

## Homogeneidad y variabilidad espacial de series meteorológicas del área del proyecto “Ciudad del Conocimiento - Yachay”

Gabriel Gaona<sup>1\*</sup>, Emmanuelle Quentin<sup>1</sup> y Jerko Labus<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) Av. 6 de diciembre N33-32 e Ignacio Bossano

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: gabriel.gaona@iner.gob.ec

Editado por/Edited by:

Recibido/Received: 22/09/2013. Aceptado/Accepted: 04/11/2013.

Publicado en línea/Published on Web: 09/12/2013. Impreso/Printed: 09/12/2013.

### Abstract

The promotion of Urcuquí as an ideal climate location to construct the City of Knowledge - Yachay demands an urgent quality analysis of available weather information for the selected area. Two analyses of weather data are presented in this study: standard normal homogeneity and spatial variability. The tools used in these analyses were Climatol statistical R package and Golden Surfer geostatistical software. Precipitation, temperature, relative humidity, potential evaporation and heliophany were the analyzed variables. The results show that all the analyzed series without a significant number of records have heterogeneities. This is the reason why the final homogenized series contain a low percentage of the original data. Moreover, it was demonstrated that the temperature is the only variable depending on elevation. This fact allowed spatial modeling of temperature using the digital elevation model (DEM) based on regression. Digital models of the other variables were generated with Kriging interpolation method and with the Inverse Distance Weighted interpolation (IDW). Although, the number of weather stations around Urcuquí has reduced, an acceptable historical database is saved, which allows a general description of the climate behavior in the area. However, it is important to expand and improve the weather stations network to ensure more reliable data collection that will lead to more precise plans and projects in different sectors.

**Keywords.** Homogeneity, Spatial Variability, Meteorological series, Yachay.

### Resumen

La promoción de Urcuquí como un sitio climatológico ideal para construir la Ciudad del Conocimiento - Yachay genera la necesidad imperante de analizar la calidad de la información meteorológica disponible para dicha área. Este estudio presenta dos análisis de datos meteorológicos: homogeneidad normal estándar y variabilidad espacial. Las herramientas utilizadas fueron el paquete de métodos estadísticos Climatol y el software para geoestadística Golden Surfer. Las variables analizadas fueron precipitación, temperatura, humedad relativa, evaporación potencial y heliofanía. Los resultados muestran que se generan heterogeneidades en todas las series analizadas cuando no existe un número considerable de registros. Por esta razón, las series homogeneizadas finales mantienen un bajo porcentaje de los datos originales. Comparada con otras variables, la temperatura es la única que depende de la altitud. Esto permitió la modelización espacial de la temperatura a partir de una regresión con el modelo numérico de altitud (MNA). Los modelos numéricos de las otras variables se generaron con los métodos de interpolación Kriging e Interpolación Ponderada por la Distancia Inversa (IDPI). A pesar de que se ha reducido el número de estaciones meteorológicas alrededor de Urcuquí, se ha rescatado un aceptable banco de datos históricos que permiten un acercamiento general al comportamiento meteorológico de la zona. Sin embargo, es importante ampliar y mejorar la red de estaciones para asegurar la toma de datos más confiables. Contar con series meteorológicas de calidad permitirá ajustar los planes y proyectos en múltiples sectores del desarrollo.

**Palabras Clave.** Homogeneidad, Variabilidad espacial, Series Meteorológicas, Yachay.

### Introducción

El sitio destinado para la construcción de la universidad del conocimiento “Yachay”, Urcuquí, se ha convertido en una de las áreas más importantes para el país y sobre

la cual se pretende una considerable inversión pública. Esto ha implicado la realización de estudios de diversos campos (socio-económicos, agroecológicos, ingeniería, etc). Los promotores del Proyecto “Yachay” mencionan

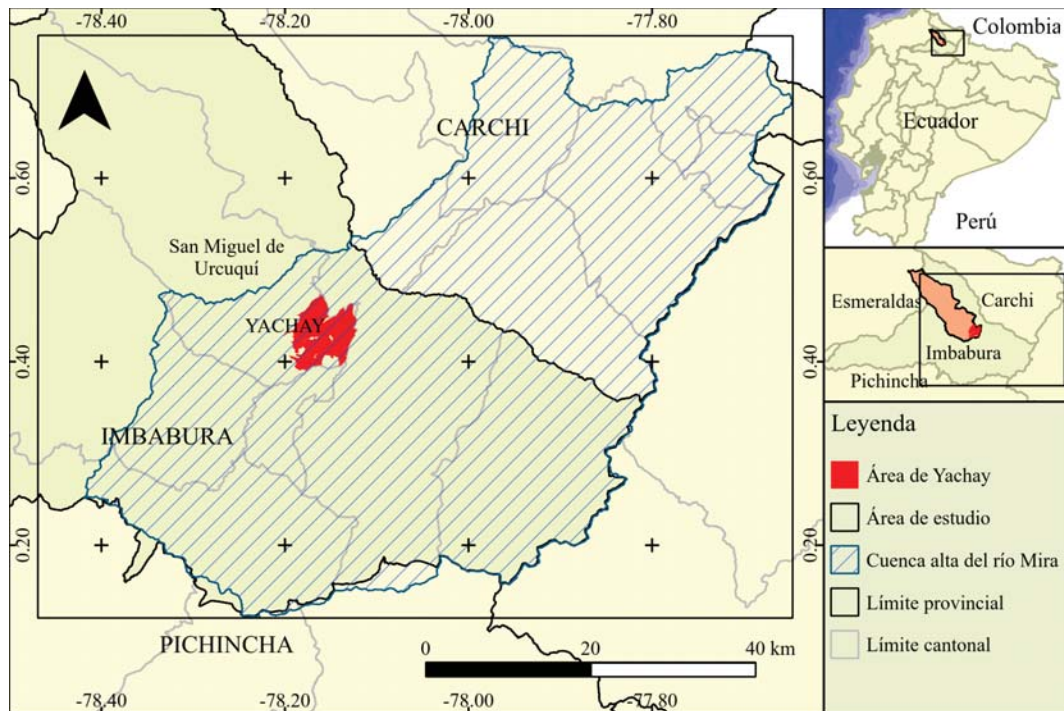


Figura 1: Mapa de ubicación geográfica y política del área de estudio.

promedios de humedad relativa, precipitación y temperatura que intentan describir las condiciones climáticas por las cuales se eligió el sitio para ese importante proyecto [1]; sin embargo, no se han podido encontrar documentos representativos de la meteorología y clima local. La información meteorológica de calidad y los estudios climático-meteorológicos pueden ser herramientas importantes de aplicación en diferentes campos. Esto incluye agricultura, reforestación, ecosistemas, energía, entre otros [2]. Estas aplicaciones podrían realizarse desde escalas globales hasta escalas locales, como es el caso de Urcoquí.

