

Sistema de Información para la Interpolación de datos de Temperatura y de Precipitación del Ecuador

Andrade L. * Moreano R. *

* Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental
Quito, Ecuador (e-mail: laureano.andrade@epn.edu.ec ; rjmoreano@hotmail.com)

Resumen: El programa de cómputo “Sistema de Información Climático – EPN” está diseñado para la interpolación espacial de información climática. Se sustenta en una base de datos mensual de precipitación y temperatura del período 2000 – 2005, con 126 estaciones meteorológicas operadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y por la Dirección General de Aviación Civil (DGAC).

Incluye algoritmos de búsqueda, de interpolación, de selección de métodos de interpolación, de presentación y de visualización de la información climática. La bondad de los métodos de interpolación se analiza mediante validación cruzada, con aplicaciones para las regiones Costa, Sierra (montañosa) y Amazonia del Ecuador. Los métodos de interpolación utilizados son: IDW, Modificado de Shepard y Kriging Ordinario.

El programa constituye una herramienta útil para atender de manera ágil consultas de la comunidad dirigidas al servicio meteorológico nacional, para evaluaciones climáticas, en especial para determinar las características del clima en áreas con insuficientes registros históricos, pues el programa permite validar los resultados obtenidos por interpolación espacial.

Palabras clave: Meteorología, climatología, interpolación, clima, precipitación y temperatura.

Abstract: The “EPN Climatic Information System” computer program has been designed to interpolate climatic data based on monthly precipitation and temperature information from the 2000 – 2005 period, and consists of 126 meteorological stations both from the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI) and the General Direction of Civil Aviation (DGAC). This computer system also includes search and interpolation algorithms, selection of interpolation methods, and presentation and visualization of weather information. The goodness of the interpolation methods is analyzed by the crossed validation method, with applications for the Coast, Interandean (mountain area) and the Amazon regions. The interpolation methods used are: IDW, Shepard modified and Ordinary Kriging.

The program is a useful tool to solve in an agile way the national community concerns directed to the meteorological service, and also for climatic evaluations to determine climate characteristics in areas with insufficient historical records as this program allows to validate results obtained by spatial interpolation.

Keywords: Meteorology, climatology, interpolation, climate, precipitation and temperature.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de información climática e hidrológica histórica y “casi” en tiempo real, de la comunidad a las instituciones públicas, responsables de la gestión meteorológica e hidrológica, exige con frecuencia incorporar métodos y técnicas de procesamiento y disseminación de datos, con rutinas de interpolación espacial y temporal.

Uno de los métodos de mayor relevancia para la generalización de la información climática e hidrológica son los mapas de isolíneas, que se utilizan para el cálculo o estimación de valores máximos, medios, mínimos de las variables de interés: precipitación, temperatura, elementos del balance hídrico, escurrimiento superficial, láminas de erosión, transporte de sedimentos, etc.

Los fundamentos físico – geográficos para la elaboración de mapas de variables climáticas e hidrológicas, son la

presencia de campos de temperatura y de humedad en la atmósfera, o de escurrimiento en la superficie terrestre; estos campos son continuos a nivel zonal (Vladimirov, A., 1990) [9].

El programa de cómputo desarrollado “Sistema de Información Climático-EPN” (SIC) constituye una herramienta de búsqueda, selección y presentación de estaciones, que cumplen con criterios específicos de distancia máxima respecto al punto geográfico para el cual se requiere determinar la variable del clima; y, también en función de rangos de altitud que se ingresan, todo para intervalos de tiempo específicos. En base a los datos de las estaciones seleccionadas y de los intervalos de tiempo especificados, el SIC realiza la determinación de los valores del clima para el punto geográfico requerido; con este propósito se utilizan métodos de interpolación y extrapolación de variables espacialmente distribuidas, como son el Método Inverso a la Distancia (IDW), el Método Modificado de Shepard y el Kriging Ordinario.

Es evidente la ausencia en el país de herramientas de consulta con respuesta rápida (inmediata) para conocer las características del clima en sitios y tiempos específicos; esta información es demandada por los sectores de la construcción, el riego, la consultoría, la justicia (para evacuar procesos legales asociados a siniestros), los seguros, etc. Estos sectores y otros, pueden ser beneficiarios del programa SIC, que es susceptible de ampliación en relación con la base de datos de soporte (con registros diarios y horarios para disponer de un período más amplio, incluyendo otras variables del clima), y además, con la consideración de rutinas adicionales de interpolación.

