

ZONIFICACIÓN CLIMATOLÓGICA SEGÚN EL MODELO CALDAS – LANG DE LA CUENCA RIO RIO NEGRO MEDIANTE EL USO DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA SIG

ZONING BY CLIMATE MODEL CALDAS - LANG BLACK RIVER BASIN USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM SIG

Paola Marcela Castañeda Tiria
Ing. Ambiental, Profesional Técnico
Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Bogotá, Colombia
paokati77@hotmail.com

RESUMEN

La información climatológica obtenida para el desarrollo de la metodología objetiva de zonificación de la cuenca hídrica del río rio negro es escasa, particularmente la selección de valores/estaciones representativas para sustentar modelos hidrológicos con datos diarios, se dificulta en este caso por ser una zona con una red meteorológica pequeña que no ha podido ser intervenida por los problemas de orden público que se han presentado en este sector durante varios años.

En este trabajo se consideró la variación espacio-temporal de los elementos climáticos prevalcientes en la cuenca, para lo cual se empleó la información de catorce (14) estaciones meteorológicas, de estas estaciones, seis (6) se encuentran próximas a la cuenca, y por estar ubicadas en las cuencas cercanas, no solo circunscriben el área de estudio sino que también permiten obtener una caracterización altitudinal de la misma. La información contenida en estas estaciones permitió la aplicación de la clasificación climática de Caldas-Lang, teniendo como soporte un sistema de información geográfico donde se correlacionaron espacialmente las variables requeridas para la aplicación de la metodología precipitación, temperatura y altura.

Para el procesamiento de los datos se combinaron técnicas de agrupamiento estadístico, la información obtenida se desplegó en el sistema de información geográfica ARC/MAP, realizando interpolación mediante distancia inversa ponderada (IDW) por sus siglas en ingles.

Palabras Claves: Interpolación, IDW Distancia Inversa Ponderada, clima, temperatura, precipitación, geoespacialización, SIG.

ABSTRACT

The climatological information obtained for the development of objective methodology for the zoning of the “río rio negro” watershed is scarce, particularly the allocation of representative values/stations to support hydrological models with daily data, it is

difficult in this case because it is an area with a small weather network that could not be seized because of the law and order problems that have arisen in this sector for several years.

This work considered the spatio –temporal variation of climatic elements prevailing in the watershed, for which it was analyzed the information of fourteen (14) weather stations, of these stations, six (6) are close to the watershed, and by been located in nearby watershed, it would not only circumscribe the area of study but it also allow to obtain an altitudinal characterization of the same. The information stored by these stations allowed the application of the climate classification Caldas -Lang, with the support of a geographic information system that requires some variables: precipitation, temperature and altitude.

For data processing there were combined some techniques of statistical pooling, and the information obtained was deployed in the geographic information system ARC / MAP, making an IDW interpolation by inverse distance weighted.

Keywords: Interpolation, IDW Inversed Distance Weighted, climate, temperature, precipitation, geoespacialización, SIG.

INTRODUCCION

La zonificación climatológica como necesidad para los diferentes campos de aplicación ha tenido que ser tratada por expertos en diferentes ramas científicas, bien afectando análisis detallados de unos elementos meteorológicos (especialmente de la temperatura y de la precipitación), o por clasificaciones climatológicas de escala mundial con diferenciaciones muy generales de acuerdo con sus objetivos respectivos, así se explica la introducción de conceptos de zonificación climatológica como el de pisos térmicos, o como la zonificación del clima árido, semiárido, húmedo y superhúmedo, agregando la precipitación como expresión de la “humedad”.

Por lo general las clasificaciones climáticas más usadas son definidas a priori, puesto que asignan valores obtenidos de las estaciones meteorológicas para diferentes variables medibles, a una clase o categoría predeterminada; entre este tipo de clasificaciones se cuentan: De Martonne (1926), Köppen (1936), Thornthwaite (1948), Emberger (1955), Gaussen (1955), Thornthwaite y Mather (1995), Troll (1965) y Hargreaves (1971), Caldas – Lang (1962) entre otras. Estas clasificaciones subjetivas dependen excesivamente del criterio de cada autor.

Otro factor a considerar es la variación espacio-temporal de los elementos climáticos; según Grove (1980): "es reconocido que los elementos climáticos, especialmente en los trópicos, varían en cortas distancias, de acuerdo con la topografía y con otras condiciones, las cuales no siempre son fáciles de tener en cuenta". Ciertamente, la mayoría de los modelos actuales son modelos no espaciales, pues se basan en el concepto de que un valor medido representa un área homogénea alrededor del punto

evaluado, lo cual no siempre es cierto para el caso de grandes variaciones climáticas o topográficas (Hashmani, García y Fontaner 1995).¹

El procedimiento propuesto en este trabajo busca definir una clasificación más objetiva, que mediante agrupamiento de los elementos climáticos según su naturaleza y afinidad, permita ordenar la cuenca en grupos con un alto grado de asociación entre sus miembros; esta clasificación se obtiene utilizando técnicas estadísticas matemáticas de agrupamiento.

La clasificación establecida por Caldas y aplicada al trópico americano, se basó en los valores de temperatura pero con respecto a su variación altitudinal y no latitudinal. Por su parte, Lang fijó los límites de su clasificación teniendo en cuenta una sencilla relación entre la precipitación y la temperatura. Ninguno de los dos sistemas, por sí solos, tiene aplicabilidad o funcionalidad aceptables, por lo cual Schaufelberger (1962) propuso su unificación e implementó el sistema de clasificación CALDAS-LANG que por lo mismo, utiliza la variación altitudinal de la temperatura, que indica los pisos térmicos y la efectividad de la precipitación que muestra la humedad.²

La evaluación cuantitativa de cuencas requiere herramientas y datos a una escala temporal y espacial determinada. En este sentido, adquiere especial relevancia, la geoespacialización de datos climáticos; particularmente la asignación de estaciones meteorológicas utilizadas para realizar modelos hidrológicos que permiten cuantificar en el tiempo y en el espacio los volúmenes de producción de agua de la cuenca como datos de entrada, estas herramientas requieren datos diarios de precipitación y temperatura entre otras. Con frecuencia las estaciones meteorológicas no tienen una cobertura espacial adecuada, no se dispone de registros de todos los elementos climáticos necesarios y se presentan problemas con su longitud y calidad. Ello limita el uso de modelos y la información que de ellos puede obtenerse. En este contexto, los Sistemas de Información Geográficos (SIG) pueden ser muy útiles considerando su potencialidad para la integración de datos y la representación cartográfica, de las variables climáticas.