Una buena base de datos meteorológicos requiere series de variables climáticas suficientemente largas, que aseguren un análisis profundo de la variabilidad meteorológica [3]. La Organización Meteorológica Mundial detalla directrices para la gestión de datos meteorológicos, entre las cuales recomienda análisis de variabilidad y homogeneidad de series temporales [4]. La homogeneidad de una serie meteorológica debe entenderse como el conjunto de valores cuyas variaciones sólo dependen de condiciones naturales [5]. Por lo tanto, deben eliminarse los valores cuya desviación estándar está relacionada con factores antropogénicos, cambios de posición de la estación o cambios en el procedimiento normal de obtención de los datos [6–8]. Por otro lado, debe considerarse el comportamiento sinóptico del clima para lo cual se analiza la variabilidad espacial causada por la interacción con otros factores naturales [9], como por ejemplo el relieve. Las técnicas y herramientas para análisis de homogeneidad de series de datos meteorológicos son diversas. Unas dependen del tipo variable a analizar, otras de la calidad de la información (escala, temporalidad) o

del uso que se vaya a dar a la información [3]. Una de las metodologías empleadas es la Prueba de Homogeneidad Normal Estándar (PHNE) propuesta por Alexandersson y Moberg [7].

La PHNE ha sido incluida en Climatol, que es un paquete de métodos estadísticos en lenguaje R para homogeneización y llenado de datos faltantes en series de datos meteorológicos. Los algoritmos incluidos en el paquete permiten encontrar la correlación entre la serie original normalizada de la estación de análisis y una serie de referencia calculada a partir de las demás estaciones utilizadas en el análisis. La serie de referencia es construida mediante un promedio del valor de las estaciones más cercanas, ponderado por el inverso de la distancia con la estación de análisis. El procedimiento de llenado puede hacerse de varias maneras, entre las que se destacan los promedios simples y la interpolación espacial ponderada [10].

Las variaciones espaciales responden a tendencias que pueden representarse con modelos estadísticos. Estos modelos pueden ajustarse adecuadamente para estimar valores para sitios donde no se pueden hacer mediciones directas [11]. El análisis de variación e interpolación espacial se puede realizar usando diversos métodos geostatísticos y herramientas estandarizadas. Existen varios métodos de interpolación espacial. Unos son menos sofisticados como, por ejemplo, Interpolación Ponderada por la Distancia Inversa (IPDI) o Interpolación por Curvatura Mínima (ICM) [12, 13]. Otros, más sofisticados como los métodos Kriging y Cokriging [12], pueden ser ajustados mediante un análisis de la estructura de datos para identificar estacionariedad de las variables, lo que resulta en la determinación del semivariograma [11, 14–

Variable	Rangos de valores típicos $V_i$
Precipitación	$0 \leq V_i \leq (V + 5\sigma)$
Temperatura media (Tmd), Temperatura máxima (Tmx) y Temperatura mínima (Tmn)	$(\bar{V} - 5\sigma) \leq V_i \leq (\bar{V} + 5\sigma)$
Humedad Relativa	$(\bar{V} - 5\sigma) \leq V_i \leq (\bar{V} + 5\sigma)$
Evaporación Potencial	$0 \leq V_i \leq (\bar{V} + 5\sigma)$
Heliofanía	$0 \leq V_i \leq (\bar{V} + 5\sigma)$

Tabla 1: Rangos de valores típicos de las variables meteorológicas.

Variable	Número de estaciones	Período de datos analizado	Registros mensuales disponibles	Registros mensuales esperados	Porcentaje de registros disponibles
PCP	60	1963-2012	15343	38016	40.36
Tmd	14	1963-2012	3621	8064	44.90
Tmx	14	1963-2012	2973	8064	36.87
Tmn	12	1963-2012	2781	6912	40.24
HR	14	1980-2012	2030	5208	38.97
EVP	7	1968-2011	1183	3528	33.52
HE	7	1986-2011	769	2016	38.14

Tabla 2: Cantidad de registros mensuales disponibles para cada variable en el área de estudio.

16]. Cualquiera de los métodos de interpolación produce como resultado un modelo numérico de la variable analizada, el cual se representa por una malla de valores que corresponden a una variable continua [16, 17].

No todas las variables pueden ser interpoladas, aunque esto no significa que hayan restricciones de parte de los diferentes métodos. Se debe considerar que la variable cumpla con ciertas condiciones como normalidad y homogeneidad, cantidad de puntos disponibles, distribución espacial de los puntos, tipo de estacionariedad de la variable y correlación con otras variables. Estos son algunos de los requerimientos más importantes, especialmente para el uso de métodos estocásticos como Kriging y Cokriging [18, 19].

El presente trabajo es un estudio preliminar de la homogeneidad y la variabilidad espacial de series meteorológicas de estaciones convencionales del sector de Urcuquí. Las series fueron analizadas mediante técnicas geoestadísticas a partir de registros mensuales de la base de datos del Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAMHI). Los elementos meteorológicos considerados fueron precipitación (PCP), temperatura (T), humedad relativa (HR), evaporación potencial (EVP) y heliofanía (HE).

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El área predeterminada para la construcción de la “Ciudad del conocimiento - Yachay” se encuentra localizada en el cantón San Miguel de Urcuquí que pertenece a la provincia de Imbabura. El área está caracterizada por terrenos planos desde 0 a 12 % de pendiente. La temperatura media anual es de 17.8°C, durante el año varía desde 16.5 a 20.2°C con mínimos que pueden llegar

hasta 9 °C y máximos de 28.5 °C. Los meses más fríos son entre junio y agosto, mientras que los más cálidos se presentan en dos periodos, de marzo a abril y de octubre a noviembre. La Humedad Relativa media anual de 84 % varía según la estacionalidad entre 75 y 89 %. Los meses menos húmedos son de julio a septiembre. La precipitación media es de 554.33 mm al año, mensualmente registra promedios desde 11mm en el mes de agosto hasta 76 mm en el mes de abril. La vegetación en esta área es típica de estructuras arbustivas y herbáceas denominadas por el Centro de Levantamiento Integrado de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN) como matorral seco montano, matorral seco tumbesino andino y espinar seco montano [20]. La composición de florística está dominada por *Acacia macracantha* Faique, *Agave americanaa* Agave, *Opuntia quitensis* Tunilla, *Opuntia sp.* Tuna, *Tecoma stans* Tecoma amarilla, *Armatocereus cartwrightianus* Cardo, *Collicodendron scabridum* Sapote de perro, *Croton wagneri* Moshquera, *Furcraea andina* Cabuya, entre otras. El área presenta condiciones de transición de un ecosistema seco (característico de valles interandinos) a ecosistema húmedo montano (característico de las estribaciones de la Sierra). La Figura 1 representa la ubicación geográfica, política y bioclimática del área de estudio.