El programa generado es el objeto principal del Proyecto de Titulación referido como Moreano (2008) [5].

2. DISPOIBILIDAD DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA EN ECUADOR

El análisis se cumple en función de la disponibilidad de estaciones meteorológicas. Según Andrade (2010) [1] la distribución de las estaciones meteorológicas por regiones corresponde a la Tabla 1, en tanto que en la Tabla 2 se aprecia la distribución de las estaciones por rangos de altitud.

Se concluye entonces, entre otros aspectos:

- Que el mayor número de estaciones meteorológicas (62.7%) se localiza en la región Sierra, situación que se explica por el relieve accidentado y escarpado que incide en la variabilidad climática;
- Que la región Oriente o Amazónica dispone de la menor densidad de estaciones a nivel nacional, con apenas el 7.1%, para un área del 30% del país; y,
- Que el 62.8% del territorio nacional, con cota menor a 1000 m s.n.m., dispone del 38% de las estaciones.

En relación con la cobertura de estaciones meteorológicas, Andrade (2010) [1] concluye en base a criterios específicos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), que la información de precipitaciones en el país es adecuada en el 32,3% del área, y que el 67,6% de la superficie del país no dispone de información representativa.

Tabla 1: Distribución de las estaciones meteorológicas por regiones.

Región	Área (%)	Estaciones meteorológicas (%)
Costa	29.7	30.2
Sierra	39.2	62.7
Oriente	30.0	7.1

Tabla 2: Distribución de las estaciones meteorológicas por rangos de altitud.

Variación de cotas (m s.n.m.)	Área (%)	Estaciones meteorológicas (%)
0 - 1000	62.7	38.0
1000 - 2000	14.0	15.0
2000 - 3000	11.3	33.5
> 3000	12.1	13.1

Lo anterior explica la necesidad de disponer de métodos adecuados para la interpolación y extrapolación de datos del clima.

3. METODOLOGÍA

La metodología aplicada consiste en:

- Acopio y revisión de las series mensuales de precipitación y temperatura de 126 estaciones meteorológicas, con información tomada de los anuarios del INAMHI y de las series disponibles de la DAC, todo en relación con el período 2000 – 2005;
- Análisis, selección y desarrollo de los métodos de interpolación y extrapolación de datos espaciales; y,
- Diseño del Sistema de Información Climático para: el manejo de la base de datos, el ingreso de las coordenadas del punto de estimación de las características del clima, la búsqueda de estaciones, la selección del método de interpolación, el ingreso de datos adicionales en función del método de interpolación priorizado, y, la presentación de resultados.

El SIC está soportado por la plataforma Microsoft Visual Studio 6.0 con el lenguaje de programación Visual Basic. Se emplea botones comunes, campos de texto, etiquetas, menús desplegables, y además controles ActiveX y List Views. El programa de instalación realiza automáticamente la conexión con la base de datos, a través de objetos ADO utilizando un driver ODBC, con lo cual se logra portabilidad.

4. MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN

El procedimiento de interpolación utilizado se sustenta en los métodos locales, que consisten en la utilización de los valores más próximos al punto de interpolación (de interés), para estimar el valor requerido de la variable, como una media ponderada. Los métodos utilizados son: a) Inverso a la Distancia (IDW), b) Modificado de Shepard y c) Kriging Ordinario.

De acuerdo a FAO (2003) [3], los métodos de interpolación se clasifican en globales y locales. Los primeros son útiles para examinar posibles tendencias en los datos, más que para interpolar, y generalmente utilizan todos los datos disponibles; en cambio, los métodos locales operan en una zona o área pequeña, que cubre el lugar geográfico al interior del cual está el punto para el cual se requiere obtener el valor interpolado.

Un análisis detallado de la bondad de los métodos de interpolación o extrapolación en relación con las variables del clima se encuentra en las referencias: Tabios and Salas (1985) [8], Lennon and Turner (1995) [4], Nalder and Wein (1998) [6], Phillips et al. (1992) [7], entre otros.

El soporte analítico para la aplicación de los métodos descritos a continuación, se encuentra además en Cruzado (2004) [2] y en FAO (2003) [3].