En este trabajo se utilizaron procedimientos basados en SIG para la geoespacialización de precipitación y temperatura, para la estimación de datos climáticos de la cuenca de río negro, aplicando para tal fin técnicas de interpolación como IDW, en conjunto con la estadística zonal.

1. MATERIALES Y METODOS

Para formular la zonificación se utilizó información climática de precipitación y temperatura.

¹ http://www.corpoica.org.co/sitioweb/Archivos/Revista/5_Metodologaparalazonificaci.PDF

² <https://www.documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/016592/clasificacionclima.pdf>

1.1 Descripción del Área de Estudio

La cuenca hidrográfica del río negro hace parte de la hoya hidrográfica del Río Magdalena, se ubica al norte del Departamento de Cundinamarca, cubre una extensión de 4235,24 Km² el 22.7% de la jurisdicción de la CAR. La cuenca limita al norte con el Departamento de Boyacá, al sur con la cuenca del Río Bogotá, por el oriente con la cuenca del Río Minero y parte media del Río Bogotá finalmente por el occidente con la cuenca del Río Magdalena. Comprende los municipios de Albán, Bituima, El Peñón, Caparrapí, Guaduas, Guayabal de Síquima, La Palma, La Peña, La Vega, Nimaima, Nocaima, Pacho, Puerto Salgar, Quebrada Negra, San Francisco, Sasaima, Supatá, Topaipí, Útica, Vergara, Vianí, Villeta y Yacopí.

La altitud de la cuenca varía entre los 800 hasta los 3600 msnm, con temperaturas entre los 8°C y los 26°C, con un régimen de lluvias tipo bimodal, con totales anuales que oscilan entre 1923 mm, lo que hace que el área de estudio sea de carácter variado desde el súper-húmedo en las cuencas del río Güaguaquí y bajo río Negro; húmedo hasta semi-seco, en el río alto Negro; semiárido en las cuencas del río Villeta y árido en esta misma y la de los ríos Pinzaima y Supatá.³

1.2 Clasificación Climática

Los parámetros básicos de cualquier clasificación climática son la temperatura y la precipitación y en menor grado la humedad relativa, la evaporación y el brillo solar.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), define el clima como “el conjunto de las condiciones atmosféricas caracterizado por los estados del tiempo en una porción determinada de espacio”. El clima se determina por el análisis espacio tiempo de los elementos que lo definen y los factores que lo afectan. El clima no se puede caracterizar con base en observaciones aisladas, es necesario disponer de informaciones históricas del comportamiento de los eventos a analizar. Un comportamiento aislado de elementos del clima no tiene ningún valor desde el punto de vista climatológico.⁴

La climatología, ha realizado diversas caracterizaciones climáticas tanto a nivel mundial como regional, a partir del agrupamiento sistemático de los elementos del clima en clases según sus relaciones comunes; si bien todas las clasificaciones emplean diversos parámetros comunes en muchos de ellos, la dificultad reside en establecer criterios generales que resulten representativos.

La primera y más generalizada regionalización se debe a los griegos, está dividía cada hemisferio de la tierra en tres grandes zonas climáticas, basándose en la distribución de las temperaturas: tropical, templada y polar; tomando en consideración las diferencias latitudinales de la radiación solar. Posteriormente se renombraron como zonas tórridas, templadas y frías.

³ Angélica Cabrera Granados. Caracterización Hidrológica y Climatológica de la Cuenca del Rio Negro (2011).

⁴http://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos

Existen dos tendencias principales de clasificación: las clasificaciones *genéticas*, fundamentadas en los factores que generan la diversidad climática (como radiación solar, circulación de la atmósfera y masas de aire), y las llamadas *empíricas*, basadas en elementos del clima combinados en índices (grado de humedad y temperatura, por ejemplo).⁵

En general los climatólogos han empleado las siguientes bases para la clasificación de los climas:

- Los procesos atmosféricos que forman el clima (clasificación genética).
- La relación entre el clima y la distribución observada de la vegetación (Clasificación empírica).
- El balance hidrológico (Clasificación hidrológica).
- El bienestar humano (Clasificación biológica).

Por un lado, la clasificación hidrológica, está basada en los valores de la precipitación y de la evaporación (o evapotranspiración) en cada uno de los meses del año; y la clasificación biológica, se ha empleado como base para clasificar los climas, “el grado de bienestar o incomodidad que el hombre experimenta en una zona determinada”. Esta clasificación no dice nada acerca de la disponibilidad de agua, de vegetación, etc., por eso no ha tenido mucha acogida.⁶

Independientemente de la tipificación empleada, los sistemas de clasificación climática son una herramienta fundamental para los biólogos en los trabajos de ecología, zoología y evolución; así mismo, son empleados en otras áreas del conocimiento, como agronomía, veterinaria, medicina, ingeniería, arquitectura y economía, por mencionar algunas.

1.2.1. Modelo Climático de Caldas

En 1802 se reunieron en Quito los investigadores Alejandro Von Humboldt (alemán), Aime Bonpland (francés) y Francisco José de Caldas (colombiano); quien disponía de información relativa a las alturas sobre el nivel del mar y su influencia en la variación de las temperaturas.

Expuesta y analizada la información por Caldas, se determinaron los pisos térmicos para la región Andina Tropical.

Entre 1882 y 1884 Hettner comprobó la teoría de Caldas al realizar un estudio de climas de altura en la cordillera oriental, confirmando el gradiente de la temperatura con la altitud.

Caldas estableció una relación empírica que muestra que a una altitud de:

⁵http://www.researchgate.net/publication/Algunas_consideraciones_acerca_de_los_sistemas_de_clasificacin_climtica

⁶ <https://www.documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/016592/clasificacionclima.pdf>

1000 m corresponde a una temperatura media de 23.8°C
 2000 m corresponde a una temperatura media de 18.0°C
 3000 m corresponde a una temperatura media de 12.7°C
 4000 m corresponde a una temperatura media de 7.0°C

Tabla 1. Limites expuestos por Caldas

RESUMEN DEL MODELO CLIMATOLOGICO DE CALDAS			
Piso Térmico	Rango de altura en m	Temperatura en ° C	Variación de altitud por condiciones locales
Cálido	0 a 1000	$T \geq 24$	Limite Superior ± 400
Templado	1001 a 2000	$24 > T \geq 17.5$	Lim. Sup. ± 500
			Lim. Inf. ± 500
Frio	2001 a 3000	$17.5 > T \geq 12$	Lim. Sup. ± 400
			Lim. Inf. ± 400
Paramo Alto	3200 a 3700	$12 \geq T$	

Fuente: Clasificación Climática IDEAM

Piso Térmico Cálido: localizado entre 0 y 1.000 m, con valores superiores a 24°C y un margen de altitud en el límite superior hasta 400 m, según sea las características locales.