### Preparación de datos

Se depuraron los archivos de registros mensuales eliminando aquellas estaciones que no disponen de al menos un año de registros. Los archivos restantes fueron procesados utilizando el editor de flujo orientado a líneas *Stream Editor* (SED), el cual funciona en entorno de Linux. Los archivos constan de dos partes: la primera parte corresponde a los datos de identificación y ubicación de la estación; y la segunda parte es la tabla de datos mensuales. De estos archivos se extrajeron por separado datos de identificación y ubicación geográfica de

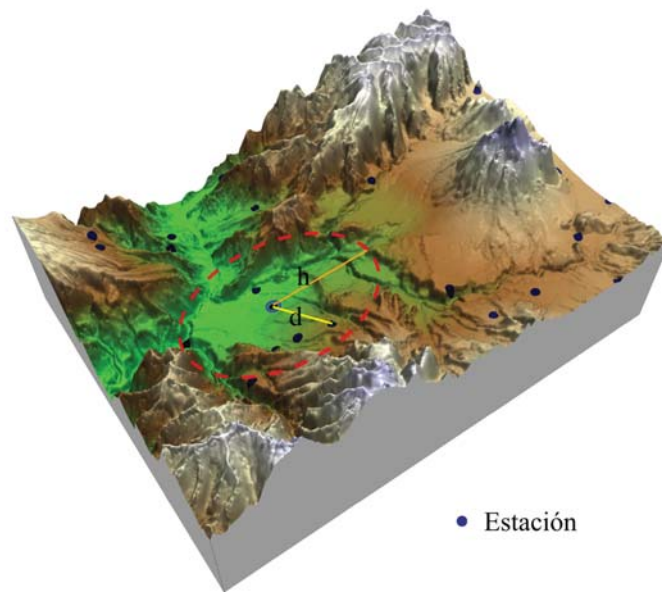


Figura 2: Representación gráfica de los parámetros  $d$  y  $h$  de IPDI.

las estaciones; y los datos correspondientes a la variable a procesar.

En hojas de cálculo se estructuraron las tablas de valores, considerando que se trata de valores mensuales se conformaron filas de 12 registros por año. El período de análisis en cada variable se determinó en función de la disponibilidad de al menos un registro en cualquiera de las estaciones por unidad temporal (mes). Se organizaron los años de datos desde el primero de la estación 1 hasta el año  $i$  de la estación  $n$ . Los valores faltantes fueron identificados con un código específico. Los archivos resultantes fueron identificados de acuerdo a la nomenclatura requerida por software y constituyen la base de datos para análisis con Climatol [10].

#### Análisis de homogeneidad de las series

El análisis de homogeneidad se realizó en dos pasos, el primero es la detección de valores atípicos y el segundo el análisis de homogeneidad de series. PHNE es un modelo estadístico que usa una regresión ortogonal de tipo II para determinar el rango en el cual los datos normalizados de una variable ( $V$ ) son homogéneos de acuerdo a la media ( $\bar{V}$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ) [10]. La detección de valores atípicos consiste en identificar los valores ( $V_i$ ) que no corresponden a un rango determinado. El rango de valores típicos para una serie  $V$ , se calculó en función de su media y una amplitud de cinco desviaciones estándar. Dadas las características específicas de cada variable, se requieren diferentes rangos para cada una de ellas; por lo tanto, la Tabla 1 muestra los intervalos matemáticos de los rangos de valores típicos.

Una vez determinados los valores atípicos se recalcularon mediante una correlación lineal de la serie de análisis con una serie de referencia. La construcción de las series de referencia y posterior relleno de datos se realizó mediante IPDI (Ecuación 1).

$$V_r = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \left( \frac{1}{1 + \frac{d_i^2}{h^2}} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{1 + \frac{d_i^2}{h^2}} \right)} \quad (1)$$

Donde  $V_r$  es el registro mensual calculado para la serie de referencia,  $V_i$  son todos los registros de todas las estaciones disponibles,  $d$  es la distancia en km de la estación de análisis y la estación del registro considerado y  $h$  es la distancia en km donde el peso de ponderación es la mitad del peso de una segunda estación ubicada en lo que se considera la misma localidad. Para todos los casos se asignó un valor de  $h = 100$ , considerando que hay muy pocos datos registrados por mes. Los datos atípicos y registros faltantes se reemplazaron por el valor estimado mediante la correlación, con el fin de obtener series completas para los períodos de análisis. La Figura 2 esquematiza los parámetros  $d$  y  $h$  de la Ecuación 1.

La detección de heterogeneidades se realizó con el método de PHNE para tendencias de Alexandersson y Moberg [7] incluido como función del paquete Climatol. La hipótesis nula considerada fue la homogeneidad de las series con una probabilidad  $P = 0,05$ . La intención es detectar cambios bruscos en la media de la variable. Para esto, Climatol realiza por defecto dos procedimientos: 1) detección de cambios en la media en bloques ( $tvt$ ), cada 60 registros (5 años de datos mensuales) usando como umbral de PHNE máximo  $tvt = 25$ ; y 2) detección de cambios en toda la serie ( $snhtt$ ), para lo cual se fijó un umbral máximo  $snhtt = 50$ . Los valores máximos que superen los umbrales definidos indican el período donde la serie cambia su comportamiento normal. Los valores siguientes al registro en el cual se detectó un salto en la media se guardan como una nueva