La aplicación del método IDW para el caso de las variables temperatura y precipitación, se sustenta en el concepto de zonalidad climática, es decir en la similitud de las condiciones climáticas del punto para el cual se requiere la determinación de las variables del clima, en relación con los puestos de observación o estaciones más cercanas de registro. El estimado se calcula como la media ponderada de los valores registrados en las estaciones cercanas, a las cuales se les asigna un peso.

Las relaciones utilizadas son:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \times Z(x)_i) \quad (1)$$

Donde:

- Z^* Es el valor de la variable en el punto a interpolar (por conocer);
- $Z(x)_i$ Es valor de la variable en el punto conocido i ;
- λ_i Peso de la estación i ; y ,
- n Número de estaciones consideradas.

Los pesos se calculan con la siguiente relación:

$$\lambda_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^\beta}} \quad (2)$$

Donde:

- λ_i Peso de la estación i ;
- d_{ij} Distancia geométrica entre la estación y el punto a interpolar; y ,
- β Coeficiente de ponderación.

El Método Modificado de Shepard constituye una expresión ponderada de determinación del valor promedio, y se diferencia del IDW únicamente en la expresión de cálculo de los pesos, como se indica a continuación.

$$\lambda_i = \frac{\left[\frac{R - d_{ij}}{R \times d_{ij}} \right]^2}{\sum \left[\frac{R - d_{ij}}{d_{ij}} \right]^2} \quad (3)$$

Donde:

- R Distancia geométrica de la estación más lejana y el punto a interpolar

El Método Kriging Ordinario como procedimiento geostatístico, utiliza el concepto de correlación espacial y temporal de variables regionales y parte del concepto de que la media es constante pero desconocida, mas no demanda la definición de una tendencia principal en los datos como es el caso del método Kriging Universal.

La aplicación del método Kriging Ordinario exige establecer los pesos que minimicen la varianza y además cumplir con la condición de insesgamiento, es decir que la suma de los pesos sea igual a 1. Este método incorpora el semivariograma, que es una gráfica útil para el análisis del comportamiento de variables en una zona dada, con el siguiente detalle:

En el eje de las abscisas de la gráfica se representan las distancias entre los puntos y en el eje de las ordenadas, las semi varianzas, definidas por la relación:

$$\lambda(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (4)$$

Donde:

- $\lambda(h)$ Semivarianza con desfase h ;
- $Z(x)$ Valor de la variable;
- $Z(x+h)$ Valor de la variable acumulada hasta el desfase h ; y ,
- N Número de observaciones.

Al semivariograma experimental se ajusta un modelo teórico, y luego se obtienen los arreglos del método de Kriging Ordinario y el valor estimado. Los resultados del ajuste constituyen las matrices de Kriging.

$$[A] = [\lambda][B] \tag{5}$$

Donde:

- [A] Matriz de relaciones entre las observaciones;
- [λ] Matriz de Pesos; y,
- [B] Matriz de relaciones entre las observaciones y los valores del punto de interés.

A través de operaciones con matrices se genera la matriz de pesos:

$$[\lambda] = [A]^{-1}[B] \tag{6}$$

5. DESCRIPCIÓN DEL SIC

El Sistema de Información Climático (SIC) cuenta con una base de datos creada en valores mensuales, y que incluye las siguientes variables:

- Precipitación mensual, (mm);
- Precipitación anual, (mm);
- Temperatura mínima mensual, (C);
- Temperatura mínima anual, (C);
- Temperatura máxima mensual, (C);
- Temperatura máxima anual, (C);
- Temperatura media mensual, (C); y,
- Temperatura media anual, (C).

La Figura 1 muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas del INAMHI y de la DAC, de manera diferenciada.

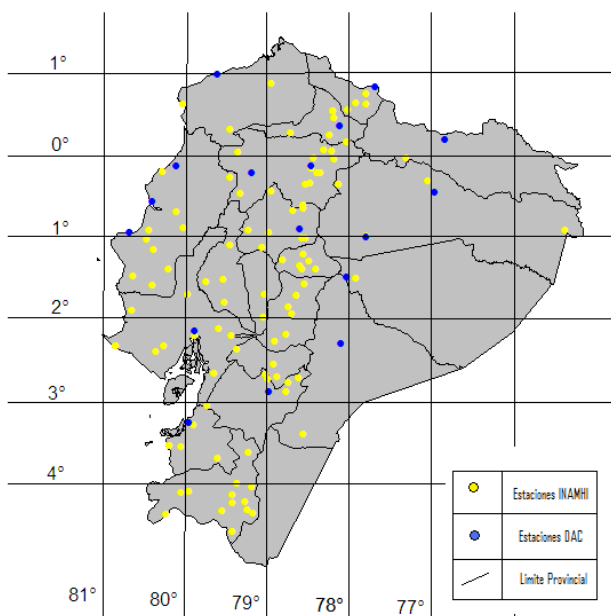


Figura 1: Ubicación geográfica de las estaciones con datos de precipitación, que soportan el SIC.

La estructura del programa consiste en módulos de ingreso de datos, de búsqueda de estaciones con criterios establecidos, en rutinas de interpolación y presentación de

resultados, de acuerdo al esquema que se adjunta como Figura 2.

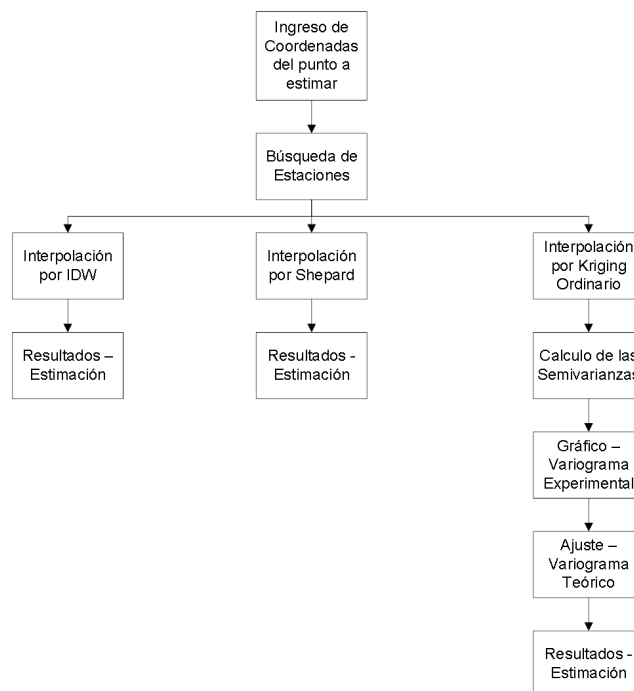


Figura 2: Estructura del Sistema de Información Climático.

El programa cuenta con dos tipos de filtros para la búsqueda de estaciones climatológicas. El primero es un filtro de distancia, con el cual se determinan las estaciones localizadas al interior de un círculo de radio especificado; y, el segundo filtro es de altitud, para diferenciar las estaciones ubicadas en pisos climáticos específicos.

6. VALIDACIÓN DEL SIC

Se seleccionó el método de Validación Cruzada por la sencillez en la aplicación y la facilidad de interpretación de resultados; consiste en eliminar el i-ésimo valor medido y estimarlo a partir de los valores de las otras estaciones, y posteriormente se calcula el error medio cuadrático, con la relación:

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z^*(x) - Z(x))^2}{n}} \tag{7}$$

Donde:

- $Z^*(x)$ Valor estimado de la variable;
- $Z(x)$ Valor conocido de la variable; y,
- n Número de estaciones consideradas.

Para facilitar el proceso de validación, se dividió al país en las siguientes regiones físico – geográficas: Costa, Sierra o montañosa y Oriente o Amazónica. A su vez, las regiones

Costa y Sierra se subdividieron en tres zonas cada una (ver Figura 3).

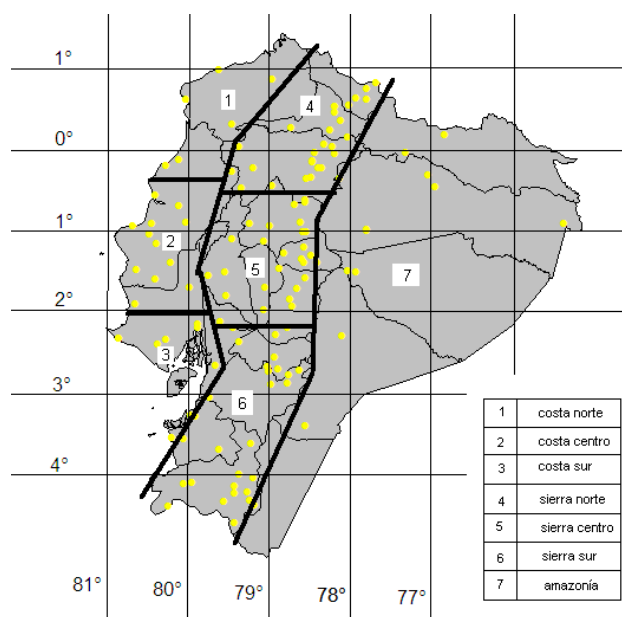


Figura 3: Regiones y zonas climáticas propuestas para validar los métodos de interpolación.

Se seleccionaron al azar 7 puntos (estaciones) de validación (tres en la Costa, tres en la Sierra y uno en la Amazonía), que se muestran en la Figura 4.

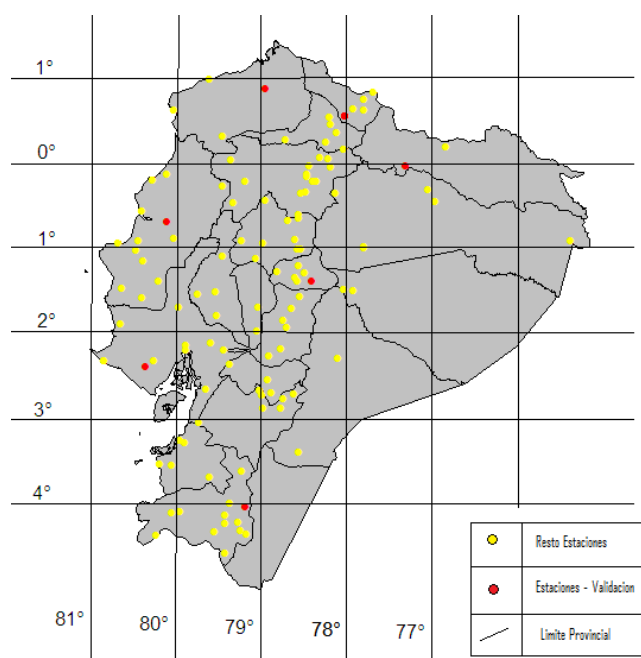


Figura 4: Estaciones climatológicas consideradas en la Validación Cruzada.

Los filtros de distancia utilizados fueron dos: el primero considera un radio de 100 km, y el segundo implica un radio de 200 km. Como filtro de altura se consideró las cotas 0 m s.n.m. y 1 800 m s.n.m. para las regiones Costa y Amazonia, y de 1 800 m s.n.m y 3 000 m s.n.m. para las estaciones ubicadas en la región Sierra. Los errores medios

cuadráticos obtenidos para las estaciones seleccionadas en el proceso de validación cruzada, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Comparación de errores medios cuadráticos para las estaciones consideradas.

Estación	IDW		Shepard		Kriging	
	0 - 200 km	0 - 100 km	1 - 200 km	1 - 100 km	Exponencial	Esférico
Cayapas	69.5	70.8	76.0	79.2	79.6	71.9
Chone	33.7	36.8	47.4	47.4	62.1	65.0
El Progreso Guayas	96.9	116.6	96.6	107.4	83.6	86.7
Mira FAO	7.0	7.5	19.3	20.5	5.5	8.7
Baños	13.5	14.2	35.6	36.3	15.1	14.9
La Argelia Loja	25.5	29.2	35.5	37.4	20.1	19.9
Lumbaqui	15.5	16.0	158.7	168.9	38.9	38.4

Se obtuvieron también los errores medios cuadráticos para cada una de las variables climatológicas consideradas. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Comparación de errores medios cuadráticos de las variables consideradas.

Variable	IDW		Shepard		Kriging	
	0 - 200 km	0 - 100 km	1 - 200 km	1 - 100 km	Exponencial	Esférico
Precipitación, (mm)	96.8	110.2	159.1	169.7	105.1	104.3
Temperatura máxima, (°C)	4.3	4.9	17.7	19.0	2.3	2.4
Temperatura mínima, (°C)	4.2	3.8	12.1	12.6	3.2	3.3
Temperatura media, (°C)	3.2	2.2	14.3	15.3	1.9	2.0

7. CONCLUSIONES

Tomando en cuenta que la red de estaciones meteorológicas del Ecuador tiene deficiencias en cuanto a su representatividad espacial, se propone el Sistema de Información Climático que se sustenta en métodos de interpolación y extrapolación, y que se soportan en su orden en técnicas geoestadísticas. El SIC es una herramienta poderosa, que permite superar la subjetividad de la aplicación tradicional del método empírico de interpolación de datos climáticos, que consiste en el trazado manual sobre una carta topográfica de la zona.

De los análisis realizados con ayuda del SIC, se deduce que los métodos IDW y Modificado de Shepard, para el caso del Ecuador, generan mejores resultados cuando se considera un mayor rango de cobertura altitudinal, es decir que la estimación en base a datos de estaciones en el rango 0 - 200 km fue mejor respecto a la obtenida con filtro 0 - 100 km.

El método de Kriging Ordinario generó estimados con menor error que el método Modificado de Shepard, incluso en relación con el método IDW, en especial para la variable temperatura. El método IDW presentó los errores más bajos para la variable precipitación. Para una elección más objetiva del variograma teórico en el método Kriging

Ordinario, se recomienda incorporar en el Sistema de Información Climático, un ajuste mediante optimización.

Se demuestra que en el SIC, con las ampliaciones del caso (inclusión de datos diarios y horarios, y un mayor periodo de registro, como por ejemplo 1961 - 2012) puede constituirse en una herramienta muy útil en los servicios meteorológicos, para atender consultas de la comunidad respecto a eventos climáticos ocurridos en el país, a partir de fechas del evento y coordenadas del punto para el cual se requiere la información. Para especialistas e investigadores el programa facilita la generación de mapas climáticos, pues permite densificar la disponibilidad espacial de datos del clima (con valores sintéticos espaciales generados mediante los métodos estadísticos propuestos).

Es necesario incorporar en el SIC el Modelo Digital de Terreno, para ampliar los análisis con la cota como variable adicional. Se recomienda ampliar el SIC, con datos diarios y horarios, y con aplicaciones para otras variables del clima, y además, incorporar modelos estadísticos de interpolación espacial adicionales, para lo cual se requerirá una plataforma computacional más potente.

Se propone utilizar el programa SIC con fines pedagógicos, en los cursos regulares de climatología, hidrología y de aplicaciones GIS.

REFERENCIAS

- [1] L. S. Andrade et al. "Estudio de Evaluación de la Red Hidrometeorológica de la Región Nororiental del Ecuador y Propuesta de Optimización como parte de la Red Hidrometeorológica Básica del Ecuador", Informe de la Fase 1, EPN - INAMHI, pp. 62 - 64, 2010.
- [2] J. H. Cruzado. Algoritmos de Estimación e Interpolación de Parámetros Geofísicos. Ed. UPR, 2004.
- [3] FAO, "Manual Curso Análisis Espacial ArcView 8.2", Proyecto regional "Ordenamiento Territorial Rural sostenible", pp. 20 26, 2003.
- [4] J. J. Lennon and J. R. Tunner, "Predicting the spatial distribution of climate: temperature in Great Britain", *J. Anim. Eco.*, vol. 64, pp. 370 - 392. 1995, May 1995.
- [5] R. J. Moreano, "Sistema de Información para la Interpolación Espacial y Temporal de Datos sobre el Tiempo Atmosférico y el Clima del Ecuador" Proyecto de Titulación, EPN, 2008.
- [6] I. A. Nalder and R. W. Wien, "Spatial interpolation of climatic normal: Test a new method in the Canadian boreal forest", *J. Agr. Forest Meteorol.*, vol 92 pp. 211- 225, 1998.
- [7] D. L. Phillips, J. Dolph, D, Marks, "A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitations in mountains terrain", *J. Agr. Forest Meteorol.*, vol. 58, pp. 119-141, 1992.
- [8] G. Q. Tabios III and J. D. Salas, "A Comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation", *Water Resources Bull.*, vol. 21: pp. 214 - 224, June 1985.
- [9] A. M. Vladimirov, Cálculos hidrológicos. Ed. Gidrometeoizdat, pp. 36 - 38; 78 - 80, 1990 (en ruso)