Piso Térmico Templado: Comprende altitudes situadas entre 1.000 y 2.000 m, con temperaturas mayores o iguales a 17,5°C y con un margen de amplitud en sus límites superiores e inferior de 500 m.

Piso Térmico Frio: se localiza entre 2.000 y 3.000 m de altitud, con temperaturas no inferiores a 12°C y un margen en sus límites altitudinales superior e inferior de 400 m.

Piso Térmico Paramuno: corresponde a las áreas situadas sobre los 3.000 m de altitud y bajo el límite de las nieves perpetuas. Con el propósito de detallar más las condiciones climáticas se subdivide en dos zonas de paramo: **Paramo Bajo,** de mayor temperatura, con altitud que oscila entre 3.200 y 3.700 m y que se caracteriza por estar en el intervalo de los 7 a los 12°C. **Paramo Alto,** de los 3.700 m a los 4.200, aproximadamente.

1.2.2. Modelo Climático de Lang

En el año 1915, Richard Lang estableció una clasificación climática basada en la relación obtenida al dividir la precipitación anual (P, en mm) por la temperatura media anual (T, en °C). este cociente se llama también Índice de efectividad de la precipitación o factor de lluvia de Lang.

Tabla 2. Clases de clima según Lang.

COCIENTE P/T	CLASE DE CLIMA
0 a 20.0	Desértico
20.1 a 40.0	Árido
40.1 a 60.0	Semiárido
60.1 a 100.0	Semihumedo
100.1 a 160.0	Húmedo
Mayor a 160.0	Superhumedo

Fuente: Clasificación Climática IDEAM

Así las cosas, la clasificación establecida por Caldas y aplicada al trópico americano, se basó en los valores de temperatura pero con respecto a su variación altitudinal y no latitudinal, y Lang fijo los límites de su clasificación teniendo en cuenta una sencilla relación entre la precipitación y la temperatura. Ninguno de los dos sistemas, por si solos, tiene aplicabilidad o funcionalidad aceptables, por lo cual Schaufelberger (1962) propuso su unificación e implemento el sistema de clasificación CALDAS-LANG que por lo mismo, utiliza la variación altitudinal de la temperatura, que indica los pisos térmicos y la efectividad de la precipitación que muestra la humedad.

Tabla 3. Tipos climáticos Caldas – Lang.

Tipos de Clima Según Caldas - Lang	No.	Tipo Dimático	Símbolo
	1	Cálido Superhumedo	CSH
	2	Cálido Húmedo	CH
	3	Cálido Semihumedo	Csh
	4	Cálido Semiárido	Csa
	5	Cálido Árido	CA
	6	Cálido Desértico	CD
	7	Templado Superhumedo	TSH
	8	Templado Húmedo	TH
	9	Templado Semihumedo	Tsh
	10	Templado Semiárido	Tsa
	11	Templado Árido	TA
	12	Templado Desértico	TD
	13	Frio Superhumedo	FSH
	14	Frio Húmedo	FH
	15	Frio Semihumedo	Fsh
	16	Frio Semiárido	Fsa
	17	Frio Árido	FA
	18	Frio Desértico	FD
	19	Paramo Bajo Superhumedo	PBSH
	20	Paramo Bajo Húmedo	PBH
	21	Paramo Bajo Semihumedo	PBsh
	22	Paramo Bajo Semiárido	Pbsa
	23	Paramo Alto Superhumedo	PASH
	24	Paramo Alto Húmedo	PBH
25	Nieves Perpetuas	NP	

Fuente: Metodología de Zonificación Ambiental de Cuencas Hidrográficas. Ministerio de Ambiente.

A continuación se establece el procedimiento para determinar los climas según Caldas – Lang:

- I. Se localizan los sitios conociendo su altitud.
- II. Se obtiene los valores anuales de la temperatura y la precipitación.
- III. Con el valor de la temperatura y el de la altitud, se determina el piso térmico al cual pertenece cada uno de los sitios que se están clasificando, correspondiente a la primera palabra del tipo climático.
- IV. Se calcula el cociente P/T (Índice de Efectividad de la Precipitación o Factor de Lluvia de Lang) con este factor, se determina la segunda palabra del tipo climático.⁷

1.3 Dato Base y Procesamiento

La caracterización del comportamiento de la temperatura y la precipitación en la cuenca de río negro, se hizo sobre la base del análisis de catorce (14) estaciones meteorológicas, Santa Teresa, Escuela Vocacio, Sabaneta, Yacopi, La Cabrera, Montelibano, Santa Bárbara, Santa Rosita, El Salto, Armero, La Esperanza, Apto Palenquero, Buenavista y San Miguel de Sema, las cuales contemplan los medios, máximos y mínimos mensuales, analizados durante un periodo comprendido desde 1989 y 2012.

La información climática fue suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); en la Tabla 4 se relacionan las 14 estaciones que se tienen para realizar la presente metodología, dadas las mínimas variaciones topográficas de la región, las estaciones constituye una red de monitoreo adecuada para el estudio.

Tabla 4. Estaciones meteorológicas para el desarrollo del presente trabajo.

No.	Codigo	Tipo	Estacion	Elev	N	E
1	2306506	CO	STA TERESA	2200	4,85	-74,45
2	2306507	CO	ESC VOCACIO	1940	5,167	-74,2
3	2306510	CO	SABANETA	2475	4,9	-74,3
4	2306511	CO	YACOPI	1347	5,5	-74,35
5	2306512	CO	CABRERA LA	2000	5,133	-74,133
6	2306513	CO	MONTELIBANO	1340	5,467	-74,367
7	2306514	CP	STA BARBARA	1450	4,95	-74,417
8	2306515	CP	STA ROSITA	1430	5,283	-74,283
9	2125508	CP	EL SALTO	450	4,48	-74,76
10	2125509	CP	ARMERO	300	5	-74,9
11	2302502	CO	LA ESPERANZA	222	5,25	-74,72
12	2303503	CO	APTO PALENQUERO	190	5,48	-74,65
13	2312510	CP	BUENAVISTA	2200	5,5	-73,98
14	2401531	CO	SAN MIGUEL DE SEMA	2600	5,52	-73,72

Fuente: IDEAM

⁷ <https://www.documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/016592/clasificacionclima.pdf>

Teniendo en cuenta que la variación de la temperatura en la región está prácticamente relacionada con el cambio en la altura, la clasificación climática se basará espacialmente en las diferencias de humedad y precipitación generadas por las circulaciones locales y zonales que afecta la cuenca en mención, por esta razón, la presente metodología se considera como una clasificación climática.