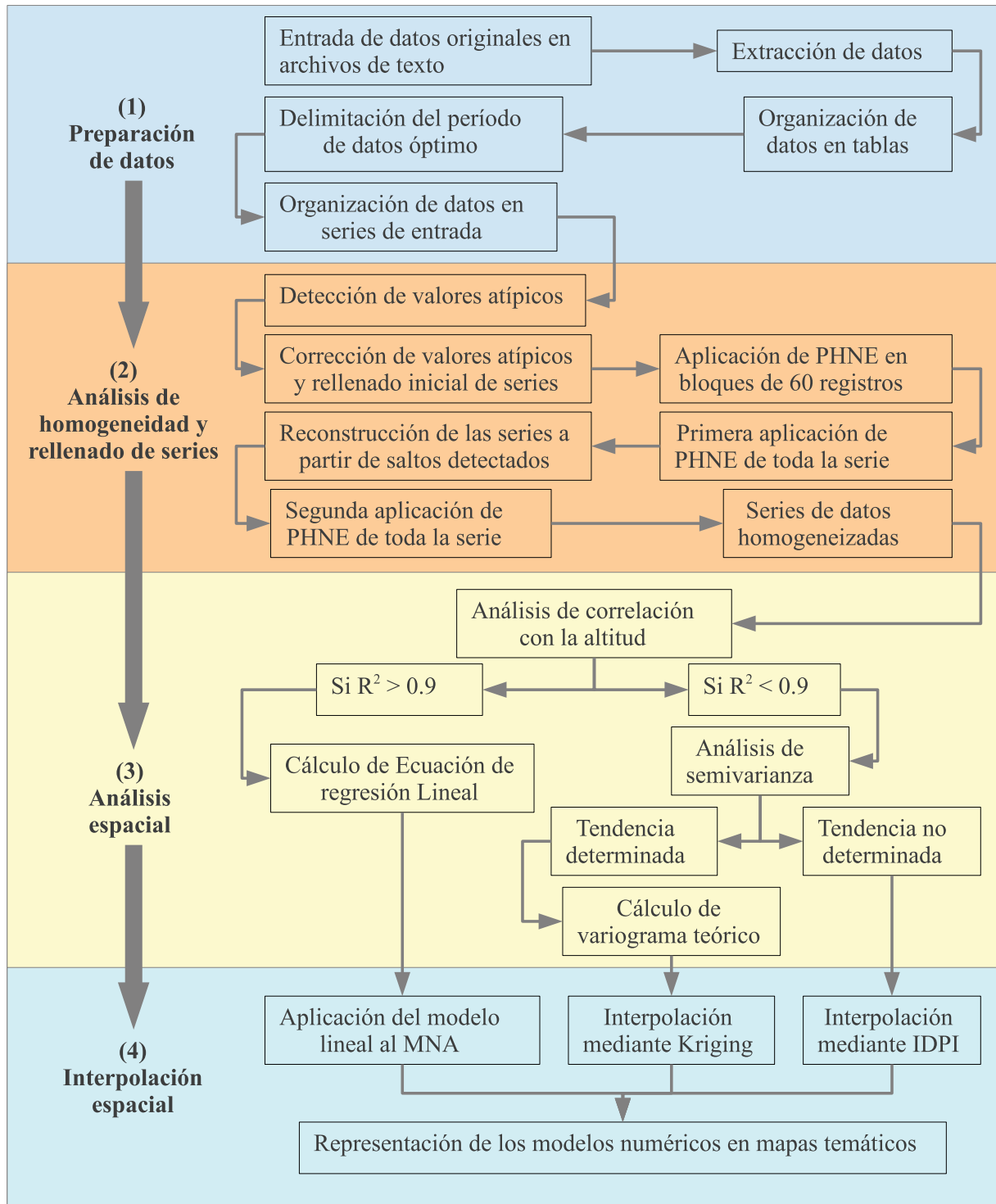


Figura 3: Diagrama del procedimiento aplicado.

serie y se completan mediante el método IPDI. Una vez completados los valores se vuelve a aplicar la PHNE a toda la serie.

Las nuevas series homogeneizadas y rellenadas se organizan en pilas de datos usando hojas de cálculo. De estas pilas se obtienen los valores a promedios mensuales y anuales del período analizado. éstos se organizan en una tabla con la ubicación y la altitud de la estación.

#### Análisis de variabilidad espacial

El análisis de variabilidad espacial incluye el análisis de correlación con la altitud. Se calcularon coeficientes  $R^2$ , pendiente ( $a$ ), intersección ( $b$ ) y error típico ( $ET$ ) de las variables con la altitud de la estación, para establecer los modelos de regresión lineal ( $V = aZ + b + ET$ ); donde,  $V$  es la variable meteorológica analizada y  $Z$  es la altitud de la estación.

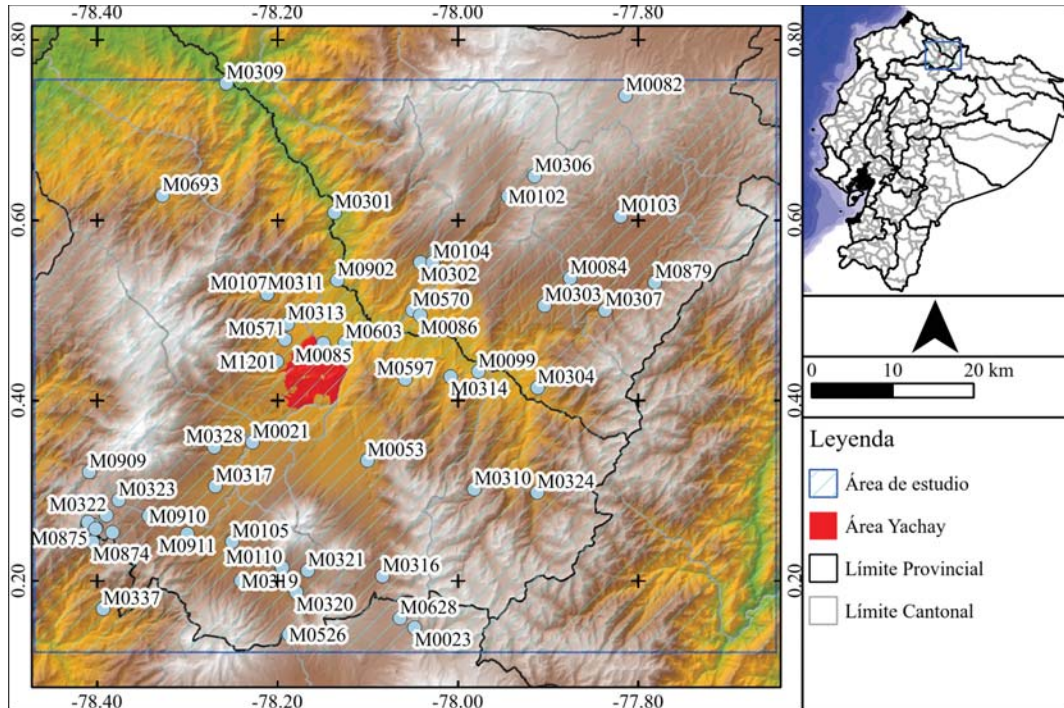


Figura 4: Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas.

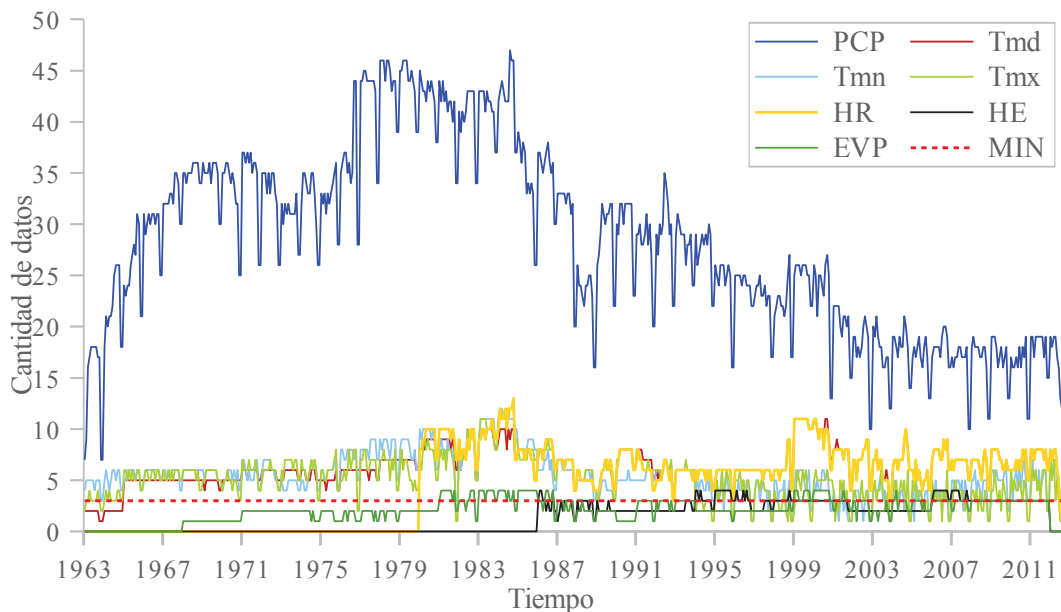


Figura 5: Número de registros mensuales por variable en el período 1963 - 2012.

Para las variables que no presentaron correlación con la altitud ( $R^2 < 0,9$ ) y que disponen de suficientes puntos de medición (como el caso de la precipitación) se analizó la semivarianza experimental. El variograma resultante fue implementado en la interpolación mediante el método Kriging. Como última alternativa se consideró interpolar datos mediante el método IPDI para aquellas variables que no cumplen con las condiciones de correlación con la altitud, y que tienen alta variabilidad espacial en escalas locales. No se interpoló la evaporación ni la heliofanía por falta de puntos de muestreo.

El esquema general de la metodología desarrollada se resume en la Figura 3. Los colores separan las etapas del procedimiento seguido.

### Resultados y Discusión

Los resultados reflejaron que las series meteorológicas usadas no cumplen con las condiciones óptimas para este tipo de análisis, lo que permite determinar necesidades urgentes de mejoramiento en la obtención de datos. En el ámbito nacional, autores como Vega-Ruiz [21], advierten sobre la problemática relacionada a la infor-

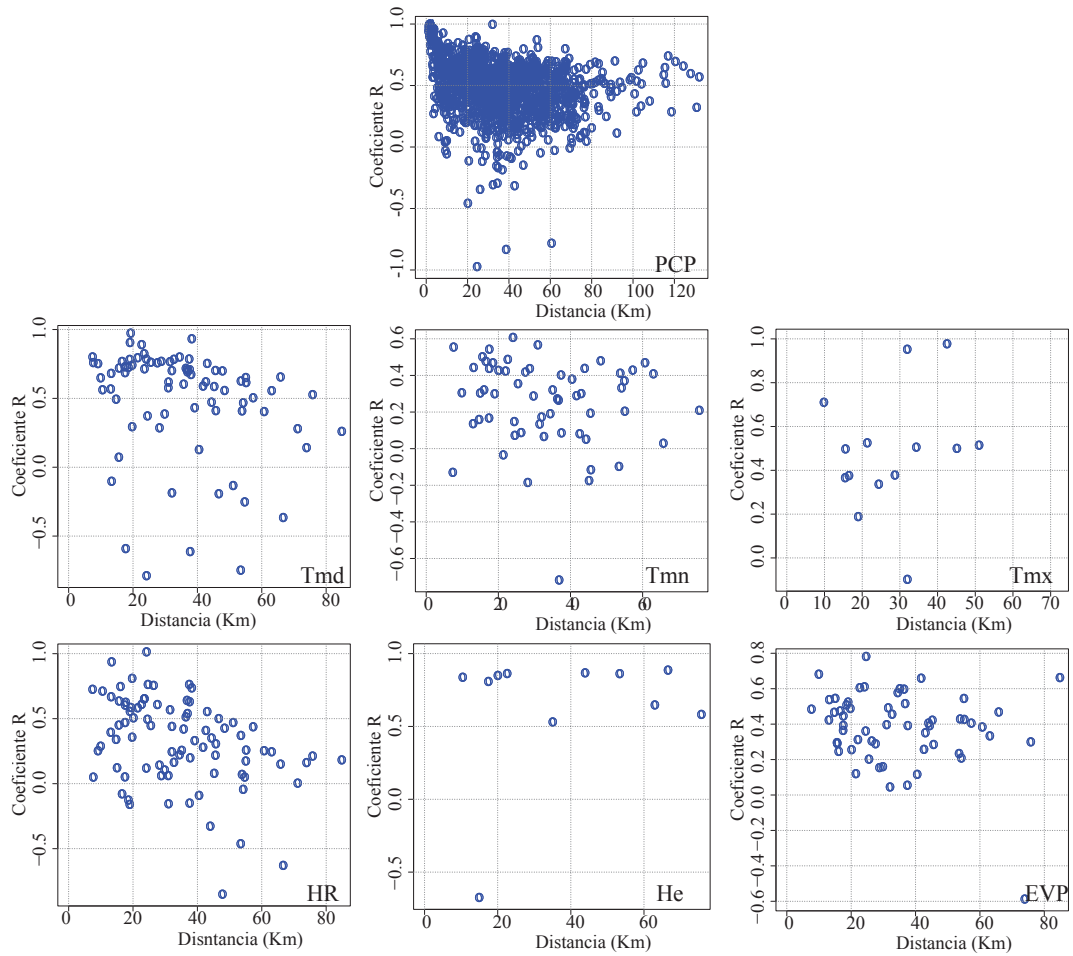


Figura 6: Correlograma de principales diferencias entre estaciones.

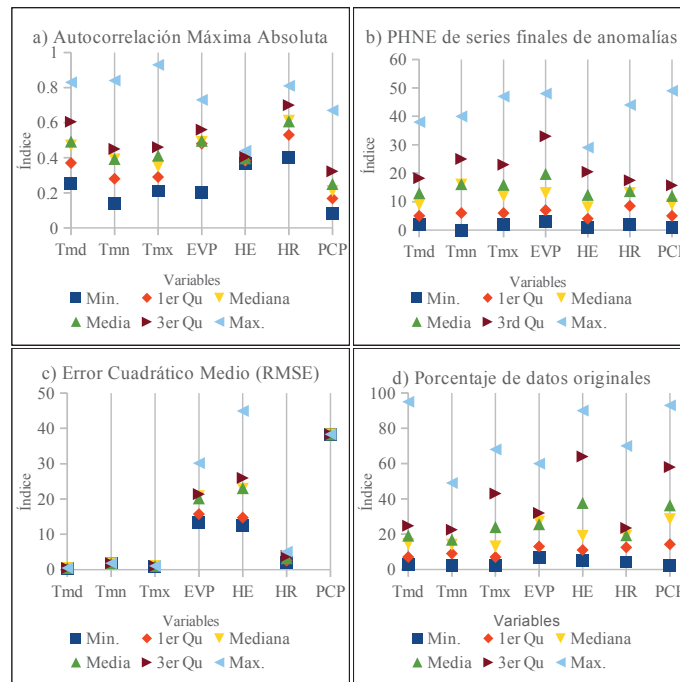


Figura 7: Estadísticos del análisis de homogeneidad y rellenado de datos.



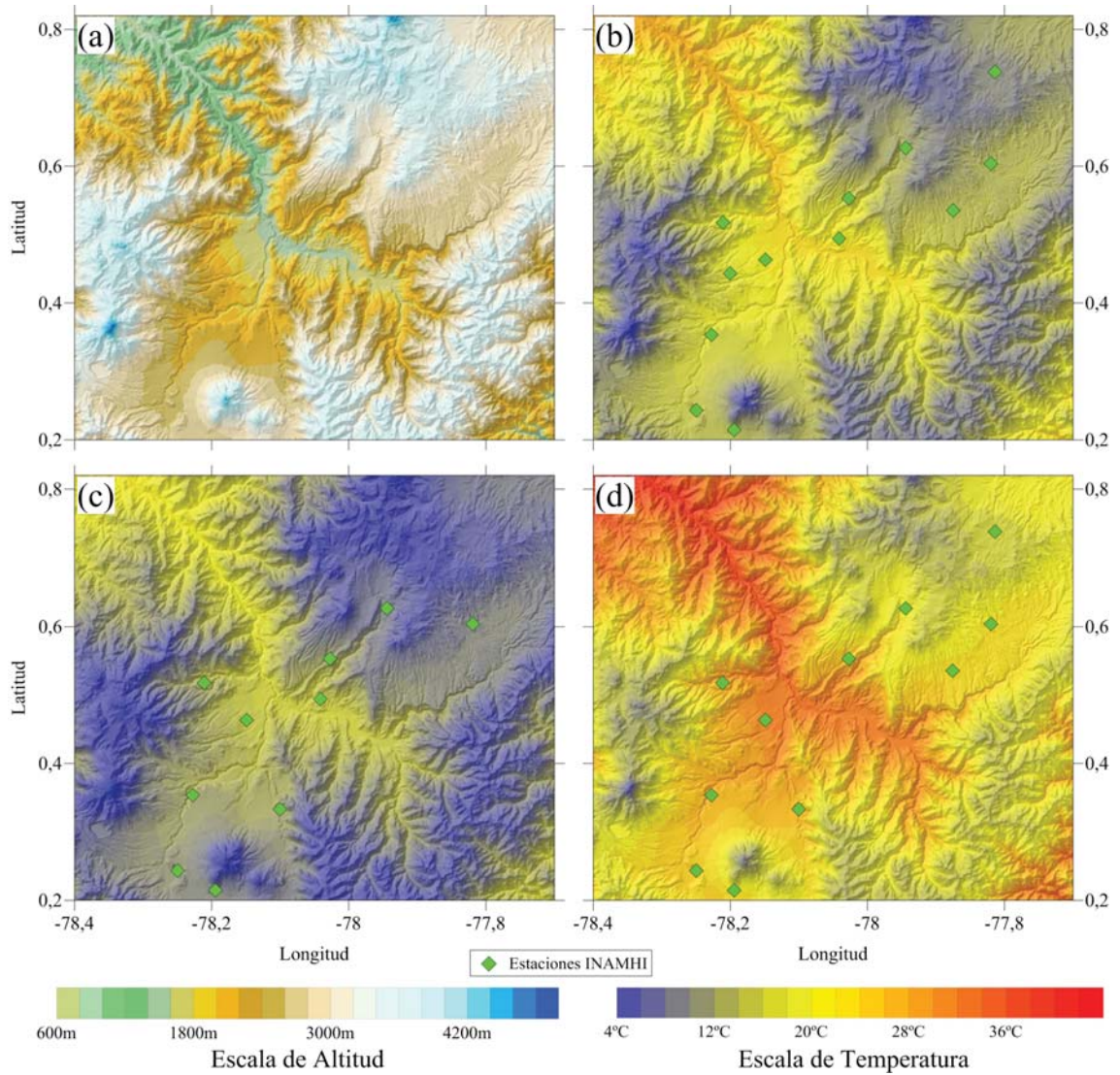


Figura 8: Modelos Numéricos de: a) Altitud, b) Temperatura Media, c) Temperatura Mínima, y d) Temperatura Máxima.

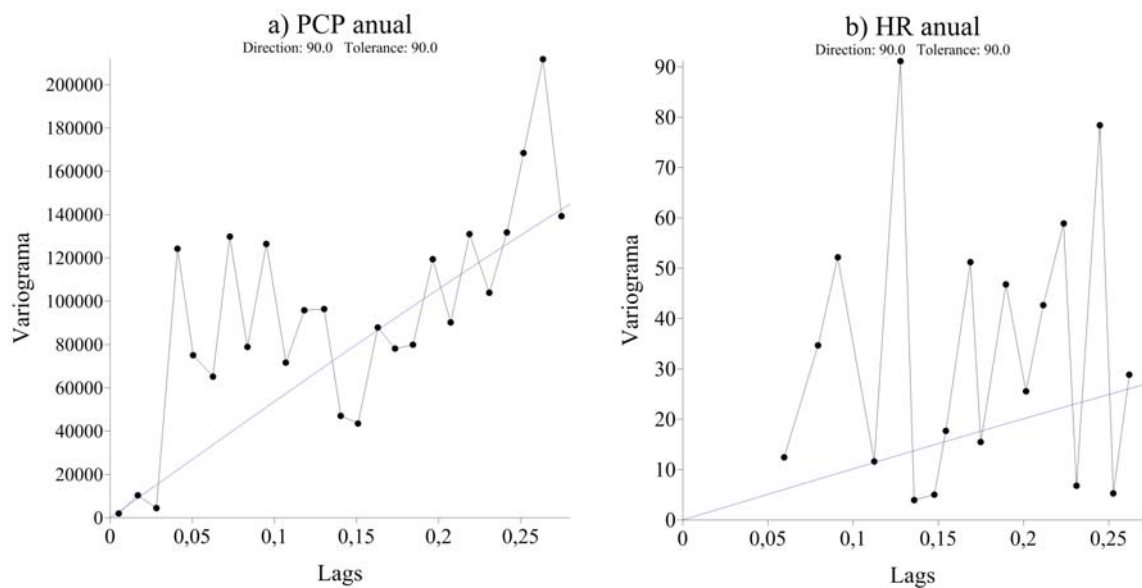


Figura 9: Variogramas: a) Precipitación Anual, y b) Humedad Relativa Anual.



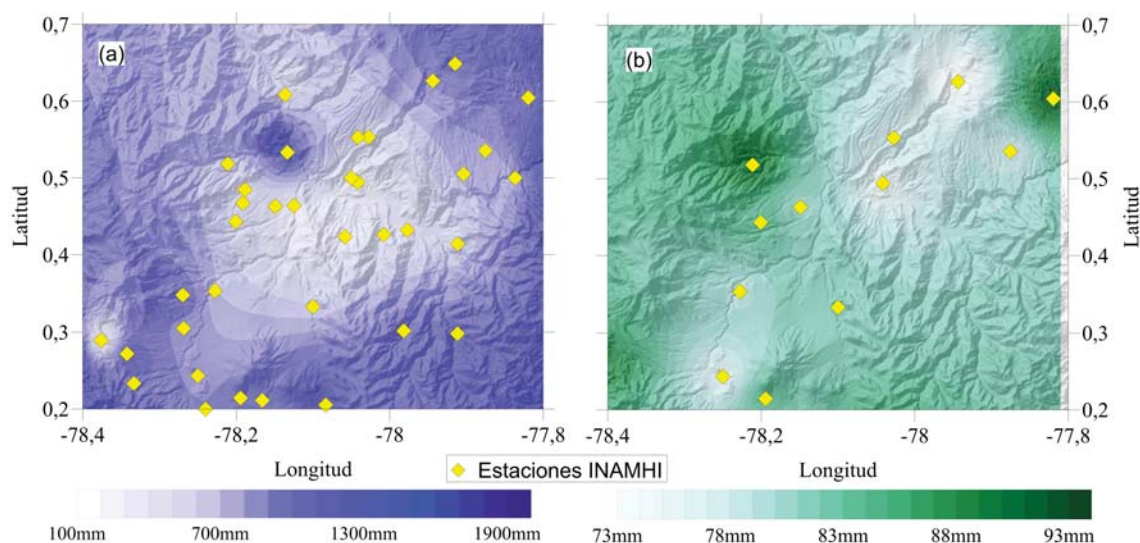


Figura 10: Modelos Numéricos: a) Precipitación Anual, y b) Humedad Relativa Anual.

mación agrometeorológica en el sector. El estudio de Vega destaca la reducción de más del 60 % de las estaciones meteorológicas hasta el año 2006, en la provincia de Imbabura. Las visitas de campo en el año 2008 comprobaron la disminución del número de estaciones. Aunque el análisis presentado por el mencionado autor no aborda detalles sobre el estado de las estaciones meteorológicas remanentes, su descripción estadística presenta datos de no más de 10 estaciones disponibles. Estos datos indican que aún se dispone de un registro histórico relevante que puede ser rescatado. Con esta premisa se ha consultado la base de datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología para obtener datos que aporten a este estudio. La Tabla 2 presenta para cada variable la cantidad de estaciones, el período de datos y el porcentaje general de registros mensuales encontrados para esa variable durante todo el período. La Tabla 3 Presenta el listado general de las estaciones analizadas en este estudio; y la Figura 3 presenta la ubicación de las estaciones listadas en la Tabla 3.

El porcentaje global de datos disponibles por variable no es suficiente para determinar el comportamiento sinóptico detallado del clima en el sector. Sin embargo a partir de éstos se puede analizar la tendencia y correlación entre variables usando métodos estadísticos. La Figura 5 representa la cantidad de estaciones dentro del área de estudio, que registraron el valor de dicha variable para ese mes y año. Las variables de precipitación, temperatura media y humedad relativa cumplen la mayor parte del período con un mínimo de datos requeridos por unidad temporal (un registro de promedio mensual de tres estaciones diferentes) para interpolación. Por el contrario las variables restantes (HE y EVP) no cumplen el mínimo de registros requeridos para interpolación espacial, sin embargo también recibieron el tratamiento para el análisis de homogeneidad. Esta figura también permite tener una idea preliminar de la estabilidad en la toma de datos para cada variable, aunque esto no puede ser corroborado por falta de datos asociados.

### Análisis de homogeneidad de series

El análisis de correlación entre series presentado en la Figura 6, muestra un comportamiento definido por casi nula correlación entre estaciones cercanas. En los gráficos se aprecia que las series de HE mantienen una alta correlación entre estaciones, sin embargo también son las series que presentan más del 60 % de datos faltantes.

Como ya se ha mencionado, las series de cada estación presentaron largos períodos de datos sin valores registrados; aunque de todas maneras se realizó el análisis de homogeneidad para todas las series. Los resultados estadísticos se muestran en la Figura 7. Si se consideran los resultados globales para cada variable, la autocorrelación absoluta máxima (7a) no es significativa; la media y hasta el tercer cuartil de las series se mantienen por debajo del 60 % de auto-correlación lo que indica que se trata de series no estacionales. Por otro lado, la PHNE (7b) aplicado a las series de anomalías entre series originales y homogeneizadas se presenta en rangos desde 0.8 hasta 50 creando un espectro de variación bastante amplio, especialmente en los casos de temperatura máxima, evaporación potencial y precipitación. El error cuadrático medio (7c) de las series homogeneizadas muestra una alta variación, especialmente en las series de evaporación potencial y heliofanía. Finalmente el porcentaje de datos originales mantenidos en las series homogeneizadas (7d) es reducido debido al bajo porcentaje de datos originales disponibles.

Los valores y anomalías detectadas para el caso de PCP eran esperados debido a que por su naturaleza se trata de datos que pueden tener alta variabilidad espacial y temporal. Las series de PCP generalmente no siguen una distribución normal [6]. Las anomalías de las variables HE y EVP se deben estrictamente al elevado porcentaje de datos faltantes, por lo tanto no se analizó su variabilidad espacial.

Nro.	Código	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud
1	M0001	Inguincho	-78.40	0.26	3140
2	M0021	Atuntaqui	-78.23	0.35	2200
3	M0023	Olmedo - Pichincha	-78.05	0.15	3120
4	M0053	Ibarra Aeropuerto - DAC	-78.10	0.33	2214
5	M0082	Chalpatan	-77.81	0.74	3300
6	M0084	Bolivar-Carchi INERHI	-77.88	0.54	2790
7	M0085	Salinas-Imbabura INERHI	-78.15	0.46	1730
8	M0086	San Vicente De Pusir	-78.04	0.49	1891
9	M0099	Carpuela	-77.98	0.43	1650
10	M0102	El Angel	-77.94	0.63	3000
11	M0103	San Gabriel	-77.82	0.60	2860
12	M0104	Mira - FAO La Portada	-78.03	0.55	2275
13	M0105	Otavalo	-78.25	0.24	2550
14	M0107	Cahuasqui - FAO	-78.21	0.52	2335
15	M0110	San Pablo Del Lago	-78.19	0.21	2700
16	M0301	FF CC Carchi	-78.14	0.61	1280
17	M0302	Mira	-78.04	0.55	2410
18	M0303	Bolivar - Carchi INAMHI	-77.90	0.51	2800
19	M0304	Monte Olivo	-77.91	0.41	2040
20	M0306	San Jose La Esperanza - Carchi	-77.91	0.65	3270
21	M0307	Gruta La Paz	-77.84	0.50	2470
22	M0309	San Juan De Lachas - Rio Blanco	-78.26	0.75	950
23	M0310	Mariano Acosta	-77.98	0.30	2980
24	M0311	Cahuasqui	-78.21	0.52	2340
25	M0313	Copihue	-78.19	0.48	1900
26	M0314	Ambuqui	-78.01	0.43	1880
27	M0316	Zuleta	-78.08	0.21	2910
28	M0317	Cotacachi - Hda. Esthercita	-78.27	0.31	2410
29	M0319	San Rafael Del Lago	-78.24	0.20	2790
30	M0320	Hda. La Vega	-78.18	0.19	2700
31	M0321	Topo - Imbabura (Angla)	-78.17	0.21	2860
32	M0322	Cambugan	-78.39	0.27	3160
33	M0323	Achupallas - Imbabura	-78.38	0.29	3205
34	M0324	San Francisco De Sigsipamba	-77.91	0.30	2230
35	M0328	Hda. La Maria - Anexas (Leticia)	-78.27	0.35	2600
36	M0329	Inguincho Grande	-78.40	0.26	3180
37	M0330	Inguincho 1	-78.40	0.26	3260
38	M0331	Inguincho 5	-78.41	0.26	3270
39	M0332	Inguincho 7	-78.40	0.26	3200
40	M0333	Inguincho 8	-78.41	0.26	3300
41	M0334	Inguincho 9	-78.41	0.27	3410
42	M0337	San Jose De Minas	-78.39	0.17	2440
43	M0525	Pisabo	-78.33	0.23	2750
44	M0526	Cajas-Mojanda	-78.19	0.14	3106
45	M0570	Chota Chiquito	-78.05	0.50	1590
46	M0571	Tumbabiro	-78.19	0.47	2120
47	M0597	Piman Chico	-78.06	0.42	2040
48	M0603	Salinas - Imbabura INAMHI	-78.12	0.46	1730
49	M0604	Sigsicunga	-78.38	0.25	3200
50	M0628	Hda. Pesillo	-78.06	0.16	3120
51	M0693	Buenos Aires - Imbabura	-78.33	0.63	2200
52	M0872	Inguincho 2	-78.41	0.26	3300
53	M0874	Inguincho 4	-78.40	0.24	3200
54	M0875	Inguincho 6	-78.41	0.26	3400
55	M0879	Apaqui D.J Minas	-77.78	0.53	2820
56	M0902	Salinas - Imbabura INECEL	-78.13	0.53	1650
57	M0909	Gualsaqui	-78.41	0.32	2710
58	M0910	Morasugro - Imbabura	-78.34	0.27	2860
59	M0911	Rio Blanco (Cuenca Exp.)	-78.30	0.25	2550
60	M1201	Chiriyacu	-78.20	0.44	2262

Tabla 3: Listado de estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
he	0.563	0.751	0.619	0.714	0.596	0.388	0.319	0.257	0.440	0.724	0.713	0.739
hr	0.124	0.134	0.149	0.133	0.137	0.154	0.162	0.136	0.141	0.124	0.125	0.137
pcp	0.111	0.145	0.155	0.142	0.160	0.115	0.064	0.081	0.171	0.163	0.156	0.121
tmd	0.948	0.949	0.949	0.948	0.948	0.949	0.950	0.948	0.947	0.947	0.947	0.948
tmn	0.743	0.776	0.742	0.782	0.761	0.721	0.706	0.756	0.778	0.786	0.746	0.733
tmx	0.907	0.906	0.909	0.910	0.907	0.907	0.906	0.901	0.905	0.903	0.906	0.904

Tabla 4: Coeficientes de correlación  $R^2$  entre promedio anual y altitud.

### Análisis espacial de los datos

Este análisis intenta descubrir la influencia de ciertos factores en la variabilidad del clima. A pesar de la limitada información y con las deficiencias en calidad detectadas se intentó detectar las tendencias de las series climáticas con respecto a la forma del relieve o a su estacionariedad.

**Correlación con la altitud** Las series de temperatura son las únicas que muestran una correlación con la altitud ( $R^2 > 0,9$ ). Con estos resultados se pudieron obtener los modelos de regresión, mismos que fueron aplicados al modelo numérico de altitud (MNA) del área de estudio. