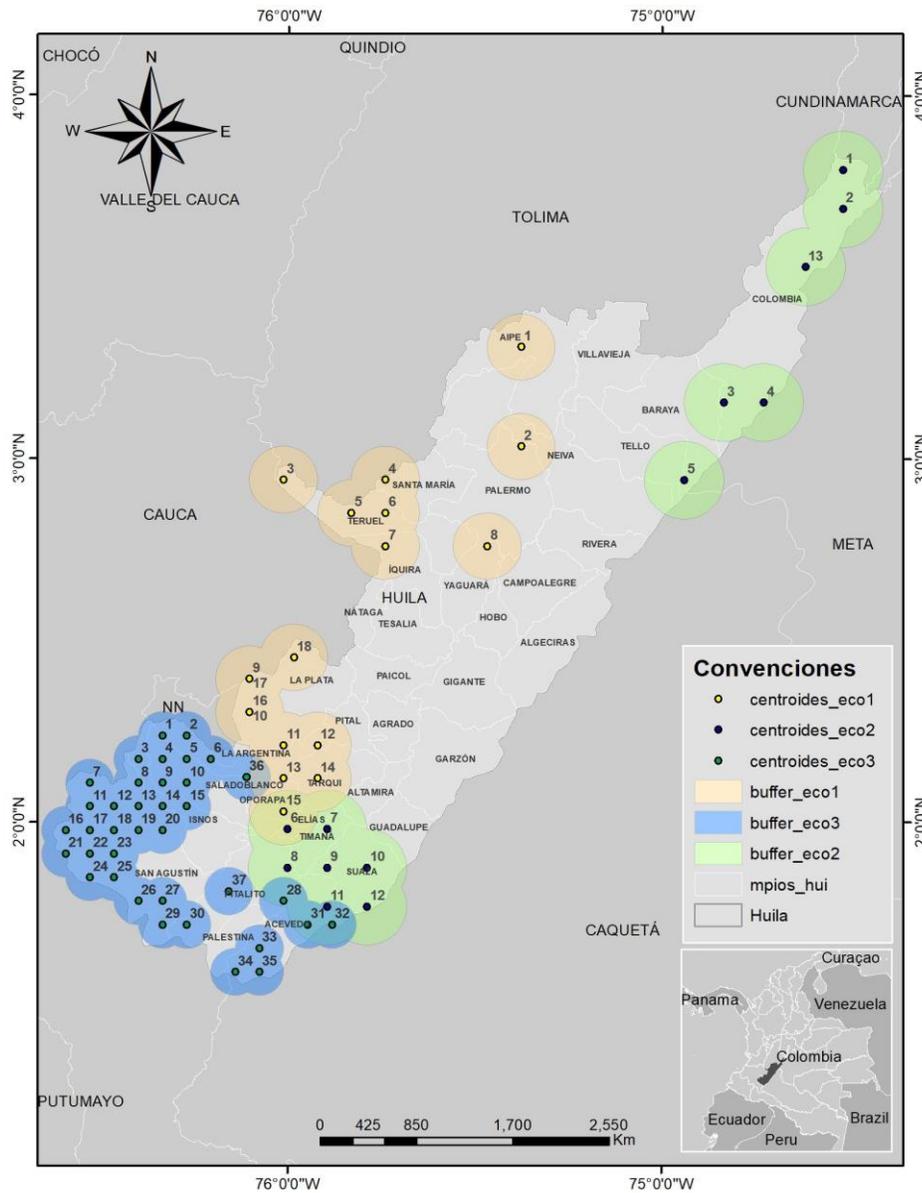


Figura 34. Centroides y ubicación de nuevas estaciones.

7.2.5 Número y ubicación de nuevas estaciones

La tabla 10 y la figura 35 presentan la cartografía, con la ubicación espacial de cada estación por ecorregión climática. El resultado generado muestra un mayor número de estaciones sobre la zona sur del departamento, hecho que confirma que el alcance que presentan las estaciones actuales y su cantidad no generan un amplio cubrimiento espacial por estación, sin embargo, sobre la zona norte del departamento el alcance de las estaciones actuales y su cantidad hace que el número de estaciones nuevas a ubicar sea menor en comparación con la zona sur

del departamento del Huila. El total de estaciones para instalar es de 68 para todo el departamento del Huila, en la zona de macizo colombiano se deben ubicar 37 estaciones, mientras que en la ecorregión 1 se deben instalar 18 estaciones y en la ecorregión 2 se deben instalar 13 estaciones climáticas.

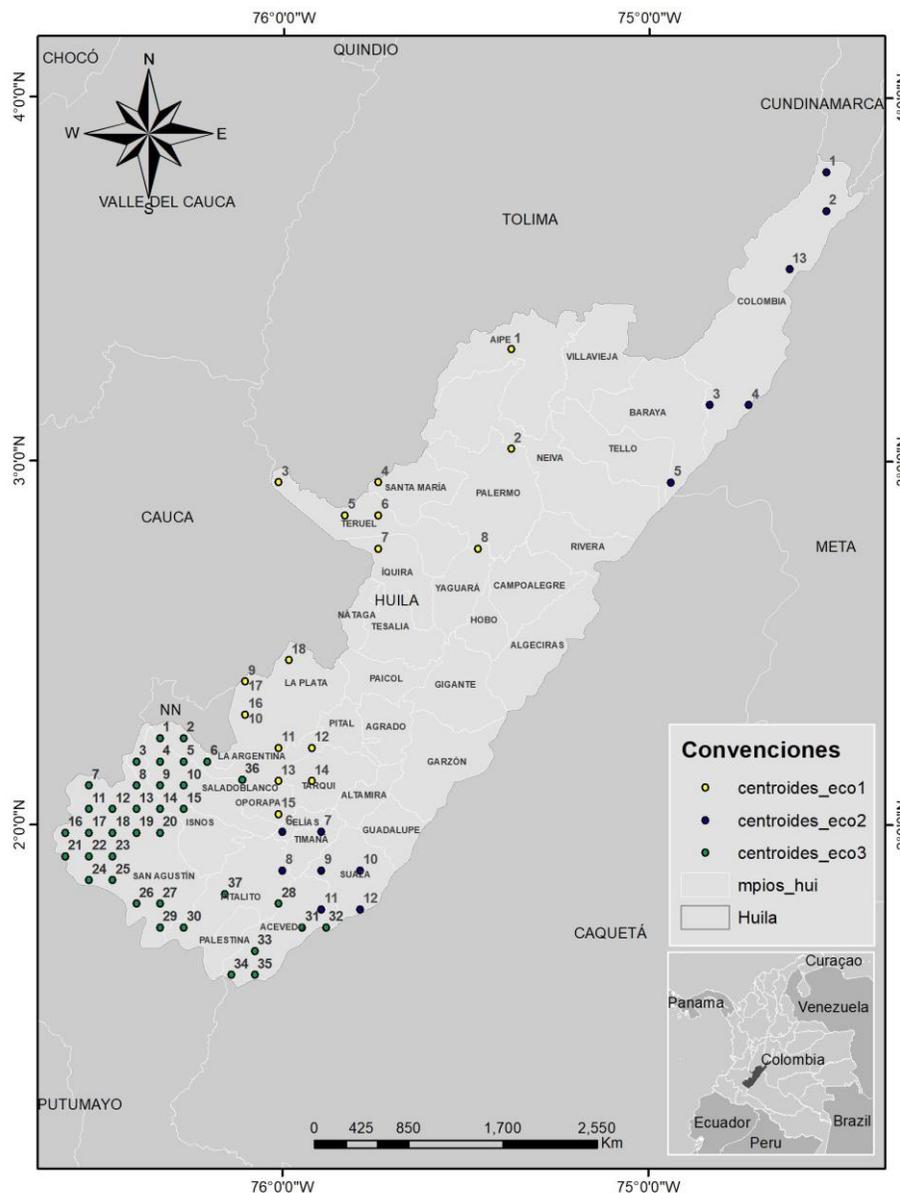


Figura 35. Mapa de la ubicación de nuevas Estaciones Climáticas.

La tabla 13 presenta un listado con las estaciones propuestas para llenar vacíos informáticos para el departamento del Huila. Las coordenadas están proyectadas con referencia espacial Magna Colombia Bogotá.

Tabla 13. *Ubicación espacial de las Nuevas estaciones para la precipitación.*

Ecorregión	id	X	Y
1	1	855650.57	857702.76
1	2	855650.57	827402.76
1	3	784950.57	817302.76
1	4	815250.57	817302.76
1	5	805150.57	807202.76
1	6	815250.57	807202.76
1	7	815250.57	797102.76
1	8	845550.57	797102.76
1	9	774850.57	756702.76
1	10	774850.57	746602.76
1	11	784950.57	736502.76
1	12	795050.57	736502.76
1	13	784950.57	726402.76
1	14	795050.57	726402.76
1	15	784950.57	716302.76
1	16	774850.57	746602.76
1	17	774850.57	756702.76
1	18	788038.15	763202.43
2	1	951381.11	911589.64
2	2	951381.11	899789.64
2	3	915981.11	840789.64
2	4	927781.11	840789.64
2	5	904181.11	817189.64
2	6	786181.11	710989.64
2	7	797981.11	710989.64
2	8	786181.11	699189.64
2	9	797981.11	699189.64
2	10	809781.11	699189.64
2	11	797981.11	687389.64
2	12	809781.11	687389.64
2	13	940225.07	882034.5
3	1	748970.31	739473.27
3	2	756170.31	739473.27
3	3	741770.31	732273.27
3	4	748970.31	732273.27
3	5	756170.31	732273.27
3	6	763370.31	732273.27
3	7	727370.31	725073.27
3	8	741770.31	725073.27
3	9	748970.31	725073.27
3	10	756170.31	725073.27
3	11	727370.31	717873.27
3	12	734570.31	717873.27
3	13	741770.31	717873.27
3	14	748970.31	717873.27

3	15	756170.31	717873.27
3	16	720170.31	710673.27
3	17	727370.31	710673.27
3	18	734570.31	710673.27
3	19	741770.31	710673.27
3	20	748970.31	710673.27
3	21	720170.31	703473.27
3	22	727370.31	703473.27
3	23	734570.31	703473.27
3	24	727370.31	696273.27
3	25	734570.31	696273.27
3	26	741770.31	689073.27
3	27	748970.31	689073.27
3	28	784970.31	689073.27
3	29	748970.31	681873.27
3	30	756170.31	681873.27
3	31	792170.31	681873.27
3	32	799370.31	681873.27
3	33	777770.31	674673.27
3	34	770570.31	667473.27
3	35	777770.31	667473.27
3	36	773947.02	726773.24
3	37	768655.35	692059.84

7.3 Análisis y cartografía temática de la precipitación en escenarios de variabilidad climática

Cabe destacar que la zona donde no tenemos presencia de estaciones climáticas con área de influencia significativa, son aquellas áreas en donde el interpolador presenta un menor ajuste en la precipitación y diferencias entre los extremos de las ecorregiones.

La cartografía temática presenta una mayor acumulación de la precipitación mensual sobre la ecorregión No. 3 ubicada en la zona de macizo colombiano en primer lugar, hecho que confirma los resultados estadísticos de la Tabla 3, en segundo lugar, se destacan tonalidades azules y amarillas indicando la ecorregión No. 1 como el segundo espacio geográfico con mayor precipitación y la ecorregión No. 2 como el área geográfica donde las condiciones de acumulación de la precipitación a escala mensual más baja para todo el departamento del Huila (Figuras 36 a 41).

Sobre los tres escenarios de variabilidad climática, es notorio como sobre la ribera del río Magdalena que divide la cordillera central y oriental respectivamente, y que además presenta las cotas más bajas sobre la continuidad del río, se presentan las condiciones más secas del departamento del Huila, a excepción de los aumentos pronunciados en los eventos El Niño (Figuras 36 a 41).

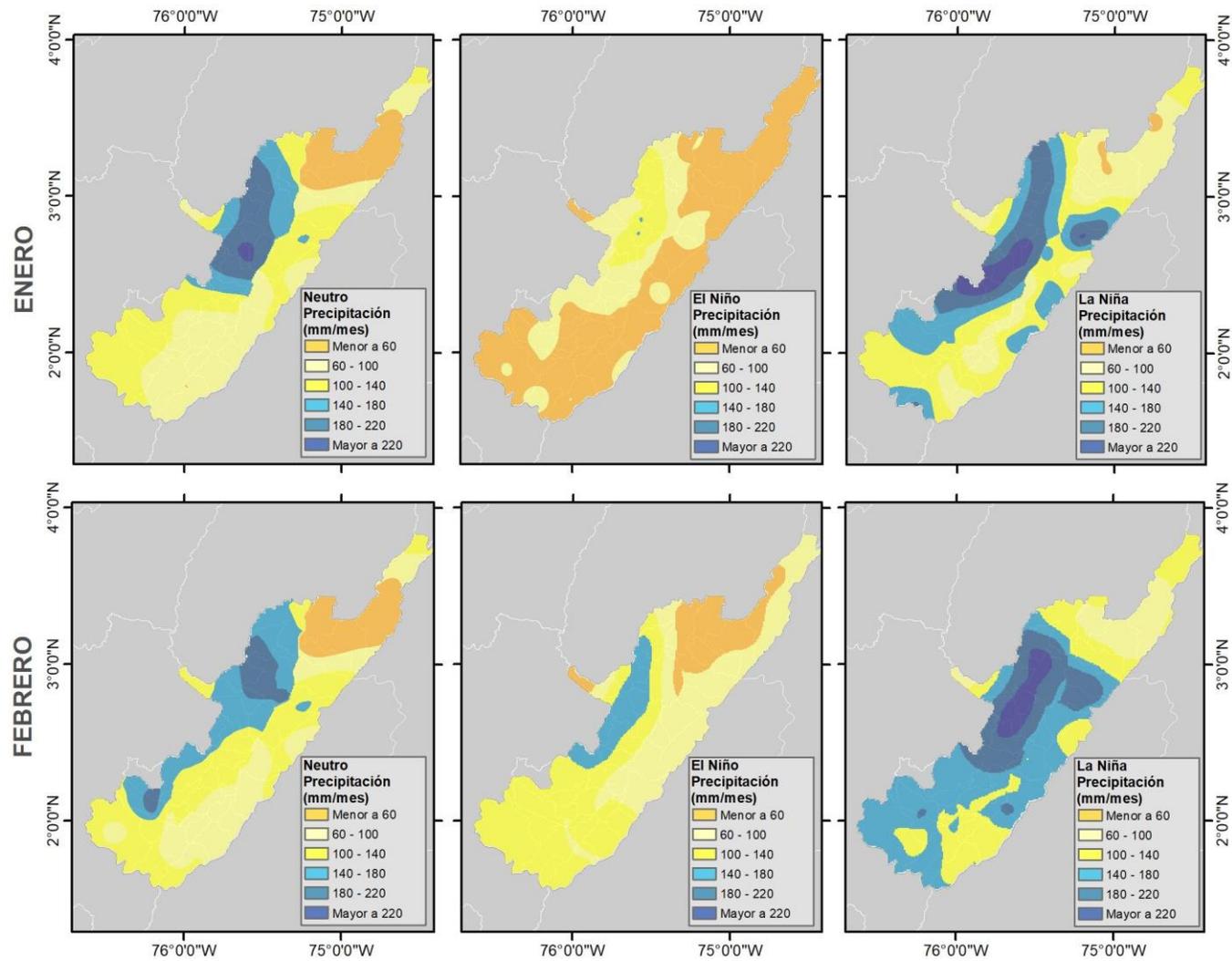


Figura 36. Mapas Temáticos precipitación Enero y febrero

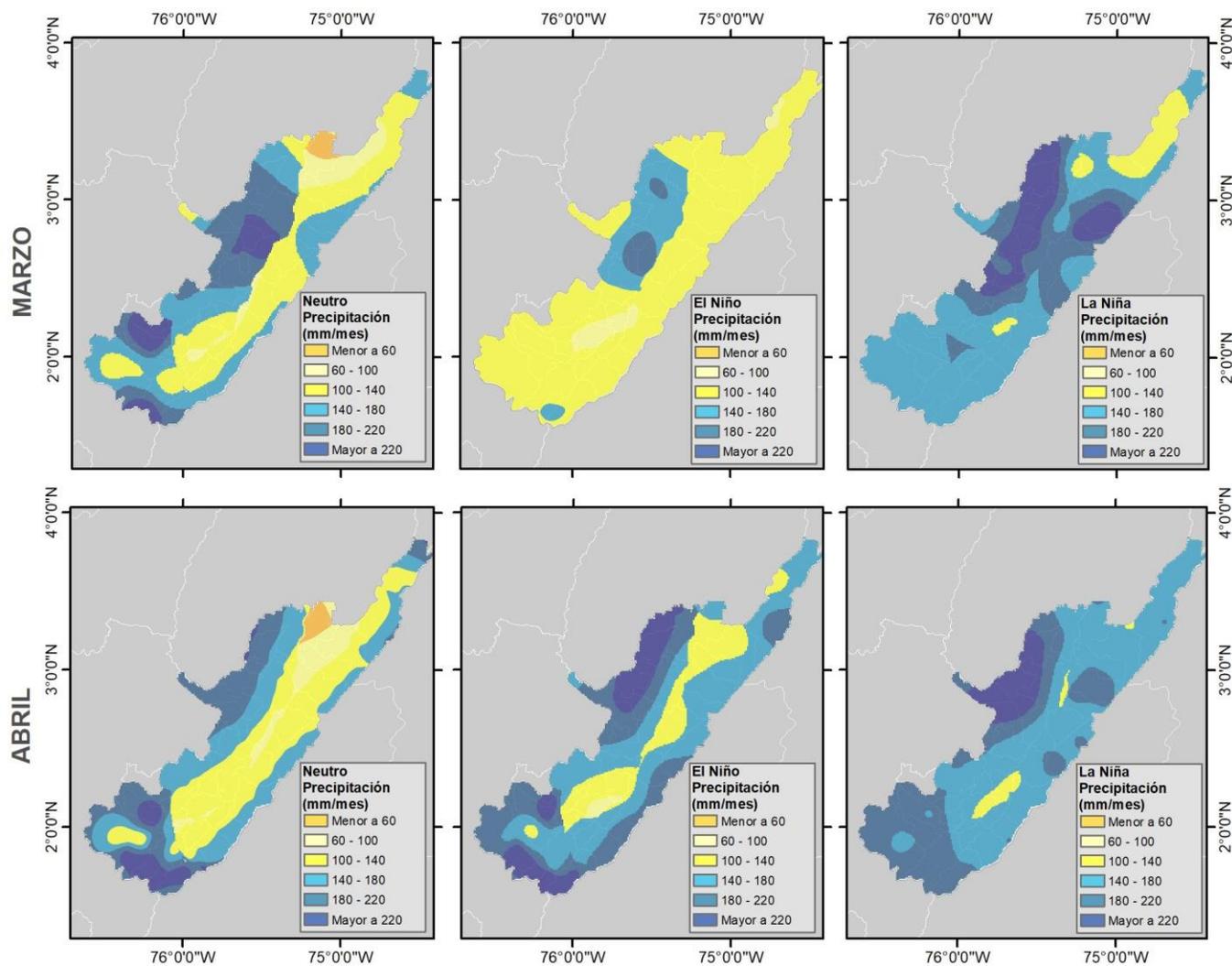


Figura 37. Mapas Temáticos precipitación Marzo y abril

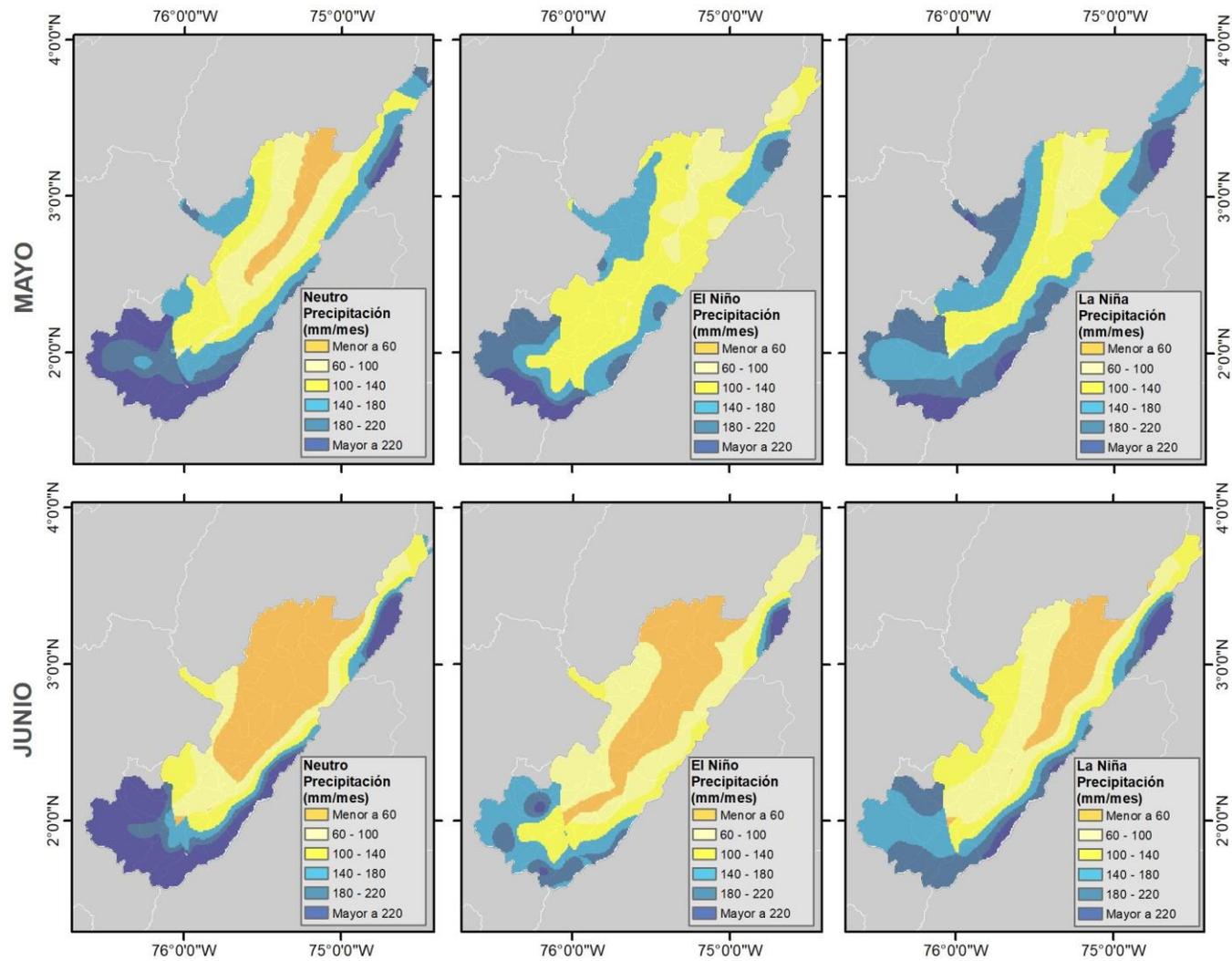


Figura 38. Mapas Temáticos precipitación Mayo y junio

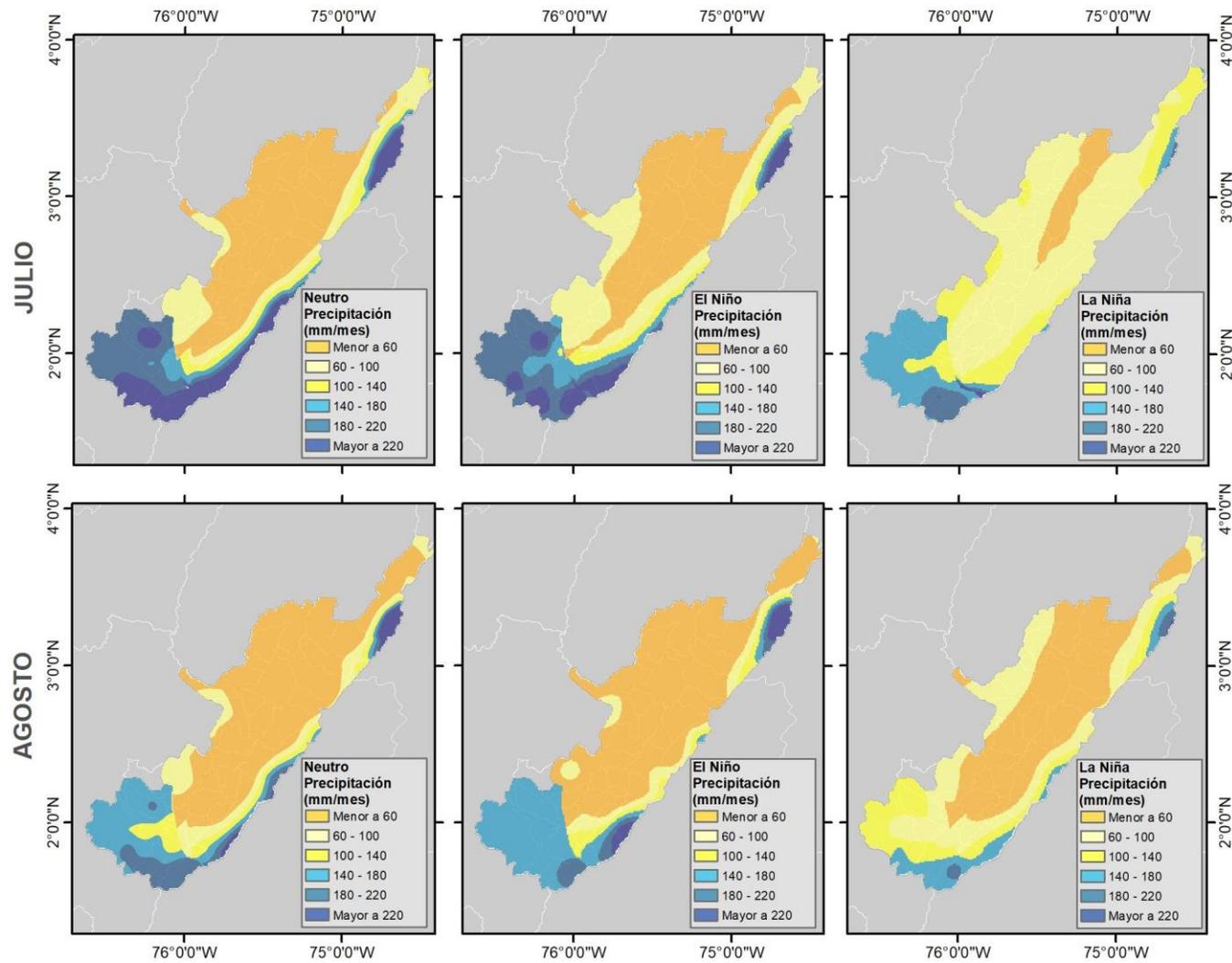


Figura 39. Mapas Temáticos precipitación Julio y agosto

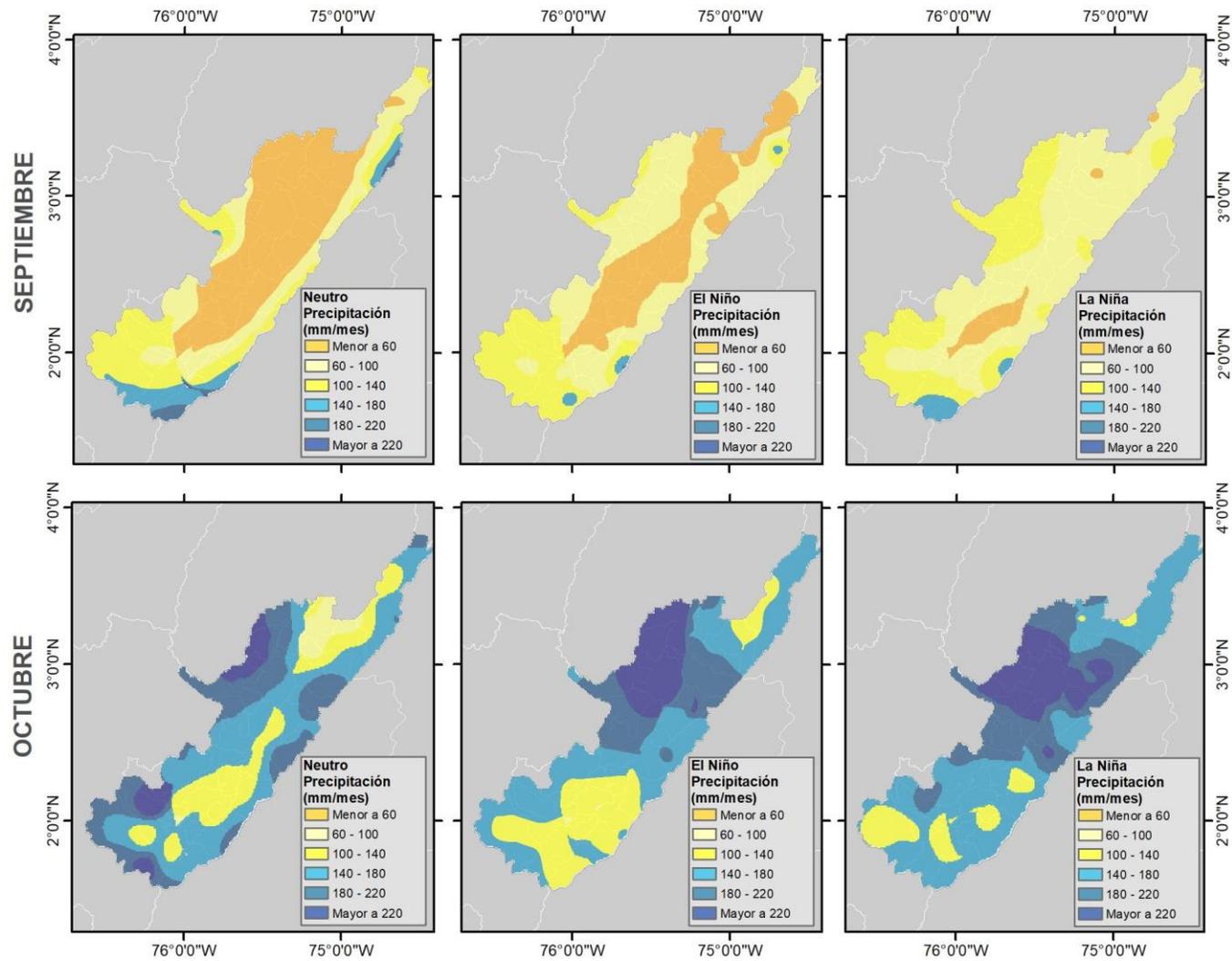


Figura 40. Mapas Temáticos precipitación Septiembre y octubre

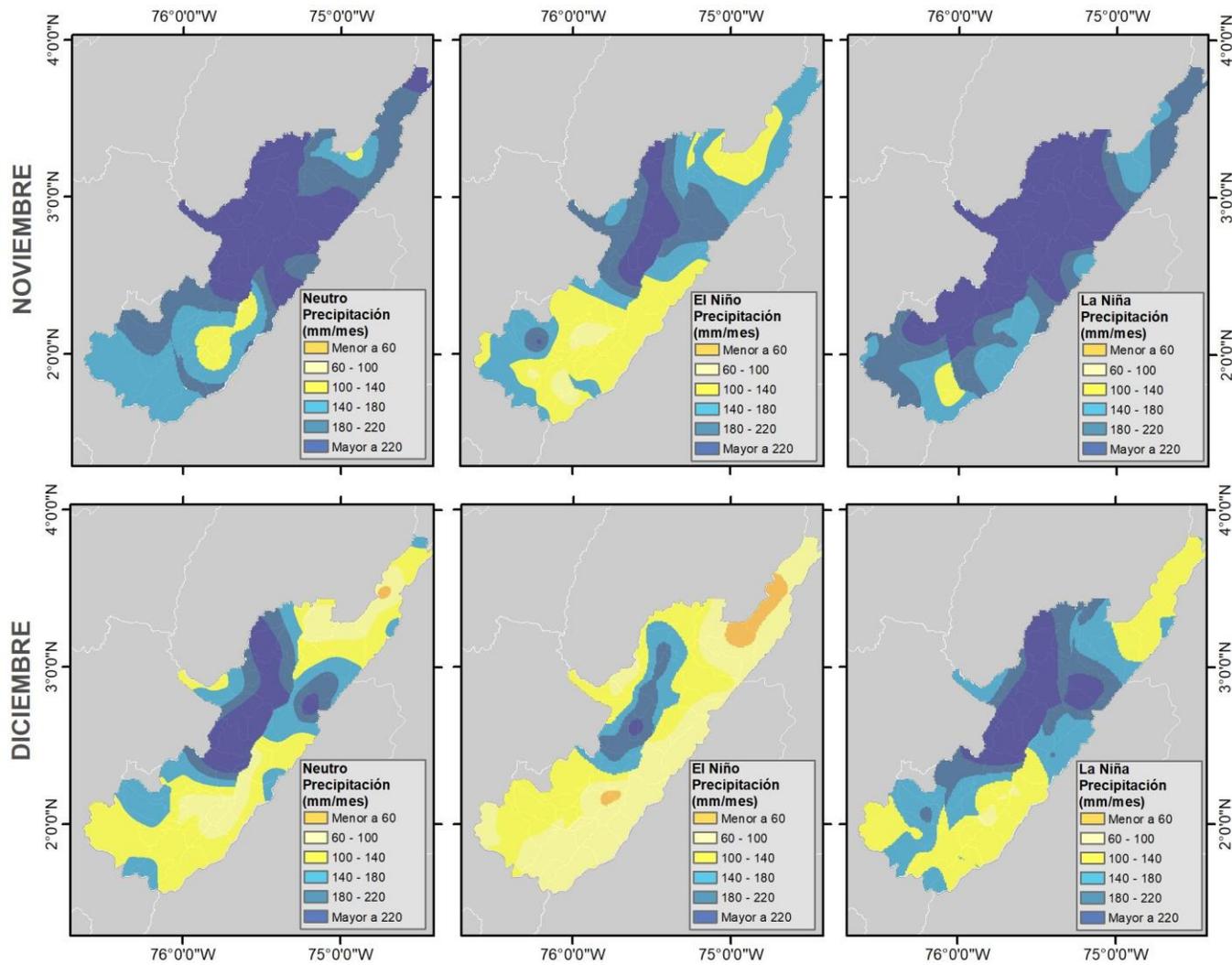


Figura 41. Mapas Temáticos precipitación Noviembre y diciembre

8. Conclusiones

8.1 Metodologías de Interpolación

La Inter comparación de las metodologías de interpolación, generó un total de 576 predicciones espaciales entre las metodologías propuestas, la técnica que presento la mejor predicción de la precipitación mensual en el departamento del Huila fue **Empirical Bayesian Kriging (EBK)**, sin embargo, el resultado estadístico no presenta una variabilidad significativa respecto a la metodología de Kriging Ordinario (OK), por lo que el OK también puede ser un buen candidato para realizar predicciones de la precipitación.

Los estadísticos del coeficiente de regresión en su promedio por metodología no presentan diferencias estadísticas significativas entre las metodologías EBK y OK, sin embargo, al asociar el cuadrado medio del error (ECM), si es posible determinar las diferencias, los cambios sobre la variable en su medida real y sobre la predicción.

Las metodologías no determinísticas EBK, OK y cokriging, mostraron la mejor predicción y los valores estadísticos de validación más ajustados que la metodología determinística IDW.

Segmentar las interpolaciones en ecorregiones de interpolación, basados en criterios orográficos y estadísticos, mejoró la estimación de la precipitación a escala mensual para el departamento del Huila.

El uso de la covariable altura, tomada de un modelo de elevación digital (DEM) de 30 metros, para métodos de interpolación como el cokriging, mejoro el ajuste del modelo, sin embargo, los resultados no presentan diferencias estadísticas respecto a las demás metodologías. Se sugiere usar un modelo de elevación con mejor resolución espacial para buscar mejorar la predicción del modelo de interpolación.

8.2 Selección de nuevos sitios para futuras estaciones climáticas

La metodología propuesta para generar en ordenamiento de las estaciones con el uso del lagsize y la regresión lineal, con base en el uso de las estaciones a su alrededor, presento una forma sencilla y práctica, que permite encontrar el área de influencia de las estaciones por ecorregión de interpolación, con la finalidad de poder observar con herramientas de Geoproceso los sitios que **no** poseen un **área**

de influencia, y sobre estos espacios realizar el trabajo de ubicación de las nuevas estaciones como lo presenta la figura 33. El total de estaciones que se deben instalar para cubrir toda el área del departamento son 68, discriminadas por ecorregiones de la siguiente manera: para la ecorregión 1 se deben instalar 18, en la ecorregión 2 se deben colocar 13 y finalmente en el área de macizo se deben ubicar 37 estaciones (Tabla 13)

8.3 Mínimo de estaciones para interpolar

El análisis de los resultados estadísticos, presentan el 80% de las estaciones como el porcentaje mínimo de estaciones a interpolar, sin perder estimación de la variable; el número mínimo de estaciones para interpolar según la investigación es 92 para el total de las estaciones que poseen precipitación. Cabe destacar que, para generar la predicción de la precipitación, es fundamental el uso de **todas las estaciones posibles obtenidas**, para generar el mejor pronóstico espacial. A su vez, una mayor densidad de estaciones climáticas, es fundamental en la interpolación, para poder mejorar la estimación de la metodología en cualquier escala temporal.

8.4 Comportamiento espacial de la precipitación

El departamento del Huila presenta una precipitación anual acumulada mayor en la zona del macizo colombiano o ecorregión 3 en donde están ubicados los municipios de Pitalito, San Agustín, Isnos, Acevedo, Timaná, Palestina y Oporapa, la segunda zona con mayor precipitación es la ecorregión 1 y la zona que presenta una menor acumulación en su precipitación es la ecorregión 2. El área más seca y donde la precipitación acumulada mensual es más escasa, está ubicada al norte del departamento entre los municipios de Aipe y Villavieja, denominada el desierto de la Tatacoa. Cabe destacar el componente orográfico, en su componente altitudinal, como una variable física espacial, es directamente dependiente de la precipitación, pues los mapas de predicción presentan las mayores acumulaciones de lluvia sobre las zonas con mayor altitud, y las zonas con menor altitud muestran las acumulaciones más bajas.

8.5 Análisis de la precipitación los escenarios de variabilidad climática

El departamento del Huila presenta dos periodos húmedos y dos periodos secos, dichos periodos están distribuidos así: enero se presenta como un mes seco, para febrero inicia la transición de periodo seco a húmedo y así continua hasta el mes de mayo en donde nuevamente llega un periodo seco, aproximadamente este periodo húmedo pueden ser 3 meses que inician en febrero y terminan en mayo (Figuras 36 a 38). El inicio del primer periodo seco inicia en junio y finaliza en septiembre con la llegada de las lluvias de octubre, este periodo está representado por 4 meses y constituye el periodo seco más amplio del año (Figuras 38 a 40). En octubre inicia un nuevo periodo húmedo que finaliza en noviembre con la disminución de la lluvia en diciembre, este periodo es de aproximada 3 meses y constituye el segundo periodo húmedo del año; finalmente el último periodo inicia en diciembre y finaliza en enero, este es el periodo más corto, dura aproximadamente 2 meses y constituye el primero de los periodos secos al inicio de año. (Figuras 41 y 36)

El aumento de los periodos húmedos a principio de año inicia en el mes de febrero y finaliza sobre el mes de abril (Figuras 36 y 37), cabe anotar que la precipitación en los tres escenarios de variabilidad Neutro, El Niño y La Niña, siempre inicia el aumento de las lluvias sobre la cordillera Oriental en el mes de febrero (Figura 36). En el segundo semestre del año el aumento de las lluvias en los tres escenarios de variabilidad climática sobre la zona norte del departamento del Huila en los meses de octubre, noviembre y diciembre, en la mayor parte de su área con precipitaciones acumuladas por encima de los 180 mm por mes, a diferencia de la zona sur sobre la misma temporalidad (Figuras 40 y 41).

En los meses de enero y febrero se presentan precipitaciones por debajo de los 140 mm mensuales acumulados a diferencia de la zona norte; es claro que en el escenario El Niño sobre la misma temporalidad se presenta una reducción de las lluvias inferior a 100 mm en el mes de enero, sin embargo, en los eventos La Niña se presenta rangos entre los 140 y 180 mm en el mes de febrero evidenciando el aumento de las lluvias producto del fenómeno climático (Figura 36).

Se presenta una discontinuidad en los resultados de la predicción espacial sobre la precipitación mensual acumulada entre la zona de macizo o ecorregión 3, respecto con el área sur de las ecorregiones 1 y 2, en los meses mayo, junio, julio y agosto, esta discontinuidad en la predicción se presenta por la baja densidad de estaciones en el área para simular la precipitación mensual acumulada (Figuras 38 y 39).

9.Recomendaciones

9.1 Metodologías de interpolación

Para realizar una correcta interpolación los datos previos al ingreso del interpolador se deben normalizar y depurar, eliminar datos faltantes, depurar outlayers y datos extremos, este debe ser uno de los procesos más importantes para el desarrollo metodológico de cualquier variable a predecir. Además, realizar el análisis exploratorio de datos y la estadística descriptiva permitirá observar el movimiento de la variable, permitiendo tomar decisiones para generar la interpolación, utilizando la segmentación de las muestras para mejorar su ajuste predictivo o por el contrario realizar una sola predicción.

Segmentar las interpolaciones por regiones, con patrones de similitud estadística en su variable, generará la mejor estimación posible sobre las interpolaciones a escala mensual sobre la variable.

9.2 Técnicas para ubicar nuevas estaciones.

Con el uso de los polígonos de Voronoi y técnicas de geoprocés, es posible ubicar los espacios que no presentan área de influencia sobre las estaciones o las muestras que se utilizarán como entrada en la interpolación. Se recomienda el uso de la metodología descrita en 7.2 para poder encontrar los espacios sin área de influencia y poder generar una ubicación de posibles nuevas estaciones.

9.3 Porcentaje mínimo de estaciones a interpolar

La disminución porcentual de las estaciones o muestras de entrada a cada una de las metodologías de interpolación, permitirá la selección con técnicas de validación estadística, determinar un número o porcentaje de las estaciones que se pueden interpolar sin perder la significancia estadística, como se describe en el ítem 7.1.2.

9.4 Cartografía temática de precipitación

El uso de geoprocés, metodologías y software de análisis espacial, permite generar la cartografía temática y genera la posibilidad de realizar una evaluación visual de los fenómenos que allí se presentan. En nuestro caso con la precipitación, es posible apreciar los cambios que presenta la variable en su temporalidad, y los cambios que sufren en escenarios de variabilidad climática.

Como recomendación principal, el uso de una paleta de colores permite la identificar y apreciar el comportamiento de los fenómenos en el espacio a diferencia de utilizar tonos monocromáticos.

9.5 Precipitación los escenarios de variabilidad climática

El modelamiento espacio temporal y la obtención de una buena base de datos climática permite conocer del comportamiento de las lluvias en el año en escenarios de variabilidad, que es de vital importancia para generar recomendaciones y anticipar posibles riesgos que se presenten en diferentes sectores económicos.

Como lo evidencian las conclusiones y presenta la cartografía temática en las figuras 36 a 41, el departamento del Huila presenta una precipitación de características bimodales, dichas condiciones permiten ajustar las labores agrarias conforme las especificaciones técnicas de los cultivos como: fertilizar en los periodos húmedos, realizar podas, programar actividades de siembra y cosechas basados en las características de la precipitación. En temas de riesgo y prevención de desastres, anticiparse y recomendar precauciones en eventos climáticos como El Niño y La Niña, con la finalidad de evitar incendios, aumentos en los caudales de ríos y quebradas, avenidas torrenciales y derrumbes.

10. Referencias bibliográficas

- A, S. (06 de 08 de 2018). *Atlas Geográfico. Departamento del Huila*. Obtenido de Atlas Geográfico: www.atlasgeografico.net
- Apaza, A. (2012). *Calculo Numérico*. JTP-Cálculo Numérico.
- Banco Interamericano de Desarrollo, (BID); Comisión Económica para América Latina y el Caribe, (CEPAL); (2012). *Valoración de daños y pérdidas, Ola invernal en Colombia 2010-2011*. Bogotá: Misión BID - Cepal.
- Calvo, N. (2011). Interpolación. *Computación Grafica Facultad Ingeniería y Ciencias Hídricas*, 11.
- CAM. (2014). *Plan de cambio climático Huila 2050: preparándose para el cambio climático*. Neiva: USAID, FCMC.
- CARDER. (2004). *Ecorregión eje cafetero, un territorio de Oportunidades. 2a.ed.* Pereira: Corporación autónoma regional de Risaralda.
- Casas Anguita, J., Repullo Labrador, J., & Donado Campos, J. (2003). La encuesta como técnica de investigación. Elaboración de cuestionarios y tratamiento estadístico de los datos. *Aten Primaria*, 527-537.
- Castillo Ibarra, D., Ruiz Corral, J., Flores Garmica, J., & González Eguiarte, D. (2007). Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco. *Terra Latinoamericana*, 187-194.
- Cenicafé, F. (2017). *Definición de las zonas agroecológicas para la caficultura del Huila y ajustes en el sistema productivo*. Manizales.
- Cifuentes, A. (2016). *Evaluación de diferentes métodos de interpolación para la variable precipitación en el departamento de Caldas- Colombia*. Manizales: Universidad de Manizales.
- Cortés C., A., Botero H., B., & Franco R., C. (2009). Análisis de la variabilidad de la magnitud e intensidad de la lluvia sobre la ciudad de Manizales. *Universidad Nacional*, 1-5.
- D G Rossiter. (2012). *Technical Note: Co-kriging with the gstat package of the R environment for statistical computing*. Enschede: University of Twente, Faculty of Geo-Information Science & Earth.
- Da Silva, A. (2000). Potencial Edafoclimático da “Chapada Diamantina” no estado da Bahia para cultivo de Cítrus. *Rev. Brasileira de Agrometeorología* 8: 133-139.

- Díaz Padilla, G., Sánchez Cohen, I., Quiroz, R., Garatuza Payán, J., Watts Thorp, C., & Cruz Medina, R. (09 de 2008). Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de Barlovento. *Agricultura Técnica en México*, 279-287.
- Díaz Viera, M. (2002). *Geoestadística Aplicada*. La Habana, Cuba: Instituto de Geofísica, UNAM.
- Díaz Viera, M. (2002). *Geoestadística Aplicada*. La Habana: Instituto de geofísica, UNAM.
- Díaz, A. C. (1991). *Muestreo Estadístico*. Medellín: Acesa.
- ESRI. (27 de 04 de 2017). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de ArcMap ¿Qué son los datos ráster?: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- ESRI. (01 de 02 de 2012). *ArcGIS Desktop: Release 10.2*. Redlands, Redlands, CA:, California.
- FAO. (1997). *Zonificación Agroecológica*. Roma: FAO.
- Felicísimo, A. (2009). *Glosario de términos usados en el trabajo con Sistemas de Información Geográfica*. Pereira: <http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/glosario.pdf>.
- FNC Cenicafé; CT&I SGR Huila. (2016). *Definición de las zonas agroecológicas para la caficultura del Huila y ajustes en el sistema productivo*. Manizales: Cenicafé.
- FNC, & Cafeteros, F. N. (2016). *SIC@*. Bogotá: 2016.
- García Cruz, Y., & Sierra Villagrana, A. (2003). *Manual de Zonificación Ecológica de Especies Forestales y Aplicación de Modelos de Simulación del Efecto del Cambio Climático 2014- 2018*. Ciudad de México: Conafor.
- García, J., Posada-Suárez, H., & Läderach, P. (2014). *Recommendations for the Regionalizing of Coffee Cultivation in Colombia: A Methodological Proposal Based on Agro-Climatic Indices*. Manizales: PLOS ONE, 9(12), e113510. Obtenido de <http://doi.org/10.1371/journal.pone.01135>
- Giraldo, R. (2002). *Introducción a la Geoestadística*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Giraldo, R., Mateu, J., & Delicado, P. (2012). geofd: an R package for function-valued geostatistical prediction. *Revista Colombiana de Estadística*, 385-407.
- Gómez, L. C. (1991). *Ecotopos Cafeteros de Colombia*. Bogotá: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

- González Morcillo, C. (2007). *Splines: Curvas y Superficies*. Castilla: Universidad de Castilla-La Mancha.
- Goovaerts, P. (2005). *Geostatistical Modeling of the Spaces of Local, Spatial, and Response Uncertainty for Continuous Petrophysical Properties*. Ann Arbor, Michigan, U.S.A.: University of Michigan.
- Huila, G. d. (02 de 02 de 2017). *información General del Departamento del Huila*. Obtenido de Gobernación del Huila: <http://www.huila.gov.co/conoce-el-huila/informacion-del-departamento>
- Hutchinson, M. (1997). *Anusplin versión 3.2*. Canberra.
- Hutchinson, M. (1998). Interpolation of Rainfall Data with Thin Plate Smoothing Splines -Part 1: Two Dimensional Smoothing of Data with Short Range Correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 139-152.
- Hutchinson, M., & Xu, T. (2004). *Anusplin versión 4.4 User guide*. Canberra: Australian National University.
- IDEAM. (2007). *Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia*. Bogotá: IDEAM, subdirección de Meteorología.
- IDEAM. (14 de 05 de 2017). <http://www.ideam.gov.co/>. Obtenido de TIEMPO Y CLIMA: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>
- IDEAM, Rangel, E., & Torres, L. (2005). *Protocolo para el control de la Calidad de la Información meteorológica en las etapas de obtención, evaluación, verificación, calculo y procesamiento*. Bogotá: 2005.
- Jaramillo Robledo, A. (2005). *Clima Andino y Café en Colombia*. Chinchiná, Caldas: Cenicafé.
- Jaramillo, A. y. (2002). *Desarrollo de una aplicación de cómputo para el cálculo de balance hídrico en cafetales*. Cenicafé, Chinchiná, Caldas.
- Jordán, A., & Bellinfante, N. (2000). Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). *Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola*, 83-92.
- Krige, D. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the chemistry*, 119-139.
- Matheron, G. (1962). *Traité de géostatistique appliquée. Mémoires du Bureau de recherches géologiques et minières*.

-
- Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (1997). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. *Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile*, 13-27.
- Mejía, F., Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J., Hoyos, C., Mantilla, R., . . . Botero, B. (1999). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *DYNA, Revista de la facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín*, 7-15.
- Montealegre, J. E. (2009). *Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala*. Bogotá.
- NASA. (2000). *National Aeronautics and Space Administration*. Obtenido de NASA: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataproduct.htm>
- National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA Research). (04 de 05 de 2017). *Earth System Research Laboratory*. Obtenido de NOAA: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>
- Núñez-López, D., Treviño-Garza, E., & Jiménez-Pérez, J. (2013). *Interpolación espacial de la precipitación media mensual en la cuenca del río Bravo/Grande* (Vol. IV). Ciudad de México, México: Tecnología y Ciencias del Agua.
- OMM. (2007). *Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)*. Ginebra: © Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Recuperado el 31 de 10 de 2018, de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf
- Peña Q, A., Ramírez B, V., Valencia A, J., & Jaramillo R, A. (2012). La Lluvia como factor de Amenaza para el cultivo del café en Colombia. *Avances Técnicos* 415, 2-8.
- Pérez Paredes, D. (2016). *Comparación de métodos de interpolación geoestadísticos con y sin variables auxiliares para la precipitación anual (2003-2008) en Ecuador*. Cuenca-Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Pérez-Planells, L., Delegido, J., Rivera-Caicedo, J., & Verrelst, J. (2015). Análisis de métodos de validación cruzada para la obtención robusta de parámetros biofísicos. *Revista de Teledetección (Researchgate)*, 55-64.
- Portalés, C., Boronat, N., Pardo Pascual, J. E., & Balguer beser, A. (2010). Seasonal precipitation at the Valencia region with multivariate method using geographic and topographic information. *Royal Meteorological Society (RMetS)*, 1547-1563.

- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M., Quiceno, N., & Mantilla, R. (2001). Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water resources research*, 2169-2178.
- Ramírez, V. H., Arcila P, J., Jaramillo R, A., Rendon, J., Cuesta G, G., García L, J., . . . Peña Q, A. (2011). Variabilidad climática y la floración del café en Colombia. *Avances Técnicos* 407, 2-8.
- Ramírez Builes, V., & Arcila Pulgarín, J. (2014). Criterios para definir la densidad máxima de siembra de café. *Avances Técnicos cenicafé*, 1-8.
- Ramírez Builes, V., & Jaramillo Robledo, A. (2009). Relación entre el Índice Oceánico de El Niño y la lluvia, en la región Andina central de Colombia. *Cenicafé*, 161-172.
- Ramírez Builes, V., Jaramillo Robledo, Á., & Arcila Pulgarín, J. (2010). Rangos Adecuados de Lluvia para el Cultivo de Café en Colombia. *Avances Técnicos* 395, 1-8.
- Ramsay, J., Wickham, H., & Ramsay, M. (2014). Functional Data Analysis Package 'fda'. CRAN, 70. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.406.5397&rep=rep1&type=pdf>
- Rovedo, A. (08 de 12 de 2014). Panorama Cafetero. *Diario del Huila, Economía.*, pág. 10.
- Salvador, M. F., & Gallardo, P. V. (06 de 08 de 2003). ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS (A.E.D.). Obtenido de 5campus.com: <http://www.5campus.com/leccion/aed>
- USGS. (2017). *United States Geological Survey*. Obtenido de USGS: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Watson, D., & Philip, G. (1985). A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geoprocessing*, 315-327.

11. Anexos

Anexo 1. Base de datos Climática escenario Neutro departamento del Huila

No.	Estación	Longitud	Latitud	Altitud	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
1	21010040	-76.0857	1.961472	1334	78.0	116.8	127.0	152.5	149.6	134.7	125.5	99.0	87.9	114.2	125.6	98.9
2	21010050	-76.2149	1.931583	1720	87.5	121.1	129.8	145.0	149.5	129.7	126.6	97.6	77.9	128.1	138.5	115.9
3	21010060	-76.1721	2.020833	1763	118.5	146.1	149.6	192.8	189.1	176.5	178.2	124.6	103.8	156.9	179.0	139.8
4	21010100	-76.1333	1.724833	1530	80.9	130.6	144.2	173.3	197.0	201.0	185.9	154.1	126.6	128.2	123.9	109.2
5	21010110	-76.0744	1.844917	1265	58.8	103.5	114.0	140.7	147.1	138.8	124.8	102.0	84.3	111.3	107.0	88.6
6	21010130	-76.2467	1.810389	1660	98.2	117.4	156.3	199.0	205.1	200.8	175.9	141.2	115.6	167.2	156.0	125.0
7	21010140	-76.3608	1.864389	1940	118.1	141.3	163.2	196.1	215.9	226.0	211.7	175.0	139.0	169.8	159.6	137.9
8	21010160	-76.3942	1.899444	1724	92.2	106.9	118.4	155.4	169.4	181.0	176.2	133.6	108.7	122.2	152.1	115.8
9	21010170	-76.1725	1.901389	1700	99.5	132.1	135.7	165.5	164.0	156.5	168.3	127.3	115.3	140.7	149.1	121.0
10	21010180	-76.1552	1.695278	1700	92.1	120.2	164.0	217.7	240.0	223.2	198.6	167.8	151.0	141.5	136.4	122.0
11	21010190	-76.2497	1.848944	1700	86.4	106.8	137.9	171.5	181.0	194.0	191.8	155.2	97.2	119.8	128.3	104.6
12	21010210	-76.1889	1.713806	1674	131.3	139.7	186.5	221.3	234.8	241.5	222.8	184.9	144.1	187.7	164.0	141.4
13	21010220	-76.185	2.065889	1625	145.5	192.3	197.4	206.4	207.5	226.4	226.7	171.5	132.6	228.2	229.3	179.7
14	21010230	-76.3043	1.905806	1949	94.1	119.6	119.9	141.0	150.2	143.6	137.9	103.9	87.7	122.8	131.7	127.5
15	21010250	-76.2535	1.977806	2000	104.3	142.2	139.5	159.2	158.2	165.0	164.3	107.9	91.8	134.9	163.0	126.2
16	21015030	-76.295	1.888472	1800	85.8	107.4	128.7	153.5	152.7	151.0	140.5	102.7	92.5	115.1	138.9	121.3
17	21025020	-75.8	2.066667	1352	80.0	117.9	112.9	124.6	131.3	89.7	69.3	45.1	64.1	117.0	127.0	82.9
18	21030050	-75.7754	2.02625	893	77.3	120.3	122.8	127.9	131.5	94.1	85.3	64.0	68.1	110.0	128.7	86.1
19	21030060	-76.0221	1.714278	1345	80.6	116.2	147.6	199.3	220.4	251.5	236.4	225.8	171.9	137.1	117.1	102.2
20	21030080	-75.556	1.807917	1350	75.6	101.7	139.1	160.9	184.2	190.4	169.8	148.5	133.9	114.5	105.8	87.9
21	21030090	-75.6777	2.202944	755	71.5	90.0	116.1	111.9	102.3	73.4	55.2	38.6	48.5	108.1	123.8	89.4
22	21030110	-75.6819	2.07775	1190	99.3	150.6	165.5	162.5	163.9	141.4	113.0	82.5	90.5	151.9	168.5	109.3
23	21035020	-75.679	1.913889	2102	93.5	119.6	161.0	204.7	241.5	275.4	301.2	224.4	184.4	178.9	146.3	110.7

24	21040010	-75.7667	2.25	905	120.5	146.6	171.9	153.8	144.4	85.5	76.5	39.7	67.2	144.0	184.0	135.6
25	21040020	-75.7285	2.334028	2210	170.5	171.0	189.1	177.2	174.6	82.4	77.8	41.8	82.4	199.9	248.6	224.4
26	21040030	-76.1003	2.030944	1614	103.8	115.8	146.7	169.8	157.8	138.6	124.4	99.6	92.4	139.9	147.3	114.6
27	21040040	-75.6486	2.232361	688	64.9	92.8	103.3	99.6	96.7	70.6	50.4	28.8	43.7	120.6	124.3	88.6
28	21040050	-75.8228	2.108833	830	68.6	101.6	115.4	103.5	94.1	59.6	56.8	40.9	36.3	90.2	128.8	91.1
29	21040060	-75.7794	2.199361	805	70.0	95.7	104.7	93.4	92.5	64.8	52.9	27.7	45.0	116.0	121.5	73.9
30	21040070	-75.6833	2.216667	700	70.0	95.7	104.7	93.4	92.5	64.8	52.9	27.7	45.0	116.0	121.5	73.9
31	21045010	-75.7051	2.281583	780	91.9	120.8	125.9	105.0	95.5	54.3	44.9	28.6	42.2	130.2	145.5	123.0
32	21050090	-75.8065	2.551444	1545	178.4	209.9	211.5	216.5	176.0	110.2	93.7	67.9	91.5	210.7	252.4	232.0
33	21050140	-75.6157	2.510778	900	169.8	172.5	213.0	163.4	111.7	55.4	36.0	26.4	63.0	198.7	284.9	255.8
34	21050150	-75.7583	2.458417	788	189.8	187.8	210.0	162.4	123.9	49.7	39.8	28.5	52.0	209.0	257.1	260.8
35	21050160	-76.0101	2.317056	1745	117.7	133.3	139.3	157.2	155.8	123.6	112.7	79.0	91.3	165.2	167.8	147.7
36	21050170	-75.7589	2.652389	1950	129.2	138.8	181.4	215.4	178.9	128.5	133.3	98.6	120.4	195.2	222.5	164.3
37	21050190	-76.1174	2.218056	2220	109.1	148.1	171.5	192.1	204.4	174.3	151.6	115.4	110.8	191.6	176.6	130.9
38	21050290	-75.7285	2.491278	825	161.6	163.8	189.6	162.9	122.2	47.7	42.2	27.5	42.8	183.9	244.5	239.7
39	21055020	-75.8913	2.378278	1070	148.4	172.2	185.9	165.2	143.4	87.7	68.0	47.1	67.6	160.4	177.2	170.5
40	21060040	-75.5486	2.202028	1330	101.9	131.5	151.0	166.9	157.7	129.9	105.5	66.6	78.2	142.9	148.0	125.0
41	21060070	-75.5381	2.388917	850	78.9	107.3	125.1	121.7	104.4	66.8	56.7	38.7	49.0	136.5	134.9	97.8
42	21060080	-75.6051	2.190083	990	84.0	101.4	110.9	124.0	112.9	99.4	75.8	51.6	52.8	117.7	119.3	90.1
43	21060090	-75.4355	2.574806	636	108.7	122.6	162.8	130.0	113.1	40.1	35.1	24.3	58.2	172.8	212.7	162.8
44	21060100	-75.5036	2.317167	1460	107.4	136.8	168.8	181.3	171.9	122.7	111.6	75.8	95.0	156.9	161.5	117.1
45	21060110	-75.6247	2.3215	721	74.6	104.1	120.0	105.4	99.8	56.0	41.4	28.0	45.4	127.4	134.2	107.0
46	21065040	-75.5294	2.2525	1270	91.8	105.0	125.4	148.1	140.6	117.3	95.5	65.9	79.9	128.5	130.1	109.7
47	21080030	-75.5289	2.669611	600	166.9	161.2	219.4	170.2	122.6	42.1	38.9	18.5	51.6	196.9	283.7	226.0
48	21080070	-75.5809	2.636917	650	223.9	166.0	222.5	213.9	148.4	47.3	32.8	19.2	73.9	214.2	321.6	297.4
49	21080080	-75.632	2.793056	1800	125.6	154.4	185.2	187.0	146.4	78.5	60.9	57.6	107.0	189.4	180.6	136.5
50	21080100	-75.6131	2.772833	1800	194.0	238.1	235.0	238.2	182.0	101.4	85.1	55.6	121.5	239.0	269.2	233.8
51	21080110	-75.7187	2.578694	1000	167.6	171.9	182.0	187.8	139.3	83.7	50.5	33.3	61.0	152.2	221.2	204.7
52	21080130	-75.6212	2.59375	790	207.2	176.9	231.7	186.6	143.0	59.7	46.3	32.2	71.7	219.4	305.9	310.8

53	21085020	-75.6293	2.652194	1095	198.3	207.1	220.9	212.5	164.8	65.8	45.4	38.4	88.8	207.0	291.9	265.4
54	21085030	-75.5827	2.760444	1030	202.6	207.6	246.5	232.4	169.7	73.2	51.9	43.3	86.9	238.6	292.4	262.0
55	21085040	-75.6656	2.662806	1650	218.4	220.5	253.0	230.1	183.3	93.4	74.3	47.8	94.8	179.4	264.8	234.9
56	21090020	-75.3992	2.855556	620	164.2	169.9	192.8	202.2	139.7	40.6	33.8	23.0	64.6	268.4	274.7	216.6
57	21090030	-75.3167	2.916667	450	86.5	129.3	155.9	112.1	62.8	28.5	26.5	14.7	67.5	177.3	191.9	148.4
58	21090040	-75.3475	2.777583	460	128.1	138.7	184.8	162.4	107.7	37.1	33.3	17.7	47.4	186.6	242.5	199.2
59	21090060	-75.3333	2.783333	450	123.2	126.5	215.0	138.7	90.8	36.4	34.2	19.8	68.4	201.4	252.7	208.6
60	21090090	-75.35	2.833333	520	116.8	131.4	165.7	120.4	85.9	30.6	39.2	19.0	71.7	186.9	236.4	169.2
61	21090110	-75.3399	2.865528	454	111.3	118.5	159.1	146.8	80.2	37.1	31.3	15.9	48.7	196.5	238.6	168.0
62	21090120	-75.3667	2.783333	455	123.4	145.7	174.5	129.7	86.1	38.6	30.7	18.1	76.4	190.4	241.4	172.6
63	21090140	-75.3833	2.883333	480	125.1	131.3	192.9	132.0	82.7	30.7	32.6	19.9	87.8	191.2	224.4	174.5
64	21090150	-75.3167	2.85	450	95.9	102.6	160.5	110.0	62.3	34.4	27.4	12.7	63.6	199.7	217.5	158.9
65	21095010	-75.3312	2.828806	460	139.5	133.4	167.8	160.8	96.0	37.8	36.6	18.6	56.9	198.7	234.6	193.8
66	21100070	-75.2351	2.561722	1750	79.3	97.2	138.6	186.4	164.7	132.8	112.8	97.2	86.1	192.9	174.8	131.7
67	21100080	-75.2067	2.615278	1525	69.4	92.4	128.0	134.2	128.7	110.8	87.3	67.8	84.3	124.5	139.4	107.4
68	21100120	-75.2333	2.7	880	162.7	157.5	190.4	133.1	125.6	73.0	38.8	40.0	95.1	239.1	229.9	169.1
69	21100140	-75.4009	2.434806	1380	128.6	131.4	168.6	193.3	168.5	112.5	89.8	75.4	81.2	225.7	223.6	158.8
70	21105030	-75.3223	2.521694	1155	76.1	82.9	127.6	125.5	106.8	71.1	57.0	45.3	52.1	144.8	158.5	116.7
71	21105040	-75.2989	2.696806	680	113.2	127.4	159.6	144.6	103.1	51.1	43.8	22.9	45.2	168.5	210.2	152.7
72	21105050	-75.4179	2.599667	553	113.0	117.6	161.2	140.8	102.7	41.2	37.2	24.6	47.1	165.7	223.4	173.5
73	21110040	-75.1684	3.074889	548	77.3	93.6	152.8	130.1	99.3	33.7	33.2	16.0	42.6	156.7	203.5	145.6
74	21110070	-75.0573	3.150333	615	54.9	84.7	127.0	143.4	99.0	48.7	40.2	27.8	47.7	162.3	194.4	121.5
75	21110090	-75.1693	3.387139	400	86.8	80.3	144.0	149.0	99.6	44.4	29.8	22.9	57.2	184.0	213.8	166.5
76	21110120	-75.2008	3.305333	400	69.4	79.2	110.5	127.7	89.8	35.8	31.8	19.8	55.8	125.5	193.2	134.3
77	21110130	-75.0853	2.8055	1580	127.5	114.6	165.7	148.6	106.3	67.0	62.6	39.5	53.7	183.0	224.3	150.1
78	21110160	-75.199	3.118472	500	81.8	91.6	125.2	122.5	84.1	33.8	37.7	20.9	45.6	157.3	192.8	131.0
79	21110180	-75.159	3.036028	591	67.2	92.3	145.4	148.2	92.2	33.4	34.8	16.0	45.9	180.1	215.0	150.8
80	21110290	-75.1703	3.349556	400	77.1	95.2	146.3	160.8	112.1	40.5	32.2	25.0	65.0	192.9	242.8	169.4
81	21110310	-75.2	3.333333	400	89.0	75.1	132.0	93.9	91.2	26.7	24.7	20.0	78.5	165.8	190.9	124.5

82	21110330	-75.2184	3.187389	429	76.0	96.3	128.0	137.5	83.7	33.0	33.3	25.5	53.0	164.0	205.1	135.5
83	21110400	-75.1082	2.851139	1160	140.1	141.1	222.0	180.8	119.2	74.1	50.4	38.7	52.5	222.4	274.6	198.7
84	21110430	-75.1204	2.906139	1060	117.1	140.4	191.8	177.9	125.6	56.2	50.3	30.9	71.1	188.2	250.5	185.5
85	21110440	-75.2393	2.795667	735	154.2	165.2	201.9	207.6	126.6	49.2	49.6	20.4	62.2	233.1	308.7	217.4
86	21115020	-75.2931	2.94875	439	98.9	137.0	160.0	152.3	86.8	34.4	29.7	18.8	53.8	202.6	247.2	167.9
87	21115060	-75.1841	3.329222	400	73.7	77.2	114.7	139.5	97.9	31.3	27.7	20.6	66.6	156.3	197.9	137.5
88	21115070	-75.073	3.014944	1300	93.0	108.0	166.7	176.1	140.1	73.6	61.6	41.6	67.3	197.9	213.3	149.4
89	21115080	-75.2163	3.222528	430	71.1	88.0	122.8	141.5	92.5	31.2	28.8	21.9	62.5	162.9	188.8	132.7
90	21115100	-75.0664	2.942639	1100	114.4	125.0	190.7	192.1	136.5	67.6	53.6	45.4	63.0	210.5	229.7	179.0
91	21115140	-74.9211	3.094	2100	63.8	74.1	122.8	120.2	150.9	112.6	85.8	64.9	79.1	147.1	149.6	101.3
92	21115160	-75.0815	3.133056	600	59.4	81.1	125.4	132.6	96.6	45.0	33.4	22.2	48.1	142.0	173.7	112.7
93	21120010	-75.4854	2.97775	1300	218.1	258.3	258.5	210.1	192.0	84.8	66.3	38.5	104.0	272.3	333.4	229.1
94	21120040	-75.3795	3.141083	850	148.1	176.4	221.0	186.1	128.7	57.9	46.0	30.9	80.0	226.9	328.3	211.8
95	21120090	-75.491	2.870333	700	146.7	182.4	205.0	230.1	152.5	57.9	37.9	33.9	80.9	248.1	288.8	225.9
96	21120100	-75.5664	2.865	1105	206.2	230.1	256.9	267.2	206.1	90.4	59.3	58.2	109.9	271.3	290.7	246.7
97	21120130	-75.4261	2.911861	560	152.7	164.2	207.6	200.9	119.9	44.6	34.8	19.9	63.0	242.9	267.1	216.4
98	21125010	-75.5891	2.935694	1300	99.4	131.2	158.3	210.6	172.3	94.8	64.0	59.4	88.9	198.8	191.1	121.8
99	21125020	-75.4451	2.882194	550	143.6	171.0	191.4	185.1	115.5	49.4	35.9	19.7	54.8	167.5	234.0	177.0
100	21130010	-74.9365	3.847333	305	127.5	135.5	180.2	299.5	198.4	84.6	55.3	64.7	117.1	258.5	233.9	183.6
101	21130040	-75.4847	3.080639	1140	167.2	193.0	236.1	223.7	156.9	63.1	47.0	39.2	90.7	230.9	275.0	216.6
102	21130050	-75.2559	3.243556	450	73.4	85.2	115.9	136.9	92.1	30.4	24.9	20.1	54.4	183.3	195.0	139.0
103	21130060	-75.5592	3.007139	2250	163.8	186.5	196.3	213.5	170.6	93.9	70.2	71.8	109.7	257.9	258.3	169.1
104	21130070	-75.45	3.25	850	134.7	143.7	168.5	209.3	176.8	33.5	39.2	24.9	126.2	225.5	287.0	181.1
105	21130080	-75.4923	3.120833	800	164.9	209.3	234.4	258.3	174.4	74.1	44.6	49.8	114.6	280.4	299.9	218.0
106	21130110	-75.4907	3.268583	1085	170.0	178.6	226.7	249.8	181.0	64.3	55.0	49.7	110.3	269.2	284.9	195.8
107	21130170	-75.2667	3.2	450	98.0	88.6	129.9	143.9	108.8	26.2	48.6	23.5	73.7	177.8	195.3	116.4
108	21135050	-75.53	3.098778	1691	167.0	187.8	215.4	205.2	138.2	64.6	65.0	48.9	89.0	234.5	237.0	183.3
109	21140010	-74.904	3.291583	584	49.7	52.6	97.5	116.0	97.6	47.2	44.3	31.8	41.4	108.8	120.0	85.3
110	21140030	-74.9342	3.279222	638	48.6	67.8	101.6	93.7	85.1	50.1	44.5	32.6	50.6	102.7	135.9	95.7

111	21140080	-74.7438	3.480528	1049	55.7	64.3	93.4	115.2	123.3	83.2	62.5	39.4	41.2	136.5	148.7	72.9
112	21140100	-75.1046	3.423	368	80.4	92.5	157.5	154.7	95.3	36.6	24.3	21.8	64.0	179.4	215.5	163.1
113	21140110	-75.0974	3.345361	444	56.8	77.6	122.4	122.4	75.5	36.1	20.2	13.5	43.9	147.4	172.1	114.2
114	21140130	-74.6669	3.645472	2000	79.5	93.4	105.9	150.2	115.7	66.4	62.6	56.5	75.2	127.8	174.5	92.9
115	21145070	-74.7029	3.311028	1476	66.0	90.2	142.5	205.1	275.5	332.4	344.0	255.5	172.3	168.0	186.4	116.4
116	21145080	-74.7029	3.589778	1410	61.7	73.7	115.9	120.5	112.0	63.6	62.1	37.5	53.2	132.3	160.8	90.2

Anexo 2. Base de datos Climática escenario El Niño departamento del Huila

No.	Estación	Longitud	Latitud	Altitud	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
1	21010040	-76.0857	1.9615	1334	38.7	101.3	93.9	165.3	124.5	124.4	140.5	135.0	93.6	111.2	113.4	87.2
2	21010050	-76.2149	1.9316	1720	59.8	143.5	116.1	144.2	132.7	111.9	154.0	122.2	84.7	125.5	116.7	102.7
3	21010060	-76.1721	2.0208	1763	71.0	130.0	114.4	204.4	153.5	147.4	206.9	157.6	127.4	156.9	163.4	104.9
4	21010100	-76.1333	1.7248	1530	55.5	120.8	138.1	176.0	156.8	148.1	184.7	169.9	121.2	112.0	113.1	83.4
5	21010110	-76.0744	1.8449	1265	27.2	104.0	105.7	155.2	130.0	120.9	147.5	138.7	79.8	90.4	82.2	59.5
6	21010130	-76.2467	1.8104	1660	57.6	117.7	120.4	216.0	225.0	165.0	202.3	178.4	113.9	192.7	125.6	99.4
7	21010140	-76.3608	1.8644	1940	58.8	138.7	171.3	261.9	229.2	171.4	258.1	218.0	141.6	171.7	142.0	121.1
8	21010160	-76.3942	1.8994	1724	63.2	87.0	100.0	181.5	218.3	209.3	190.3	169.4	101.1	118.3	141.3	89.2
9	21010170	-76.1725	1.9014	1700	56.5	105.0	93.6	148.3	144.3	115.7	209.1	182.3	132.4	129.6	117.9	92.2
10	21010180	-76.1552	1.6953	1700	59.6	135.2	181.7	280.6	228.6	210.4	224.8	179.1	122.5	130.2	130.7	99.7
11	21010190	-76.2497	1.8489	1700	28.1	96.8	85.2	178.2	186.8	159.7	191.8	229.9	96.9	117.8	94.0	58.6
12	21010210	-76.1889	1.7138	1674	73.7	159.1	143.3	245.9	247.0	211.6	276.5	210.0	141.3	150.5	130.7	97.9
13	21010220	-76.1850	2.0659	1625	75.5	169.9	182.4	241.0	186.5	227.9	263.3	229.4	143.7	212.4	213.5	136.1
14	21010230	-76.3043	1.9058	1949	42.4	112.9	84.1	170.4	151.8	112.2	164.9	129.9	71.6	136.4	112.0	101.3
15	21010250	-76.2535	1.9778	2000	50.8	108.2	95.9	116.3	136.9	134.2	176.1	142.5	110.2	125.0	147.8	122.7
16	21015030	-76.2950	1.8885	1800	50.4	111.5	109.0	176.4	154.7	118.7	154.0	130.2	86.8	104.5	102.4	94.2
17	21025020	-75.8000	2.0667	1352	47.2	125.2	91.8	127.1	122.1	70.7	74.2	47.5	51.7	88.5	103.4	72.1
18	21030050	-75.7754	2.0263	893	35.4	141.1	118.3	164.7	121.8	89.1	96.0	72.4	55.4	96.3	114.7	63.0

19	21030060	-76.0221	1.7143	1345	61.7	130.9	154.4	222.4	199.2	203.5	289.5	265.0	175.7	113.7	90.2	75.3
20	21030080	-75.5560	1.8079	1350	62.3	101.0	123.0	179.6	179.0	130.7	183.0	197.0	142.1	98.6	85.0	80.0
21	21030090	-75.6777	2.2029	755	38.5	60.4	78.1	138.4	89.8	61.6	57.3	43.4	42.2	94.7	112.6	76.3
22	21030110	-75.6819	2.0778	1190	55.2	117.9	135.5	185.1	129.0	104.2	105.6	90.3	101.8	136.8	146.7	65.6
23	21035020	-75.6790	1.9139	2102	74.4	115.3	153.9	233.7	247.5	232.7	362.8	288.5	187.1	164.7	160.2	102.6
24	21040010	-75.7667	2.2500	905	67.3	110.3	128.6	112.8	139.3	60.4	72.7	41.0	70.7	158.1	111.1	87.9
25	21040020	-75.7285	2.3340	2210	103.7	130.8	136.7	203.4	138.5	56.9	75.8	43.6	74.1	201.0	183.8	172.3
26	21040030	-76.1003	2.0309	1614	57.5	114.9	119.4	187.3	128.5	112.6	135.0	127.9	100.3	152.7	114.1	98.2
27	21040040	-75.6486	2.2324	688	35.0	62.9	69.7	98.6	115.3	82.4	53.7	19.5	45.0	106.7	121.9	71.9
28	21040050	-75.8228	2.1088	830	30.2	108.4	73.5	86.3	103.4	43.1	45.7	27.8	36.0	73.5	79.1	62.1
29	21040060	-75.7794	2.1994	805	36.0	65.5	77.5	68.7	100.0	65.6	56.7	18.2	38.7	101.1	113.0	43.4
30	21040070	-75.6833	2.2167	700	36.0	65.5	77.5	68.7	100.0	65.6	56.7	18.2	38.7	101.1	113.0	43.4
31	21045010	-75.7051	2.2816	780	55.4	70.0	80.4	94.2	89.3	55.7	36.3	28.0	43.0	110.5	112.4	103.9
32	21050090	-75.8065	2.5514	1545	102.1	205.9	168.4	177.2	252.5	102.5	89.1	61.0	71.3	191.8	226.5	201.7
33	21050140	-75.6157	2.5108	900	76.1	133.1	181.5	144.8	96.7	53.0	36.2	38.3	64.4	217.8	276.1	186.5
34	21050150	-75.7583	2.4584	788	80.1	138.7	143.5	137.6	118.3	47.4	39.3	20.5	43.6	219.2	187.8	188.6
35	21050160	-76.0101	2.3171	1745	58.6	118.6	113.3	171.3	146.5	84.3	113.1	77.9	102.2	159.5	117.0	113.6
36	21050170	-75.7589	2.6524	1950	81.8	105.0	117.7	229.0	180.5	82.6	133.1	100.5	113.4	194.5	181.9	121.8
37	21050190	-76.1174	2.2181	2220	63.8	132.1	129.5	219.2	203.5	152.8	165.6	131.2	119.9	172.8	142.1	108.2
38	21050290	-75.7285	2.4913	825	67.4	118.5	113.3	165.7	104.7	27.5	34.7	11.7	25.4	192.8	202.5	193.4
39	21055020	-75.8913	2.3783	1070	71.2	159.7	127.8	155.0	105.9	79.0	62.5	49.3	62.1	160.3	128.3	133.7
40	21060040	-75.5486	2.2020	1330	47.4	89.5	138.2	199.0	175.0	91.0	89.1	45.0	88.3	157.5	120.4	95.3
41	21060070	-75.5381	2.3889	850	57.2	83.1	121.0	128.4	124.3	63.8	63.0	39.0	40.9	156.9	97.2	72.4
42	21060080	-75.6051	2.1901	990	34.7	50.9	88.2	139.4	109.3	77.8	71.6	42.0	50.0	116.8	112.8	84.0
43	21060090	-75.4355	2.5748	636	45.5	65.8	131.8	117.8	112.3	34.4	25.4	21.2	36.0	169.5	187.1	117.0
44	21060100	-75.5036	2.3172	1460	57.8	104.0	122.3	208.0	190.3	100.4	124.4	71.0	91.1	171.0	157.8	82.1
45	21060110	-75.6247	2.3215	721	33.9	65.3	76.8	129.4	88.3	52.8	36.4	20.3	43.4	131.3	100.8	67.6
46	21065040	-75.5294	2.2525	1270	45.1	80.6	101.5	175.2	156.2	82.3	97.9	58.4	72.5	147.4	107.0	88.4
47	21080030	-75.5289	2.6696	600	96.0	124.4	227.5	143.9	117.5	27.7	26.3	13.1	37.0	223.8	233.5	180.0

48	21080070	-75.5809	2.6369	650	122.0	118.5	183.6	222.4	172.7	34.7	19.7	16.1	49.7	223.6	254.1	249.8
49	21080080	-75.6320	2.7931	1800	104.2	142.8	158.2	184.0	149.6	80.2	63.2	49.9	98.9	201.2	160.6	109.4
50	21080100	-75.6131	2.7728	1800	129.7	230.4	170.8	223.4	181.2	66.6	112.0	66.3	110.3	240.6	200.4	152.4
51	21080110	-75.7187	2.5787	1000	115.1	168.6	176.5	208.3	106.3	61.5	40.1	18.1	39.7	137.7	192.7	171.1
52	21080130	-75.6212	2.5938	790	100.8	111.4	210.0	179.9	150.2	46.0	37.4	30.6	54.8	249.0	230.8	244.8
53	21085020	-75.6293	2.6522	1095	122.6	165.9	243.8	193.8	186.2	46.1	52.3	33.3	55.4	208.6	271.2	220.4
54	21085030	-75.5827	2.7604	1030	145.3	160.1	214.2	247.2	168.2	80.9	41.3	26.0	63.8	281.8	249.8	210.8
55	21085040	-75.6656	2.6628	1650	137.8	218.5	190.7	208.7	164.9	79.7	66.7	47.3	65.5	152.4	214.8	196.7
56	21090020	-75.3992	2.8556	620	99.4	106.1	156.2	126.8	99.8	50.2	22.6	10.8	73.4	285.2	287.4	153.4
57	21090030	-75.3167	2.9167	450	50.7	36.2	146.4	90.2	85.5	35.9	9.9	10.7	55.8	223.0	186.2	113.0
58	21090040	-75.3475	2.7776	460	78.9	87.6	94.6	78.0	155.8	45.4	21.4	9.8	33.0	174.4	214.2	175.8
59	21090060	-75.3333	2.7833	450	83.2	69.3	129.3	114.7	120.5	30.8	15.5	17.7	64.3	217.2	272.0	176.0
60	21090090	-75.3500	2.8333	520	83.6	50.4	138.5	100.7	86.8	35.4	16.8	12.0	72.5	204.4	255.0	139.5
61	21090110	-75.3399	2.8655	454	65.3	53.0	115.1	141.5	67.5	61.2	14.5	17.3	49.7	204.3	217.7	127.6
62	21090120	-75.3667	2.7833	455	92.0	52.0	155.0	132.7	117.5	46.3	16.0	14.7	80.3	229.6	264.0	138.2
63	21090140	-75.3833	2.8833	480	99.8	46.8	183.3	148.7	85.1	32.5	24.3	9.0	86.1	221.0	233.0	141.0
64	21090150	-75.3167	2.8500	450	62.0	40.3	203.0	110.7	71.7	46.7	7.0	14.0	65.8	261.7	191.9	103.1
65	21095010	-75.3312	2.8288	460	85.3	64.5	118.2	122.0	125.6	24.8	11.0	16.7	50.1	207.6	213.3	162.4
66	21100070	-75.2351	2.5617	1750	41.6	86.8	109.5	184.5	125.8	112.4	117.2	112.9	75.7	152.5	139.9	82.9
67	21100080	-75.2067	2.6153	1525	30.9	73.5	106.5	168.8	115.3	112.6	81.1	59.7	70.0	120.7	122.4	53.8
68	21100120	-75.2333	2.7000	880	97.4	69.0	131.3	148.7	160.8	53.2	28.0	20.1	87.4	326.4	176.9	88.1
69	21100140	-75.4009	2.4348	1380	63.0	70.0	90.6	209.0	144.3	75.6	67.7	31.4	65.4	218.1	132.0	74.7
70	21105030	-75.3223	2.5217	1155	38.0	54.6	104.0	132.1	93.6	61.4	55.2	42.2	37.7	141.5	127.9	67.7
71	21105040	-75.2989	2.6968	680	63.1	88.5	120.3	122.8	87.4	63.4	35.1	21.2	24.2	145.5	176.1	103.4
72	21105050	-75.4179	2.5997	553	49.1	57.9	135.5	104.8	107.1	35.0	32.3	23.5	37.8	163.8	189.5	124.8
73	21110040	-75.1684	3.0749	548	61.2	45.9	136.3	112.5	105.9	31.1	14.4	4.9	22.4	185.7	189.5	104.1
74	21110070	-75.0573	3.1503	615	17.3	47.9	99.6	97.6	85.5	53.6	33.0	16.7	34.5	180.8	155.1	56.1
75	21110090	-75.1693	3.3871	400	64.1	40.1	179.2	163.6	79.5	45.6	20.1	14.8	42.6	182.7	161.6	117.1
76	21110120	-75.2008	3.3053	400	55.4	41.4	75.5	109.4	66.5	36.9	13.7	7.3	42.9	98.8	137.0	96.9

77	21110130	-75.0853	2.8055	1580	40.0	91.4	115.8	160.8	72.2	75.6	47.1	38.4	47.3	199.1	199.3	90.9
78	21110160	-75.1990	3.1185	500	44.8	37.9	96.7	109.8	78.3	53.2	21.0	11.3	32.0	192.6	165.0	98.1
79	21110180	-75.1597	3.0360	591	39.2	38.4	110.5	125.2	124.1	31.8	13.5	11.5	25.1	177.2	193.8	91.6
80	21110290	-75.1703	3.3496	400	54.1	42.9	155.5	170.9	95.5	37.2	25.6	11.9	46.3	198.5	192.4	144.8
81	21110310	-75.2000	3.3333	400	82.3	40.2	127.8	72.0	72.0	16.5	8.3	15.7	55.5	184.0	155.6	77.4
82	21110330	-75.2184	3.1874	429	30.2	45.6	101.5	114.4	77.0	32.0	15.1	25.2	38.0	180.0	170.7	110.2
83	21110400	-75.1082	2.8511	1160	57.1	70.0	175.7	168.6	105.9	70.3	46.4	37.5	45.8	224.2	230.4	102.6
84	21110430	-75.1204	2.9061	1060	61.6	67.3	131.1	167.4	104.0	56.7	35.8	25.4	73.3	168.7	177.1	104.2
85	21110440	-75.2393	2.7957	735	71.0	97.1	163.8	157.0	122.6	51.8	35.7	14.8	58.2	233.5	223.3	111.4
86	21115020	-75.2931	2.9488	439	52.6	61.0	120.1	133.5	64.7	49.8	15.5	18.8	35.9	212.2	217.8	120.2
87	21115060	-75.1841	3.3292	400	50.9	32.8	100.0	163.5	90.4	25.1	16.3	14.2	51.1	160.5	133.0	123.7
88	21115070	-75.0730	3.0149	1300	38.5	77.9	135.3	169.2	139.1	49.9	58.7	27.1	63.6	221.9	175.0	102.0
89	21115080	-75.2163	3.2225	430	36.1	44.5	120.2	162.2	97.9	26.8	13.6	13.6	42.8	179.8	127.7	110.3
90	21115100	-75.0664	2.9426	1100	49.0	92.7	114.9	192.1	118.3	57.6	49.0	39.9	53.9	209.0	159.1	120.1
91	21115140	-74.9211	3.0940	2100	37.5	59.9	79.2	136.0	169.4	106.9	82.0	61.3	61.1	127.8	140.5	64.8
92	21115160	-75.0815	3.1331	600	15.3	40.1	119.4	117.6	83.7	75.3	23.8	14.1	33.5	133.5	115.9	69.6
93	21120010	-75.4854	2.9778	1300	127.3	174.1	158.8	264.9	164.2	93.1	46.4	28.1	71.1	239.3	305.7	202.7
94	21120040	-75.3795	3.1411	850	83.7	79.5	162.0	162.5	85.3	61.7	31.7	31.8	57.2	220.1	182.6	183.0
95	21120090	-75.4910	2.8703	700	109.4	128.4	165.7	230.1	142.2	49.9	24.5	17.4	64.6	289.8	234.6	211.3
96	21120100	-75.5664	2.8650	1105	148.5	181.7	169.1	257.7	167.0	79.5	83.1	39.7	93.8	289.1	271.2	227.7
97	21120130	-75.4261	2.9119	560	108.5	87.7	174.2	166.5	90.2	38.6	12.4	9.0	58.8	289.0	236.6	184.7
98	21125010	-75.5891	2.9357	1300	67.1	121.7	115.4	262.0	163.2	72.9	53.5	36.0	103.9	213.4	157.8	83.0
99	21125020	-75.4451	2.8822	550	122.0	107.3	186.6	178.6	86.4	57.3	22.3	9.7	43.1	153.7	214.9	128.2
100	21130010	-74.9365	3.8473	305	97.2	94.3	146.7	307.6	200.3	73.8	51.6	23.8	111.9	312.0	206.3	181.7
101	21130040	-75.4847	3.0806	1140	114.1	144.8	224.3	249.9	159.0	66.7	29.3	35.3	100.1	221.3	233.1	174.6
102	21130050	-75.2559	3.2436	450	31.4	39.1	99.1	165.0	76.3	30.0	9.0	14.3	41.7	190.2	123.9	104.9
103	21130060	-75.5592	3.0071	2250	127.9	146.2	158.9	241.4	143.5	58.1	81.0	55.7	118.1	264.8	202.8	106.5
104	21130070	-75.4500	3.2500	850	103.0	99.2	118.7	225.8	163.0	7.0	20.5	5.7	223.8	325.8	254.7	148.4
105	21130080	-75.4923	3.1208	800	136.2	147.2	216.6	284.0	156.8	65.9	31.9	27.7	104.5	318.1	251.0	184.9

106	21130110	-75.4907	3.2686	1085	112.0	118.3	177.0	302.7	138.3	44.6	39.1	31.6	89.2	278.8	270.8	142.4
107	21130170	-75.2667	3.2000	450	79.2	29.6	171.0	217.0	186.7	11.7	10.0	2.0	51.7	192.7	130.0	120.3
108	21135050	-75.5300	3.0988	1691	124.8	143.6	163.4	221.1	149.0	70.1	45.2	30.4	69.4	224.6	180.8	115.2
109	21140010	-74.9040	3.2916	584	28.4	30.0	117.6	176.6	112.2	50.5	35.7	29.1	31.7	111.0	102.9	40.1
110	21140030	-74.9342	3.2792	638	24.4	39.2	108.0	95.8	76.3	46.9	35.9	28.4	55.1	95.8	99.9	55.4
111	21140080	-74.7438	3.4805	1049	42.6	52.0	72.6	129.9	91.2	64.6	43.6	43.0	28.3	117.7	120.7	39.2
112	21140100	-75.1046	3.4230	368	42.8	38.5	131.0	151.2	95.6	33.4	10.7	14.3	44.2	212.9	171.3	93.4
113	21140110	-75.0974	3.3454	444	29.7	36.2	92.9	157.7	51.2	28.4	21.0	10.9	35.2	187.6	112.0	78.0
114	21140130	-74.6669	3.6455	2000	30.9	63.2	85.1	153.9	86.2	68.8	53.5	28.0	50.3	140.1	166.4	82.6
115	21145070	-74.7029	3.3110	1476	48.6	96.0	153.8	227.7	241.0	356.3	372.3	335.1	162.2	174.3	167.5	79.7
116	21145080	-74.7029	3.5898	1410	32.3	52.5	95.3	110.1	75.9	60.6	52.9	31.2	32.7	141.0	134.8	52.2

Anexo 3. Base de datos Climática escenario La Niña departamento del Huila

No.	Estación	Longitud	Latitud	Altitud	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
1	21130010	-74.9365	3.8473	305	139.7	164.5	214.0	319.7	210.5	154.0	101.0	119.2	120.6	244.9	230.8	225.2
2	21140100	-75.1046	3.4230	368	75.4	130.1	208.5	223.6	118.1	30.9	66.2	38.5	100.1	205.3	243.9	214.7
3	21110090	-75.1693	3.3871	400	84.0	91.8	152.7	170.8	109.3	51.6	58.2	39.1	72.4	184.5	269.5	228.5
4	21110120	-75.2008	3.3053	400	79.4	91.1	136.9	180.0	80.2	50.0	38.1	39.4	52.9	122.5	258.7	189.4
5	21110290	-75.1703	3.3496	400	76.2	93.9	168.3	185.8	114.8	45.0	58.4	38.9	80.5	176.5	283.2	247.5
6	21110310	-75.2000	3.3333	400	80.8	92.0	160.8	101.3	81.0	43.5	37.0	35.0	101.2	167.2	213.6	204.8
7	21115060	-75.1841	3.3292	400	78.1	78.1	124.5	162.6	92.9	36.8	49.9	25.9	73.2	152.5	241.8	169.0
8	21110330	-75.2184	3.1874	429	90.0	97.3	119.0	148.2	91.2	34.6	59.2	25.6	62.3	166.0	243.6	185.3
9	21115080	-75.2163	3.2225	430	81.7	112.0	133.0	184.5	59.9	44.0	51.5	30.4	73.3	166.9	219.5	159.7
10	21115020	-75.2931	2.9488	439	115.1	212.3	189.8	181.1	94.8	26.1	42.4	16.9	83.8	235.4	263.3	220.3
11	21140110	-75.0974	3.3454	444	60.0	95.5	165.2	139.0	87.0	31.4	29.8	16.5	72.4	157.1	216.6	136.2
12	21090030	-75.3167	2.9167	450	102.4	203.3	152.5	97.3	44.3	26.2	28.9	16.2	90.1	209.6	193.9	184.3
13	21090060	-75.3333	2.7833	450	139.4	87.8	248.0	126.5	74.2	66.5	38.5	21.8	111.4	223.4	239.2	217.4

14	21090150	-75.3167	2.8500	450	90.9	143.8	137.0	90.9	45.4	30.6	28.6	12.6	100.9	232.0	225.8	233.2
15	21130050	-75.2559	3.2436	450	100.6	102.6	133.0	181.3	76.5	52.6	42.6	29.0	61.3	201.7	230.6	188.9
16	21130170	-75.2667	3.2000	450	118.0	70.0	92.0	93.0	60.3	30.0	67.0	50.0	99.0	186.5	289.5	114.0
17	21090110	-75.3399	2.8655	454	146.3	169.8	182.9	131.8	64.4	29.1	50.1	10.8	68.8	250.2	284.5	222.0
18	21090120	-75.3667	2.7833	455	137.3	204.2	158.7	115.5	69.8	62.8	34.0	16.4	115.2	228.6	263.6	208.4
19	21090040	-75.3475	2.7776	460	155.6	182.8	193.7	162.8	99.9	40.2	48.0	16.9	67.5	225.4	293.2	228.5
20	21095010	-75.3312	2.8288	460	149.2	183.1	181.6	161.6	102.0	49.0	56.4	13.6	88.5	237.9	285.1	250.5
21	21090140	-75.3833	2.8833	480	149.3	184.7	162.0	112.8	57.0	39.0	33.0	32.2	113.2	216.8	220.4	183.2
22	21110160	-75.1990	3.1185	500	84.3	104.7	142.9	146.7	88.3	40.2	61.2	23.0	56.5	149.1	229.1	163.1
23	21090090	-75.3500	2.8333	520	125.8	173.9	141.0	120.3	73.6	44.3	46.3	23.8	102.6	191.0	230.6	172.2
24	21110040	-75.1684	3.0749	548	80.5	124.8	200.9	181.2	60.6	38.8	59.6	26.6	74.1	190.3	258.4	173.2
25	21125020	-75.4451	2.8822	550	169.7	220.9	203.8	197.0	117.1	77.6	78.5	16.6	73.2	178.8	243.4	206.7
26	21105050	-75.4179	2.5997	553	143.1	163.3	196.1	172.2	100.2	42.4	54.9	20.6	63.1	189.7	279.9	194.9
27	21120130	-75.4261	2.9119	560	160.0	198.1	204.8	203.4	116.2	61.2	55.0	22.6	72.3	247.4	308.0	237.6
28	21140010	-74.9040	3.2916	584	74.1	67.5	91.6	97.8	126.2	58.8	57.5	43.4	47.3	119.2	126.0	111.7
29	21110180	-75.1597	3.0360	591	75.7	127.9	140.7	186.3	61.0	37.8	62.8	19.8	61.3	220.5	260.6	186.3
30	21080030	-75.5289	2.6696	600	197.7	193.3	216.2	165.2	142.0	61.4	63.1	20.3	80.8	210.4	308.0	268.5
31	21115160	-75.0815	3.1331	600	64.0	97.8	153.5	175.9	90.5	40.4	61.5	25.0	50.5	169.8	214.0	134.5
32	21110070	-75.0573	3.1503	615	59.4	101.0	157.9	200.0	109.7	56.6	72.8	40.4	62.6	188.3	232.4	178.6
33	21090020	-75.3992	2.8556	620	180.4	225.0	180.3	228.4	136.2	39.4	59.2	21.0	83.1	350.6	261.6	273.1
34	21060090	-75.4355	2.5748	636	134.1	166.1	184.2	150.8	97.0	39.8	50.8	24.8	93.4	217.3	257.8	188.6
35	21140030	-74.9342	3.2792	638	74.5	88.6	116.4	126.0	120.1	56.3	69.0	42.4	62.6	130.9	150.3	112.2
36	21080070	-75.5809	2.6369	650	269.1	223.1	194.4	200.7	136.1	71.6	75.7	24.7	106.9	231.3	390.5	321.3
37	21105040	-75.2989	2.6968	680	151.5	165.0	177.3	156.9	99.9	67.6	58.9	25.2	55.8	174.3	227.1	151.0
38	21040040	-75.6486	2.2324	688	70.4	107.9	115.7	103.0	121.8	61.2	58.8	22.6	37.8	128.9	150.3	90.0
39	21040070	-75.6833	2.2167	700	78.7	128.0	112.1	95.8	120.8	62.8	62.5	25.4	44.6	123.3	147.8	76.0
40	21120090	-75.4910	2.8703	700	159.4	207.7	229.4	269.8	144.8	80.4	83.0	49.1	91.4	220.9	322.1	253.7
41	21060110	-75.6247	2.3215	721	85.4	168.5	175.2	104.8	128.0	66.0	59.8	22.5	40.6	134.8	189.6	123.4
42	21110440	-75.2393	2.7957	735	197.1	191.1	249.3	212.6	121.4	55.4	84.8	23.0	95.3	254.1	401.6	303.8

43	21030090	-75.6777	2.2029	755	88.0	115.2	127.4	125.7	115.5	69.6	59.8	32.5	60.5	128.4	151.4	108.6
44	21045010	-75.7051	2.2816	780	116.5	173.8	147.3	146.6	117.3	64.4	63.7	25.7	41.2	139.1	183.4	116.9
45	21050150	-75.7583	2.4584	788	252.2	223.3	243.1	172.5	146.5	83.6	79.2	31.1	61.0	216.1	357.8	312.0
46	21080130	-75.6212	2.5938	790	231.9	221.9	234.6	145.9	138.6	65.6	70.0	33.2	98.2	188.1	380.5	336.4
47	21130080	-75.4923	3.1208	800	157.4	226.5	212.2	239.7	178.0	67.8	72.3	83.7	140.5	303.7	337.6	248.8
48	21040060	-75.7794	2.1994	805	78.7	128.0	112.1	95.8	120.8	62.8	62.5	25.4	44.6	123.3	147.8	76.0
49	21050290	-75.7285	2.4913	825	212.4	204.5	236.1	109.0	147.8	84.9	88.1	28.7	59.4	191.0	317.9	263.6
50	21040050	-75.8228	2.1088	830	97.1	140.7	167.1	137.9	91.7	48.9	72.0	35.1	46.0	106.1	188.8	129.2
51	21060070	-75.5381	2.3889	850	84.8	129.1	142.1	134.0	112.7	75.0	67.6	34.5	50.8	156.3	168.1	98.1
52	21120040	-75.3795	3.1411	850	205.4	245.8	261.7	303.3	120.0	89.0	67.8	34.0	72.6	258.3	483.0	244.3
53	21130070	-75.4500	3.2500	850	250.0	58.0	408.5	147.5	112.0	134.0	176.0	89.0	154.0	245.9	520.0	268.0
54	21100120	-75.2333	2.7000	880	199.0	201.2	250.0	114.3	114.3	122.7	65.0	63.8	135.4	232.4	297.3	222.2
55	21030050	-75.7754	2.0263	893	85.9	135.2	142.1	160.2	157.2	103.4	86.2	48.9	86.0	98.2	148.0	84.1
56	21050140	-75.6157	2.5108	900	187.1	217.5	234.0	153.7	133.8	78.3	68.0	15.4	66.6	205.9	276.7	273.3
57	21040010	-75.7667	2.2500	905	141.2	171.2	195.0	174.0	134.0	113.8	68.5	28.2	48.2	152.6	250.7	135.3
58	21060080	-75.6051	2.1901	990	103.4	133.4	132.4	150.5	142.8	101.8	100.6	45.9	63.0	136.0	130.6	87.1
59	21080110	-75.7187	2.5787	1000	233.1	218.4	174.9	211.0	186.3	167.0	104.2	33.5	108.6	163.4	299.8	290.3
60	21085030	-75.5827	2.7604	1030	244.7	260.6	290.7	257.2	159.8	90.8	84.4	41.0	122.4	249.0	350.4	321.2
61	21140080	-74.7438	3.4805	1049	55.0	72.3	100.1	136.3	177.8	65.3	97.8	63.7	51.5	169.3	175.7	94.2
62	21110430	-75.1204	2.9061	1060	139.1	198.8	227.6	208.6	122.8	61.3	83.0	33.7	102.8	202.5	267.7	234.3
63	21055020	-75.8913	2.3783	1070	225.6	184.1	210.2	183.1	182.4	126.0	85.7	38.7	76.3	174.4	233.1	199.6
64	21130110	-75.4907	3.2686	1085	179.9	206.9	266.3	269.4	183.0	92.8	73.2	69.0	112.2	269.6	282.5	231.5
65	21085020	-75.6293	2.6522	1095	239.0	248.3	223.9	182.4	154.5	90.0	37.7	35.8	122.1	203.7	309.4	316.7
66	21115100	-75.0664	2.9426	1100	132.2	145.8	286.3	203.2	133.5	83.8	80.0	53.2	75.1	251.7	256.9	205.2
67	21120100	-75.5664	2.8650	1105	247.6	264.5	287.1	330.5	216.5	125.8	69.6	83.4	152.9	254.1	353.3	297.4
68	21130040	-75.4847	3.0806	1140	199.6	205.1	260.1	233.3	109.3	60.8	108.9	65.3	112.4	248.5	261.4	259.2
69	21105030	-75.3223	2.5217	1155	93.0	121.2	160.5	144.1	107.6	75.7	60.1	47.9	57.1	151.2	182.0	140.7
70	21110400	-75.1082	2.8511	1160	180.4	204.5	288.3	186.4	124.0	86.0	61.5	45.6	66.9	241.5	344.0	267.8
71	21030110	-75.6819	2.0778	1190	142.9	221.0	208.1	181.5	192.3	150.6	121.0	60.3	86.6	172.4	204.9	134.2

72	21010110	-76.0744	1.8449	1265	75.4	135.3	124.4	174.8	148.5	148.9	100.0	85.2	82.8	110.9	117.4	107.6
73	21065040	-75.5294	2.2525	1270	116.2	129.2	150.2	144.7	158.8	126.6	110.0	69.5	100.7	119.1	157.2	124.3
74	21115070	-75.0730	3.0149	1300	86.9	125.3	219.3	168.5	167.0	88.4	88.0	54.6	76.8	231.4	235.5	176.0
75	21120010	-75.4854	2.9778	1300	318.4	324.8	359.3	236.6	182.7	151.2	134.0	58.0	106.3	334.0	425.5	295.9
76	21125010	-75.5891	2.9357	1300	132.8	126.5	215.0	246.2	181.5	102.6	150.5	88.1	86.4	211.7	210.1	173.4
77	21060040	-75.5486	2.2020	1330	125.1	181.6	149.1	187.3	198.0	135.8	118.4	71.3	73.9	132.2	185.6	125.8
78	21010040	-76.0857	1.9615	1334	110.8	132.1	154.1	171.0	168.2	138.4	106.6	77.3	76.3	105.8	140.3	118.6
79	21030060	-76.0221	1.7143	1345	73.6	114.0	121.1	187.5	244.6	220.4	209.8	214.2	155.3	145.1	141.7	107.0
80	21030080	-75.5560	1.8079	1350	74.8	124.4	182.3	169.3	207.7	212.0	131.6	118.0	141.8	124.9	126.2	97.3
81	21025020	-75.8000	2.0667	1352	88.3	149.2	135.8	116.3	146.4	100.0	66.6	58.3	80.2	130.3	190.7	87.5
82	21100140	-75.4009	2.4348	1380	154.2	171.6	221.1	242.0	217.1	152.0	102.5	85.5	81.6	247.6	273.6	209.9
83	21145080	-74.7029	3.5898	1410	74.0	108.4	126.1	156.1	138.5	64.3	88.9	49.6	60.4	149.0	162.0	125.2
84	21060100	-75.5036	2.3172	1460	140.7	166.3	198.7	189.8	191.0	140.8	116.6	65.4	105.1	167.1	185.1	114.0
85	21145070	-74.7029	3.3110	1476	75.5	95.6	147.4	208.3	308.2	296.6	317.5	191.2	152.0	165.9	220.6	149.0
86	21100080	-75.2067	2.6153	1525	102.2	112.0	137.0	160.7	150.8	146.4	97.4	70.3	103.6	138.1	123.3	130.9
87	21010100	-76.1333	1.7248	1530	123.9	172.3	141.6	161.0	180.0	180.0	248.4	153.3	137.1	141.4	138.9	139.1
88	21050090	-75.8065	2.5514	1545	257.7	244.6	245.3	198.9	206.5	143.0	130.7	71.3	131.6	209.7	313.1	285.7
89	21110130	-75.0853	2.8055	1580	197.2	187.9	214.8	201.2	94.8	96.6	88.6	43.5	53.8	190.7	260.6	193.5
90	21040030	-76.1003	2.0309	1614	124.8	132.7	171.6	170.8	182.2	171.0	102.2	69.8	86.8	132.8	188.9	129.3
91	21010220	-76.1850	2.0659	1625	182.9	192.1	167.0	161.2	182.2	253.0	174.6	110.0	131.5	222.6	233.3	193.9
92	21085040	-75.6656	2.6628	1650	244.4	277.7	273.7	245.6	197.8	116.1	88.1	48.6	129.7	222.9	284.4	283.6
93	21010130	-76.2467	1.8104	1660	120.1	128.5	172.8	210.1	195.5	193.4	145.0	113.0	122.4	168.7	190.7	139.3
94	21010210	-76.1889	1.7138	1674	208.3	166.6	188.3	213.8	262.3	233.2	198.4	157.0	132.2	190.7	179.8	137.2
95	21135050	-75.5300	3.0988	1691	163.6	249.5	277.6	225.9	162.3	83.3	100.3	67.1	97.5	241.4	243.6	224.2
96	21010170	-76.1725	1.9014	1700	130.4	147.6	162.7	202.5	169.3	168.2	161.6	99.1	111.0	150.1	159.2	156.4
97	21010180	-76.1552	1.6953	1700	124.6	153.3	136.9	196.9	330.7	189.8	199.9	163.8	205.9	151.3	133.3	153.5
98	21010190	-76.2497	1.8489	1700	108.9	120.7	165.2	205.2	180.3	214.7	174.2	123.1	128.0	134.5	152.8	146.0
99	21010050	-76.2149	1.9316	1720	116.0	124.8	131.4	181.0	139.5	117.9	113.5	76.2	77.5	146.9	146.9	140.6
100	21010160	-76.3942	1.8994	1724	106.5	138.7	122.4	172.7	128.8	114.2	156.7	93.5	89.4	101.0	176.8	134.3

101	21050160	-76.0101	2.3171	1745	200.3	146.5	155.5	181.2	145.1	137.4	131.0	72.7	85.3	187.7	239.3	197.3
102	21100070	-75.2351	2.5617	1750	96.9	121.1	166.0	229.8	167.8	154.7	114.4	71.4	90.9	176.5	180.0	182.5
103	21010060	-76.1721	2.0208	1763	163.1	174.7	166.7	195.1	209.3	193.4	150.0	97.9	104.9	159.1	199.8	183.3
104	21015030	-76.2950	1.8885	1800	101.0	125.5	161.3	164.4	144.3	155.8	130.1	88.4	95.4	128.7	182.5	150.1
105	21080080	-75.6320	2.7931	1800	148.7	174.7	216.8	220.7	150.9	89.9	64.5	72.4	123.8	204.1	223.2	175.8
106	21080100	-75.6131	2.7728	1800	213.6	272.9	228.1	330.9	174.3	134.3	95.8	62.0	150.9	327.8	352.3	341.1
107	21010140	-76.3608	1.8644	1940	142.9	150.2	170.6	167.7	214.2	260.2	169.6	159.8	126.3	167.2	190.3	165.3
108	21010230	-76.3043	1.9058	1949	125.7	120.0	156.8	152.2	121.8	142.3	102.5	74.4	71.5	116.0	158.1	148.4
109	21050170	-75.7589	2.6524	1950	141.9	166.4	221.2	232.2	225.0	137.4	192.0	96.4	117.0	188.2	284.1	192.9
110	21010250	-76.2535	1.9778	2000	131.1	183.2	170.2	209.7	180.0	135.7	153.9	85.8	92.4	131.8	190.7	142.3
111	21140130	-74.6669	3.6455	2000	97.5	128.7	123.3	198.0	166.7	85.5	99.3	47.9	78.1	137.6	196.7	116.9
112	21115140	-74.9211	3.0940	2100	73.4	85.9	152.4	129.6	176.9	142.1	93.3	77.3	93.6	190.5	159.3	117.9
113	21035020	-75.6790	1.9139	2102	108.3	122.2	145.5	199.9	268.2	274.7	243.2	202.4	196.0	173.9	137.5	137.7
114	21040020	-75.7285	2.3340	2210	209.2	217.7	187.9	174.2	154.9	86.2	101.4	32.1	110.6	239.4	331.8	220.8
115	21050190	-76.1174	2.2181	2220	158.2	150.3	171.3	204.8	222.0	215.0	180.8	80.6	95.6	195.3	234.2	145.6
116	21130060	-75.5592	3.0071	2250	166.4	185.5	228.3	242.3	181.4	87.0	83.4	74.3	92.9	238.2	271.9	195.3

Anexo 4. Coeficiente de determinación R^2 del 95%

Coeficiente de determinación R^2				
Estación	Cokriging	Empirical Bayesian Kriging	Inverse weight distance	Ordinary of Kriging
21015030	0.809	0.793	0.877	0.893
21030090	0.381	0.513	0.603	0.461
21090040	0.895	0.928	0.847	0.915
21110400	0.836	0.916	0.917	0.907
21115060	0.962	0.978	0.914	0.958
21125020	0.957	0.991	0.989	0.986
Promedio	0.807	0.853	0.858	0.853

Anexo 5. Error Cuadrático Medio (ECM) del 95%

Error Cuadrático Medio				
Estación	Cokriging	Empirical Bayesian Kriging	Inverse weight distance	Ordinary of Kriging
21015030	14.212	14.783	11.379	10.628
21030090	18.399	16.327	14.731	17.169
21090040	27.583	22.812	33.317	24.847
21110400	41.464	29.610	29.572	31.222
21115060	11.703	8.862	17.533	12.221
21125020	20.328	9.184	10.129	11.386
Promedio	22.281	16.930	19.443	17.912

Anexo 6. Coeficiente de determinación R^2 del 90%

Coeficiente de determinación R^2				
Estación	Cokriging	Empirical Bayesian Kriging	Inverse weight distance	Ordinary of Kriging
21010060	0.726	0.712	0.888	0.855
21015030	0.848	0.801	0.877	0.883
21025020	0.714	0.839	0.766	0.690
21040070	0.699	0.800	0.775	0.618
21060070	0.867	0.868	0.724	0.797
21080080	0.763	0.766	0.711	0.776
21090040	0.928	0.939	0.848	0.915
21090090	0.738	0.929	0.917	0.926
21110180	0.904	0.928	0.941	0.936
21115140	0.792	0.833	0.677	0.831
21120010	0.902	0.905	0.917	0.918
21140010	0.896	0.940	0.936	0.650

Promedio	0.815	0.855	0.831	0.816
-----------------	-------	-------	-------	-------

Anexo 7. Error Cuadrático Medio (ECM) del 90%

Error Cuadrático Medio				
Estación	Cokriging	Empirical Bayesian Kriging	Inverse weight of distance	Ordinary Kriging
21010060	25.225	25.863	16.100	18.381
21015030	12.686	14.481	11.390	11.135
21025020	19.122	14.340	17.287	19.891
21040070	17.386	14.161	15.047	19.596
21060070	13.728	13.684	19.821	16.970
21080080	34.447	34.181	38.033	33.506
21090040	22.876	21.023	33.180	24.822
21090090	58.927	30.735	33.226	31.278
21110180	19.211	16.711	15.085	15.775
21115140	19.420	17.394	24.206	17.539
21120010	48.110	47.362	44.173	43.993
21140010	11.204	8.471	8.761	20.514
Promedio	25.195	21.534	23.026	22.783

Anexo 8. Coeficiente de determinación R² del 80%

Coeficiente de determinación R²				
Estación	Cokriging	Empirical Bayesian Kriging	Inverse weight of distance	Ordinary Kriging
21010040	0.878	0.649	0.895	0.833
21010060	0.720	0.704	0.880	0.854
21010100	0.844	0.915	0.891	0.898
21010190	0.908	0.894	0.916	0.901
21030090	0.178	0.550	0.617	0.335
21040040	0.919	0.858	0.786	0.645
21045010	0.918	0.956	0.909	0.907
21050170	0.697	0.680	0.668	0.675
21060090	0.968	0.931	0.974	0.947
21080030	0.929	0.906	0.944	0.934
21080130	0.978	0.975	0.976	0.980
21090060	0.848	0.867	0.871	0.877
21100070	0.795	0.675	0.782	0.807
21100140	0.735	0.714	0.734	0.742
21110130	0.880	0.933	0.908	0.881
21110160	0.949	0.953	0.942	0.937
21110430	0.920	0.952	0.924	0.898
21115060	0.971	0.973	0.911	0.976
21115160	0.915	0.942	0.950	0.949
21120040	0.848	0.874	0.813	0.818
21130070	0.761	0.886	0.859	0.872
21130170	0.607	0.500	0.420	0.613

21135050	0.943	0.921	0.924	0.916
21140110	0.919	0.906	0.892	0.903
Promedio	0.835	0.838	0.849	0.837

Anexo 9. Error Cuadrático Medio (ECM) del 80%

Error Cuadrático Medio				
Estación	Cokriging	Empirical Bayesian Kriging	Inverse weight of distance	Ordinary Kriging
21010040	13.257	22.530	12.310	15.526
21010060	25.507	26.224	16.730	18.400
21010100	28.670	21.246	23.944	23.240
21010190	18.923	20.331	18.130	19.606
21030090	21.203	15.689	14.477	19.070
21040040	7.903	10.494	12.873	16.590
21045010	12.159	8.928	12.828	13.005
21050170	27.630	28.426	28.920	28.619
21060090	12.910	18.853	11.499	16.598
21080030	33.980	39.069	30.239	32.830
21080130	21.032	22.481	22.296	20.314
21090060	53.161	49.830	49.013	47.865
21100070	29.355	36.944	30.298	28.517
21100140	38.531	40.065	38.584	37.992
21110130	28.420	21.181	24.852	28.306
21110160	12.205	11.696	12.961	13.522
21110430	30.176	23.364	29.400	34.093
21115060	10.247	9.857	17.884	9.341
21115160	15.982	13.144	12.309	12.415
21120040	54.308	49.512	60.140	59.334
21130070	60.382	41.689	46.336	44.239
21130170	63.115	71.187	76.634	62.608
21135050	32.119	37.859	37.124	38.940
21140110	13.736	14.831	15.887	15.016
Promedio	27.705	27.310	27.319	27.333

Anexo 10. Coeficiente de determinación R^2 del 70%

Coeficiente de determinación R^2				
Estación	Cokriging	EBK	IDW	O. Kriging
2106503	0.689	0.609	0.806	0.709
21010040	0.843	0.781	0.881	0.874
21010100	0.877	0.927	0.893	0.891
21010130	0.966	0.948	0.933	0.949
21010170	0.762	0.677	0.796	0.779
21010230	0.616	0.763	0.737	0.746
21030050	0.295	0.833	0.781	0.823
21040020	0.868	0.937	0.924	0.852
21040030	0.798	0.883	0.841	0.830
21040040	0.876	0.868	0.822	0.776
21040060	0.654	0.857	0.792	0.624

21050090	0.884	0.870	0.858	0.893
21050170	0.668	0.589	0.622	0.676
21050290	0.919	0.941	0.941	0.951
21060040	0.858	0.733	0.868	0.719
21080080	0.757	0.744	0.708	0.792
21080110	0.889	0.901	0.904	0.901
21085020	0.987	0.973	0.946	0.974
21090020	0.924	0.938	0.929	0.882
21090060	0.895	0.869	0.875	0.856
21090140	0.943	0.951	0.961	0.939
21095010	0.929	0.935	0.936	0.940
21100120	0.552	0.632	0.621	0.604
21105050	0.948	0.961	0.978	0.924
21110040	0.948	0.939	0.967	0.872
21110130	0.885	0.872	0.911	0.870
21110330	0.952	0.949	0.956	0.888
21110430	0.917	0.922	0.921	0.876
21115060	0.978	0.975	0.911	0.978
21115160	0.922	0.950	0.953	0.950
21120130	0.967	0.973	0.974	0.947
21130050	0.756	0.856	0.796	0.823
21130170	0.584	0.554	0.616	0.570
21140080	0.557	0.649	0.617	0.559
21140100	0.943	0.915	0.936	0.927
21145070	0.066	0.044	0.067	0.020
Promedio	0.802	0.825	0.833	0.811

Anexo 11. *Error Cuadrático Medio (ECM) del 70%*

Error Cuadrático Medio				
Estación	Cokriging	EBK	IDW	O. Kriging
2106503	19.006	21.315	15.002	18.387
21010040	15.045	17.794	13.118	13.511
21010100	25.523	19.651	23.728	23.998
21010130	10.724	13.113	14.932	13.063
21010170	24.106	28.065	22.275	23.218
21010230	18.930	14.888	15.664	15.414
21030050	19.800	9.647	11.035	9.937
21040020	33.538	23.144	25.465	35.592
21040030	15.879	12.092	14.112	14.589
21040040	9.823	10.109	11.752	13.164
21040060	18.643	11.979	14.466	19.426
21050090	27.684	29.388	30.732	26.603
21050170	28.934	32.209	30.857	28.581
21050290	28.758	24.586	24.492	22.468
21060040	12.095	16.593	11.672	17.050
21080080	34.863	35.814	38.200	32.264
21080110	27.848	26.320	25.931	26.342
21085020	14.088	20.390	28.963	19.827
21090020	29.635	26.572	28.600	36.801
21090060	44.288	49.315	48.260	51.717
21090140	25.305	23.314	20.727	26.161
21095010	19.786	18.914	18.796	18.244
21100120	65.716	59.567	60.487	61.823
21105050	17.619	15.410	11.543	21.429
21110040	13.196	14.255	10.462	20.670
21110130	27.772	29.315	24.446	29.506
21110330	13.765	14.177	13.110	20.959
21110430	30.656	29.812	29.979	37.501
21115060	8.825	9.383	17.807	8.880
21115160	15.327	12.255	11.863	12.212
21120130	19.010	17.213	16.828	24.229
21130050	32.361	24.909	29.581	27.617
21130170	64.869	67.204	62.359	65.988
21140080	31.451	28.004	29.238	31.382
21140100	15.151	18.423	15.985	17.116
21145070	127.078	128.558	127.043	130.157
Promedio	27.419	26.492	26.375	28.217

Anexo 12. *Scripts para correr el Cokriging en R*

```
library(rgdal)
library(maptools)
library(gstat)
```

```
library(sp)

setwd("D:/Users/SASalA/Desktop/Tesis_Interpol/cokri")

data<-read.table("zona1.txt",sep="",header=T) #read txt file
#to read the data can be also used the function in Rcmdr

#transform the data frame into a spatial data frame
coordinates(data)=~x+y

##Set the coordinate system
proj4string(data)=CRS("+init=epsg:3116")

##the epsg numbers can be found here: http://spatialreference.org/ref/

#import the border shp file
border<-readOGR("zona_1.shp","zona_1")
proj4string(border)=CRS("+init=epsg:3116")

#import a raster from a ArcInfo ASCII format
area1<-read.asciigrid("area1.asc")
proj4string(area1)=CRS("+init=epsg:3116")

#plot your data
image(area1)
plot(data,add=T)
plot(border,add=T)

#or use the function spplot
spplot(area1, scales=list(draw=T), sp.layout=list("sp.points", data, pch="+"))

#Let's first create a prediction grid for the interpolation, starting from the shape file
vals <-border@bbox
deltaLong <- as.integer((vals[1,2] - vals[1,1]) + 1.5)
deltaLat <- as.integer((vals[2,2] - vals[2,1]) + 1.5)
gridRes <-925.4631514 #change this value to change the grid size (in metres)
gridSizeX <- deltaLong / gridRes
gridSizeY <- deltaLat / gridRes
grd <- GridTopology(vals[,1],c(gridRes,gridRes),c(gridSizeX,gridSizeY))
pts <- SpatialPoints(coordinates(grd))
pts1 <- SpatialPointsDataFrame(as.data.frame(pts),
data=as.data.frame(rep(1,nrow(as.data.frame(pts))))))
Overlay=overlay(pts1,border)
pts1$border=Overlay
nona<-na.exclude(as.data.frame(pts1))
coordinates(nona)=~x+y
gridded(nona) <- TRUE
proj4string(nona)=CRS("+init=epsg:3116") #remember to set the coordinate system also
for the prediction grid
```

```
writeAsciiGrid(nona,"prediction_grid.asc")

#For the Co-kriging we need to obtain the value of the covariate for each observation
#for doing that we can use the function overlay
over=overlay(area1,data)
data$area1=over$area1.asc
str(as.data.frame(data))

#also the prediction grid need to be overlaid with the covariate
over=overlay(area1,nona)
nona$area1=over$area1.asc

#for (n in seq(1,12,1))

#for the cokriging, the first thing to do is create an object with the
#function gstat() that contains both the variable and the covariate

g<-gstat(id="mes1",formula=mes1~1,data=data)
g<-gstat(g,id="area1",formula=area1~1,data=data)

#Fitting the variogram
#first, plot the residual variogram

vario<-variogram(g)
plot(vario)

#now we can fit the linear model of coregionalization

g<-
gstat(g,id=c("mes1","area1"),model=vgm(psill=cov(data$mes1,data$area1),model="Sph",
range=sqrt(areaSpatialGrid(area1))/4,nugget=0))
g<-
fit.lmc(vario,g,model=vgm(psill=cov(data$mes1,data$area1),model="Sph",range=sqrt(are
aSpatialGrid(area1))/4,nugget=0))

plot(vario,g$model)

k<-predict.gstat(g,nona)

#Validation
#create training and test
#repredict the LMC
#perform the prediction

i<-sample(nrow(data),round(nrow(data)*10/100)) #exclude 10% of the data
training<-data[!data$ID%in%i,]
test<-data[data$ID%in%i,]
```

```
gv<-gstat(id="mes1",formula=mes1~1,data=training)
gv<-gstat(gv,id="area1",formula=area1~1,data=training)

gv<-
gstat(gv,id=c("mes1","area1"),model=vgm(psill=cov(training$mes1,training$area1),model
="Sph",range=sqrt(areaSpatialGrid(area1))/4,nugget=0))
gv<-
fit.lmc(variogram(gv),gv,model=vgm(psill=cov(training$mes1,training$area1),model="Sph"
,range=sqrt(areaSpatialGrid(area1))/4,nugget=0))

plot(variogram(gv),gv$model)

krige_cross<-predict.gstat(gv,test)
str(krige_cross)

#Goodness of fit indexes
RSQR<-as.numeric(cor.test(test$mes1,krige_cross$mes1.pred)$estimate)^2
#Pearson's R Squared
RMSD<-sqrt(sum((test$mes1-krige_cross$mes1.pred)^2)/length(test$mes1)) #Root
Mean Square Deviation

#Print Variograms and Map

tiff("Variogram.tiff",1200,1200,res=300)
plot(vario,g$model)
dev.off()

plot(k)
write.csv(k,"interpol_mes1_eco1.csv")
dev.off()

tiff("Prediction_Map.tiff",1200,1200,res=300)
spplot(k,"mes1.pred",col.regions=terrain.colors(50),main="Prediction
Map",scales=list(draw=T))
dev.off()

tiff("Error_Map.tiff",1200,1200,res=300)
spplot(k,"mes1.var",col.regions=heat.colors(50),main="Error Map",scales=list(draw=T))
dev.off()

#References:
#- Applied Spatial Data Analysis with R. Bivand,Pebesma,Gómez-Rubio (2008)
#- cran.r-project.org/web/packages/gstat/vignettes/gstat.pdf
#- www.itc.nl/~rossiter/teach/R/R_ck.pdf
#- www.ic.arizona.edu/ic/math574/class.../cokriging%20in%20gstat.pdf
```

Anexo 13. *Scripts para correr el kriging en Python*

```
# Name: EmpiricalBayesianKriging_Example_02.py
# Description: Bayesian kriging approach whereby many models created around the
# semivariogram model estimated by the restricted maximum likelihood algorithm is used.
# Requirements: Geostatistical Analyst Extension
# Author: Esri

# Import system modules
import arcpy
from arcpy import env
from arcpy.sa import *

# Check out the ArcGIS Spatial Analyst extension license
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
# Overwrite pre-existing files
arcpy.env.overwriteOutput = True

resultado = "D:/Users/SASaIA/Desktop/Tesis_Interpol/pp_python/resultado_ebk_z1/"

mascara = "D:/Users/SASaIA/Desktop/Tesis_Interpol/Spatial/Shapes_geoStat/mask1"

meses = []

for i in (range(1,13,1)):
    meses.append("mes" + str(i))

# Set environment settings
env.workspace = "D:/Users/SASaIA/Desktop/Tesis_Interpol/Spatial/Shapes_geoStat/"

# Set Mask environment
env.mask = mascara

# Set the extent environment using a space-delimited string xmin,ymin,xmax,ymax -
left,bottom,right,top
env.extent = "769174.9996 708752.957543 876528.725161 869783.545883"

# Set the extent environment using snap
env.snapRaster
"D:/Users/SASaIA/Desktop/Tesis_Interpol/Spatial/Shapes_geoStat/mask1"

# Set local variables
inPointFeatures = "Eco_1.shp"
zField = "mes1"
outLayer = "outEBK"
outRaster = "D:/Users/SASaIA/Desktop/Tesis_Interpol/pp_python/resultado_ebk_z1/"
cellSize = 925.4631514
transformation = "EMPIRICAL"
maxLocalPoints = 50
```

```
overlapFactor = 1
numberSemivariograms = 100

# Set variables for search neighborhood
radius = 31000
smooth = 0.2
searchNeighbourhood = arcpy.SearchNeighborhoodSmoothCircular(radius, smooth)
outputType = "PREDICTION"
quantileValue = ""
thresholdType = ""
probabilityThreshold = ""
semivariogram = "K_BESSEL"

# Check out the ArcGIS Geostatistical Analyst extension license
arcpy.CheckOutExtension("GeoStats")

for zField in meses:

    print zField + "\n Corriendo Proceso... \n"

    # Execute EmpiricalBayesianKriging
    print "Se empieza proceso....."
    outKriging = arcpy.EmpiricalBayesianKriging_ga(inPointFeatures, zField, outLayer,
outRaster + str(zField) + ".tif", cellSize, transformation, maxLocalPoints, overlapFactor,
numberSemivariograms, searchNeighbourhood, outputType, quantileValue,
thresholdType, probabilityThreshold, semivariogram)

    print "termino proceso....."
    # Save the output
    #outKriging.save(resultado + "kriging_" + str(zField) + "z1" + ".tif")

    print "Extrayendo mascara....."

    # Execute ExtractByMask
    outExtractByMask = ExtractByMask(outRaster + str(zField) + ".tif",
"D:/Users/SASalA/Desktop/Tesis_Interpol/Spatial/Shapes_geoStat/mask/mask1")

    # Save the output
    outExtractByMask.save(resultado + "kriging_ebk" + str(zField) + "z1_mask" + ".tif")

    print "finaliza proceso de " + zField
```