1.4 Uso de la metodología SIG para la zonificación climática.

El SIG que se ha empleado en la elaboración del presente trabajo está formado por los siguientes componentes:

- Hardware: Ordenador Lenovo, 2,8 GHz, 1024 Mb de memoria RAM. Disco duro de 120 Gb. Tarjeta gráfica de 128 Mb. de memoria.
- Software: ESRI ArcGIS ArcInfo 10.1 sobre Windows 7.
- Personal: El presente trabajo ha sido realizado completamente por el autor.
- Procedimientos: Los procesos que se han empleado para obtener la metodología propuesta por Caldas – Lang para la zonificación climática de la cuenca, así como la obtención de todos los mapas temáticos; para ambos casos se han utilizado las herramientas del ArcToolbox (Spatial Analyst Tools – Interpolation – IDW – Map Algebra – Raster Calculator).
- Datos: Archivos Shapefile (precipitación, temperatura, índice P/T mensual y límite de la cuenca), superficie ráster o Grid de ArcGIS.

La información climática para cada elemento se desplegó sobre el área total de la cuenca usando el programa ARC/MAP. Las estaciones se localizaron convirtiendo sus coordenadas geográficas en coordenadas planas, mediante el empleo de la proyección transversa de mercator y el elipsoide internacional.

1.4.1 Análisis de Variables Climáticas

La clasificación climática consiste en la división del territorio en áreas más pequeñas, homogéneas desde el punto de vista espacial.

Los datos de precipitación y temperatura para la cuenca de río negro se obtuvieron de las estaciones climáticas ubicadas en o cerca de la región. Para la obtención de la capa raster con datos para toda la región (celdas de 100m²) se aplicó el método geoestadístico de interpolación IDW (Inverse Distance Weighted) que utiliza un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento.⁸ Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio.

⁸ http://faces.unah.edu.hn/catedraot/images/stories/Articulos/Uso_tecnologias.pdf

La interpolación se utiliza para convertir datos desde observaciones puntuales a campos continuos, con los que los patrones espaciales muestreados por estas medidas pueden ser comparados con los patrones espaciales de otras entidades espaciales. La predicción IDW se utilizó para estimar elevación, precipitación y temperatura. Se utilizó el formato ráster para las interpolaciones de precipitación, temperatura y el índice P/T.

Para la clasificación climática, se utilizó una capa raster para cada una de las variables mensuales y anuales de precipitación y temperatura y como resultado obtenemos un índice que nos permite clasificar el clima de la región.

Considerando que el IDW es un método de interpolación que utiliza los promedios de los valores de entrada (de allí su nombre Inversed Distance Weighted o de la distancia inversa ponderada) el resultado de los valores de las celdas, jamás superarán los límites máximos y mínimos establecidos en los puntos de entrada del análisis.⁹

Mediante IDW es posible controlar, basándose en la distancia, la importancia de los puntos conocidos sobre los valores interpolados. Al definir una potencia alta, mayor será el énfasis sobre los puntos más cercanos y el resultado de la superficie será más detallado (pero menos suavizado). Especificando una potencia menor, se le dará una mayor importancia a los puntos más distantes y por tanto la superficie resultante será más suave.

La función de interpolación espacial IDW está dada por la siguiente ecuación [1]:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i)$$

Donde $\hat{Z}(S_0)$ es el valor que se intenta predecir para el lugar (S_0) como el valor ponderado de los valores observados, N es el número de puntos muestrales, λ_i es el peso ponderado asignado a cada punto muestral y $Z(S_i)$ es el valor observado del lugar S_i . Los pesos λ_i se calculan con una función inversa a la distancia mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda_i = \frac{d_{io}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{io}^{-p}}$$

En la cual d_{io} es la distancia entre el lugar de predicción (S_0) y el lugar muestral (S_i); p es un parámetro de reducción de peso, cuyo valor se encuentra minimizando el error cuadrático medio o error de predicción, para efectos prácticos $p=2$. Por último, en el componente D se realiza el análisis de las zonas de mayor variabilidad con el modelo gradiente. Posteriormente, se analizan los mapas obtenidos donde se

⁹ Territorio y Medio Ambiente. Métodos Cuantitativos y Técnicas de Información Geográfica, Universidad de Murcia, Departamento de Geografía.

buscan patrones de comportamiento y se observa cuáles son los sitios con mayor variabilidad del fenómeno en estudio.¹⁰

1.4.2 Generación de los mapas de tendencias

Se utilizó el método de distancia inversa ponderada (IDW) para interpolar las tendencias anuales de las variables climáticas analizadas en cada estación. Este método de interpolación determinístico es uno de los más utilizados para la construcción de mapas e interpolación de información espacial. La metodología es bastante sencilla y sólo necesita un par de parámetros para ser ajustado.

Una de las desventajas del uso de IDW, es que tiende a generar superficies cerradas alrededor de los datos cuando el coeficiente de potencia (p) es pequeño, dando un menor valor a los puntos más cercanos. Para generar superficies más suaves y continuas usando IDW, algunos autores recomiendan utilizar un coeficiente de potencia (p) mayor, mejorando de esta forma la exactitud del modelo cuando los datos no tienen coeficientes de variación muy grandes. Para la generación de las superficies en el presente trabajo, se utilizó un coeficiente de potencia $p = 2$.¹¹

La bondad de ajuste de los métodos de interpolación depende de múltiples factores característicos de la zona de estudio, como el tamaño, la forma, la orientación, la orografía, así como de la naturaleza de las variables que se quieran interpolar, la densidad de datos existentes y la escala temporal de las variables que se elijan para realizar las interpolaciones.

Una vez obtenidos los mapas temáticos de la precipitación y temperatura mensuales y anuales, se generan los mapas del índice P/T, para ello se dispone de un conjunto de herramientas de cálculo con matrices de datos que reciben el nombre genérico de álgebra de mapas.

El álgebra de mapas consiste en aplicar un conjunto de operadores sobre una o varias capas ráster de entrada para producir un o varios ráster de salida. Estos operadores, que pueden ser aritméticos, trigonométricos, lógicos o condicionales; se aplican mediante ecuaciones a cada celda del ráster de entrada¹². Para realizar esta operación se hizo uso de la herramienta Raster Calculator, del programa ARCGIS 10.1; el cual además permite realizar cálculos matemáticos entre mapas temáticos o varios mapas resultantes.

¹⁰ <http://www.redalyc.org/pdf/120/12029982002.pdf>

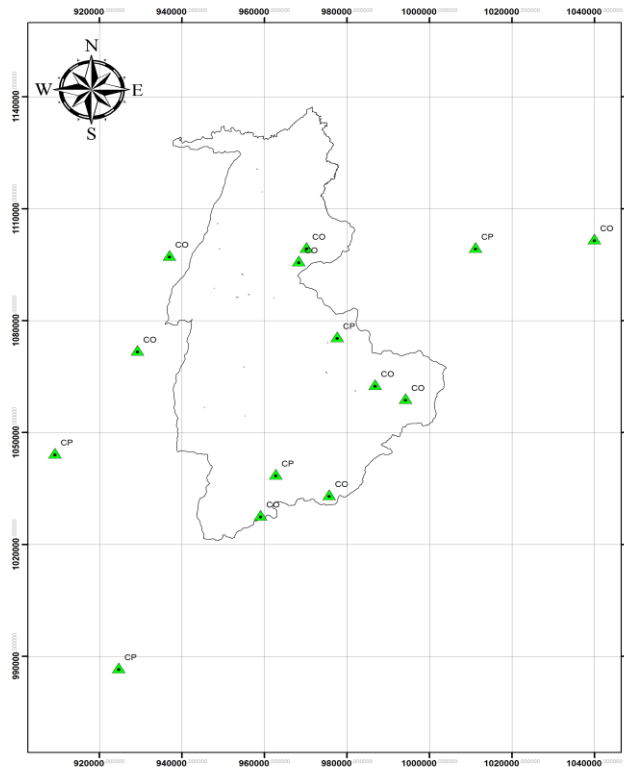
¹¹ Cuantificación e interpolación de tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas alto andinas de Cundinamarca y Boyacá (Colombia), Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria (2010) 11(2), 173-182

¹² http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_5.pdf

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A partir de series mensuales de datos de las 14 estaciones meteorológicas, se generaron los mapas de distintas temperaturas y precipitación acumulada. La distribución espacial de estas estaciones puede observarse en la Figura 1.

Figura 1 Distribución espacial de las estaciones meteorológicas



Fuente: El Autor

Partiendo de las variables sugeridas (Precipitación y Temperatura), se generaron los primeros resultados que corresponden a los 12 mapas mensuales de precipitación y 12 mapas de temperatura.

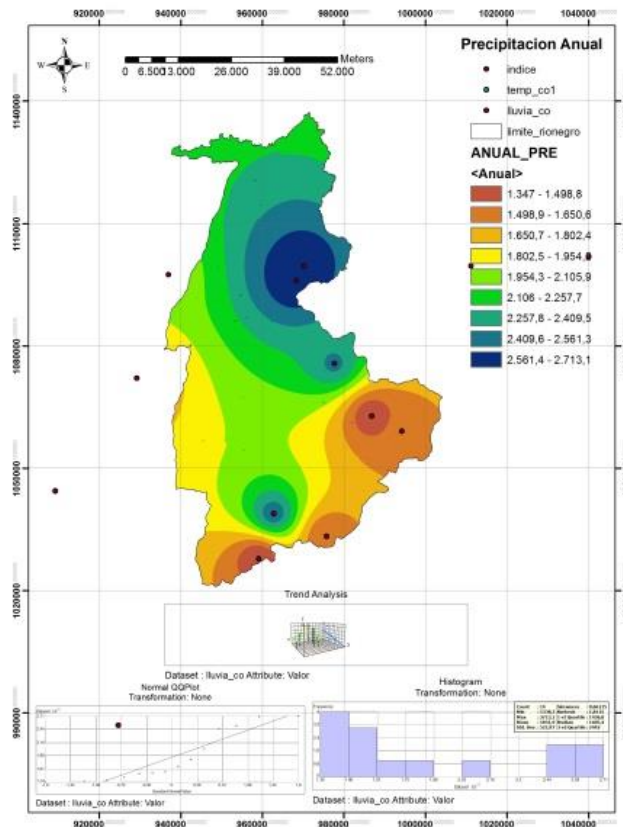
En concreto las variables dependientes modelizadas son: media de las precipitaciones media mensual, media de las temperaturas media mensual y el valor promedio anual, por su parte las variables independientes que se han introducido para la regresión múltiple son: elevación, norte y este.

2.1 Precipitación

La espacialización de la precipitación requirió de un análisis detallado de los datos y el método de análisis espacial. La complejidad del modelamiento de los datos de precipitación radica en que el fenómeno está ligado a múltiples factores biogeográficos, físicos, estacionales y de dinámica atmosférica local y nacional.

Un adecuado modelamiento permite mejorar la confiabilidad y resultados de la interpolación a pesar de la carencia de los datos. El análisis estadístico de los datos busca brindar bases para la definición de: histogramas, diagramas de cuantiles (Quantile-Quantile plots), análisis de tendencias. En la Figura 2 se muestra la distribución espacial anual de la precipitación en la región.

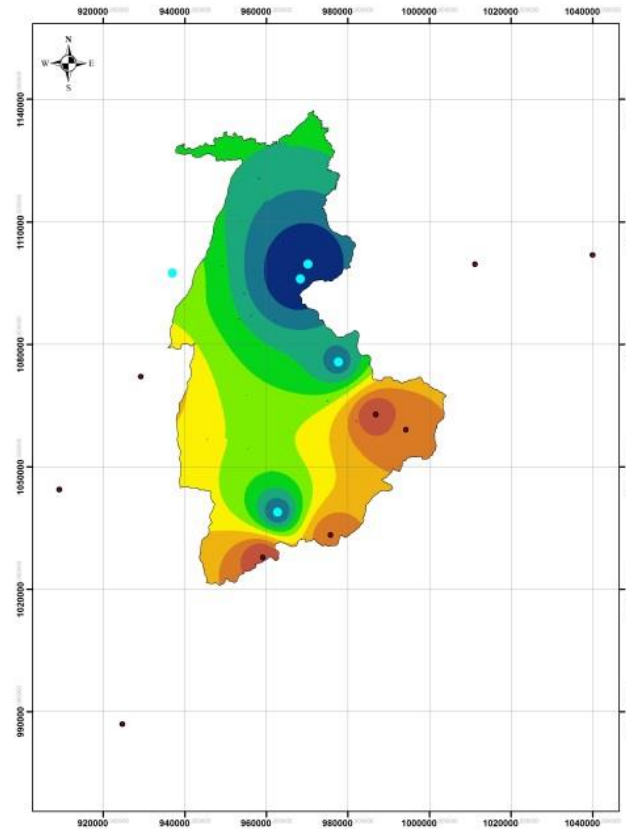
Figura 2 Precipitación media anual en (mms).



Fuente: El Autor

En general la tendencia de cambio en los volúmenes de precipitación varía en entre los meses de marzo a agosto (ver Anexo 1). De las 14 estaciones 8 mostraron aumento de precipitación, mientras que seis mostraron disminución, en las estaciones que mostraron cambios significativos, cinco mostraron un aumento en sus volúmenes de precipitación con un promedio de 2477 mms, mientras que sólo en la estación El Salto hubo una disminución significativa de los volúmenes de precipitación con una magnitud de 1338 mms. Es importante resaltar que esta estación, es la de menor altitud.

Figura 3 Estaciones con aumento en sus volúmenes de precipitación anual



Fuente: El Autor

Sin embargo, al considerar que el IDW asume que las predicciones son una combinación lineal de los datos, tiende a producir patrones poco reales, conocidos como tipo “ojo de buey”, alrededor de los puntos muestreados y la precisión de las estimaciones es influenciada por la varianza aleatoria, la estructura de variación y la intensidad de muestreo.¹³

Para realizar el análisis geoestadístico de la variable de precipitación se trabajó con la suite de modelos estadísticos (Geostatistical Analyst (ArcGIS for Server)) que es una herramienta para hacer predicciones que al mismo tiempo está amarrada a la estimación.

Las siguientes gráficas, presenta el resultado del análisis geoestadísticos de la interpolación de la precipitación anual. En el anexo 1, se muestra la interpolación de precipitación realizada para cada uno de los meses con su respectivo análisis estadístico.

En la Figura 4, se muestra la función de histograma, donde se puede observar que la mayor frecuencia de datos prevalecen las estaciones de mínima precipitación que va

¹³ <http://www.redalyc.org/pdf/573/57318502009.pdf>

desde (1340 a 1890 mms). En cuanto a la figura 5 se observa que el valor de tendencia de la variable con los datos generados por el modelo de interpolación IDW, tiene mayor diferencia entre las estaciones con mayor volumen de precipitación, ya que los puntos se encuentran más separados que con los volúmenes mínimos de precipitación.

Figura 4 Histograma

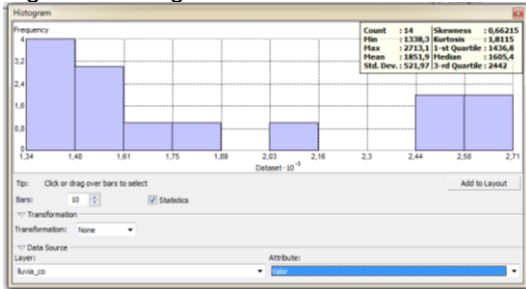


Figura 5 Normal QQPlot

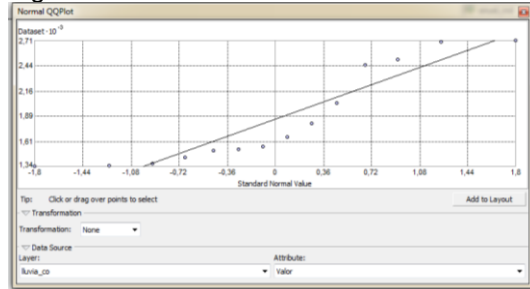
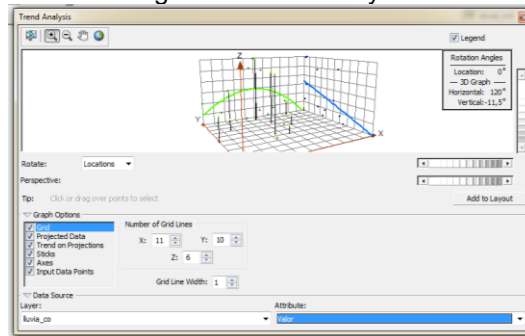


Figura 6 Trend Analysis



Fuente: El autor

En el análisis de tendencia (Figura 6), las anomalías, pueden presentar signos negativos (valores inferiores a la media) y positivos, de modo que para evitar los posibles signos negativos, y puesto que el análisis de tendencia de la variabilidad trata de detectar simplemente cambios en la regularidad de la lluvia con independencia de su tendencia en volumen, los valores de esta serie de anomalía anual, se pueden manejar como valores absolutos y sometidos al mismo análisis de tendencia que los valores de la variable.

De este modo la variabilidad descrita por la tendencia de la anomalía es un parámetro que describe con mayor precisión las tendencias detectadas en las precipitaciones, por lo que favorece la confección de escenarios futuros para realizar planes de gestión del recurso hídrico.

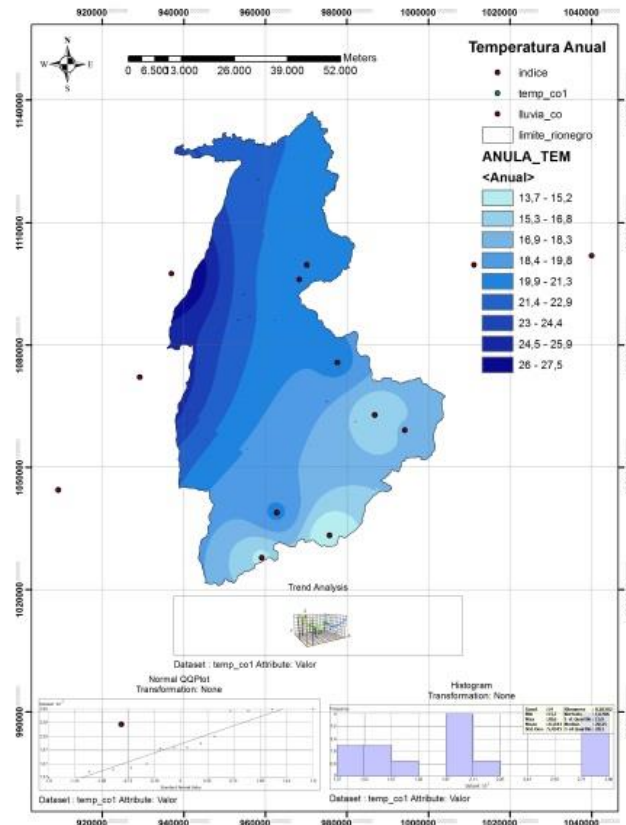
2.2 Temperatura

De acuerdo con el Atlas Climatológico Nacional (IDEAM) de la región, la temperatura media se caracteriza por la presencia de los llamados pisos térmicos, causados por la disminución de la temperatura con el aumento de la altura sobre el nivel del mar. La temperatura guarda una estrecha correlación con la elevación y en forma

aproximada se puede determinar la temperatura media, de acuerdo con una relación lineal.

A partir de los datos de las estaciones seleccionadas, se realiza la distribución espacial anual de la precipitación en la región.

Figura 7 Temperatura media anual en °C.



Fuente: El autor

Se determina una tendencia generalizada de aumento de la temperatura máxima en 5 de las 14 estaciones analizadas. En estas estaciones se supera en el nivel de confianza ya que son estaciones que están fuera de la cuenca.

Calculando el promedio de todas las estaciones en las que la tendencia fue significativa, se obtuvo un promedio para la zona de 17°C/año. En general, y sin tener en cuenta las temperaturas máximas cercanas a la cuenca, el resultado está de acuerdo con las temperaturas presentes en la región. Observándose algunas zonas donde se agrupan estaciones con igual signo de tendencia, pero también algunas regiones, donde en cortas distancias se observan cambios, como en la parte sur.

Al igual que con los datos de precipitación, se realizan los análisis geoestadísticos de la temperatura:

Figura 8 Histograma

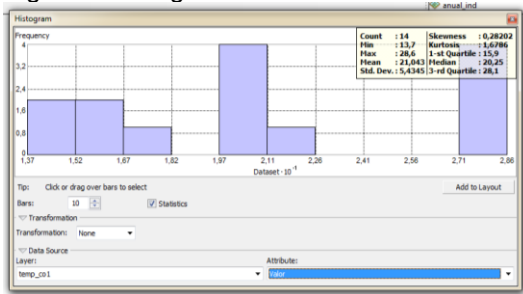


Figura 9 Normal QQPlot

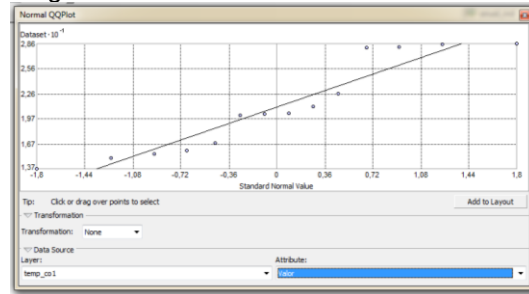
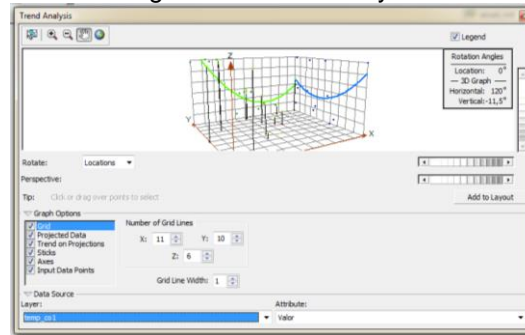


Figura 10 Trend Analysis



Fuente: El autor

En la Figura 8, se muestra la función de histograma, donde se puede observar que la mayor frecuencia de datos prevalecen las estaciones con valores promedio de temperaturas, que oscilan entre 19,7°C y 22,6°C, y teniendo como temperatura máxima 28,6 con una frecuencia también mayor. En cuanto a la Figura 9, el análisis geoestadístico Normal QQPlot tiene mayor diferencia las 5 estaciones, ya que los puntos se encuentran más separados que con los volúmenes mínimos de precipitación.

En cuanto al análisis de tendencia, presenta valores positivos, ya que no detecta cambios de significativos de valores de temperatura. Los valores de esta serie de anomalía anual, se pueden manejar como valores absolutos y sometidos al mismo análisis de tendencia que los valores de la variable.

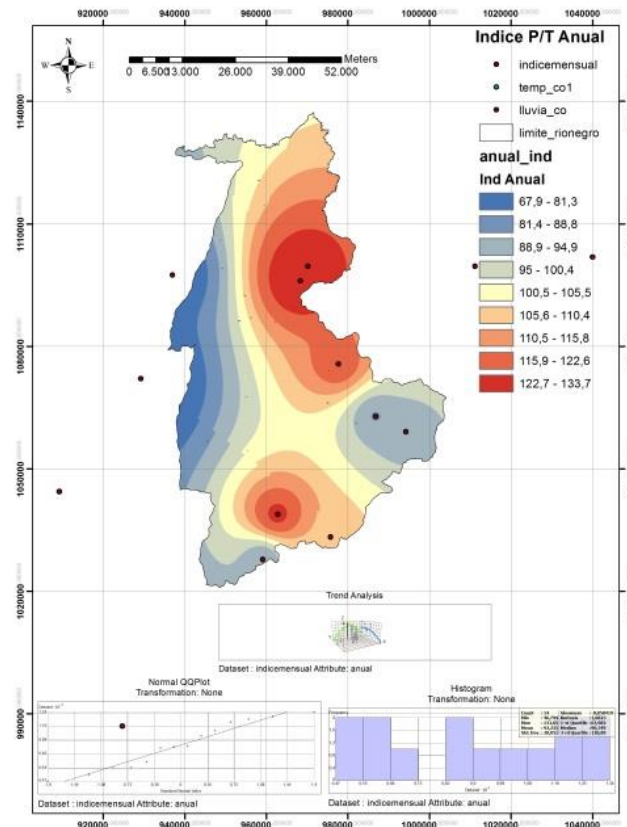
Los mapas de temperatura mensual, se presentan en el Anexo 2.

2.3 Índice Climático Caldas – Lang P/T

El análisis final de las variables se realiza mediante el método Raster Calculator. La espacialización del índice de precipitación y temperatura Clasificación Caldas – Lang, requirió de un análisis detallado de los datos y el método de análisis espacial. A partir del raster mensual y anual de las variables de precipitación y temperatura, se obtiene el índice P/T.

Los mapas del índice mensual de P/T se muestran en el Anexo 3.

Figura 11 Indicé P/T anual



Fuente: El autor

Basados en la metodología de Caldas - Lang, y considerando los datos climáticos anteriormente analizados se definieron 3 unidades climáticas descritas en la siguiente tabla:

Tabla 5. Clasificación Caldas – Lang

Codigo	Tipo	Nombre Estacion	m.s.n.m	N	E	Prec	Temp	Indice	Piso Termico	Clase de Cilma	Simbolo
2302502	CO	LA ESPERANZA	222	5,25	-74,72	1556,5	28,1	55,4	CALIDO	Semiárido	Csa
2125508	CP	EL SALTO	450	4,48	-74,76	1338,3	28,6	46,8			
2303503	CO	APTO PALENQUERO	190	5,48	-74,65	2027,5	28,5	71,1	CALIDO	Semihumedo	Csh
2125509	CP	ARMERO	300	5	-74,9	1804,3	28,2	64,0			
2306513	CO	MONTELIBANO	1340	5,467	-74,367	2713,1	20,3	133,7	TEMPLADO	Humedo	TH
2306511	CO	YACOPI	1347	5,5	-74,35	2700,2	21,1	128,0			
2306515	CP	STA ROSITA	1430	5,283	-74,283	2442,0	20,2	120,9			
2306514	CP	STA BARBARA	1450	4,95	-74,417	2503,4	20,1	124,5			
2306507	CO	ESC VOCACIO	1940	5,167	-74,2	1369,5	15,5	88,4		Semihumedo	Tsh
2306512	CO	CABRERA LA	2000	5,133	-74,133	1527,1	16,8	90,9	FRIO	Humedo	FH
2312510	CP	BUENAVISTA	2200	5,5	-73,98	1654,3	15,9	104,0			
2306510	CO	SABANETA	2475	4,9	-74,3	1506,5	13,7	110,0			
2306506	CO	STA TERESA	2200	4,85	-74,45	1347,0	15	89,8			
2401531	CO	SAN MIGUEL DE SEMA	2600	5,52	-73,72	1436,8	22,6	63,6		Semihumedo	Fsh

Fuente: El autor

Las zonas climáticas que posee la cuenca clasificándolas según los rangos de altitud, precipitación y temperatura, definidas por las zonas de Caldas – Lang, pertenecen a los pisos térmicos cálido, templado y frío.

En la región prevalecen los pisos térmicos cálido, templado y frío, según los datos aportados por las 14 estaciones. Como se puede observar en la figura 11, el piso térmico cálido, pertenece a las estaciones con temperaturas máximas y precipitaciones que oscilan entre 1557 y 2027 mms, que pertenecen a las estaciones cercanas a la cuenca de río negro.

Los índices altos que se encuentran entre valores de 91 y 134, que corresponden respectivamente al piso térmico templado con clase de clima húmedo y semihúmedo, con temperaturas entre 17 y 20 °C.

3. CONCLUSIONES

La metodología usada en este trabajo, a diferencia de otras frecuentemente empleadas, utiliza herramientas matemático-estadísticas que permiten obtener una zonificación climatológica más certera y objetiva; en razón de la estructura del proceso metodológico descrito, la introducción de concepciones previas se ve minimizada por la estricta secuencia de las técnicas utilizadas. La ventaja del método expuesto radica en que no requiere de rangos preconcebidos ni de la intervención subjetiva del investigador.

La variabilidad de los diferentes parámetros considerados en el proceso de zonificación (precipitación y temperatura), logra su expresión en el estudio a través de los usos espacial y temporal del SIG. La formulación de un modelo de zonificación coherente facilita la implementación de algoritmos y combinaciones que permiten lograr un análisis espacio-temporal con resultados que se aproximan más a la realidad, así como proyecciones de resultados a través del tiempo y el espacio.

El mejor conocimiento de la climatología de la cuenca de río negro, por el detalle logrado para cada zona, ayuda a comprender de manera más precisa las condiciones imperantes y facilita la planificación con miras a optimizar el uso de los recursos naturales.

La estadística espacial es la reunión de un conjunto de metodologías apropiadas para el análisis de datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en diversos sitios (puntos del espacio o agregaciones espaciales) de la región. Es importante resaltar que en geoestadística el propósito esencial es la interpolación.

Los métodos de interpolación son una aplicación práctica para establecer la distribución espacial de las variables climáticas. Los mapas que se obtienen a partir de métodos de interpolación pueden utilizarse como herramientas en el manejo ambiental para el estudio de los recursos naturales.

Los resultados obtenidos mediante el análisis geoestadístico, fueron compatibles con los análisis paramétricos realizados por el IDEAM (2009). El método IDW permitió generar superficies continuas a partir de datos puntuales para los tres conjuntos de tendencias. Sin embargo, como este método asume que la distribución espacial de las variables depende solamente de la distancia que hay entre los puntos del espacio, los mapas de tendencias obtenidos son poco confiables ya que en nuestra muestra los datos no están regularmente distribuidos, por lo que existe una falta de información en ciertas áreas.

AGRADECIMIENTOS

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); por la información suministrada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras – HIMAT, (1991). Clasificaciones Climáticas. Bogotá – Colombia. En <http://www.documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/016592/clasificacionclima.pdf> (Abril 2014).

Angélica Cabrera Granados (2011). Caracterización Hidrológica y Climatológica de la Cuenca del Río Negro. Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Manuela Beltrán. Bogotá, 39 P.

Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá. (2011). CAR. Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá. Disponible como: Documento técnico POMCA Río Bogotá, 57 p.

Norman Sánchez Santillán, Algunas consideraciones acerca de los sistemas de clasificación climática, (2008), En http://www.researchgate.net/publication/Algunas_consideraciones_acerca_de_los_sistemas_de_clasificacin_climtica, (Abril de 2014).

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, IGAC, (2010), Metodología de Zonificación Ambiental de Cuencas Hidrográficas (Propuesta). http://www.minambiente.gov.co/documentos/DocumentosBiodiversidad/recurso_hidrico, (Marzo 2014).

Ramón Giraldo Henao, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Estadística, (2008), Introducción a la Geoestadística, En <http://www.reddeagriculturaprecision.unal.edu.co/doc/Publicaciones>

INVEMAR y COLCIENCIAS. (2010), Proyecto "Análisis y aplicación de técnicas geoestadísticas en la modelación de procesos estocásticos relacionados con variables ecológicas en ambientes estuarinos", Bogotá 35 P.

CORPORACION COLOMBIANA DE INVESTIGACION AGROPECUARIA CORPOICA–NATAIMA. (2009), Plan de Manejo Ambiental Departamento del Tolima. http://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos, (Abril de 2014).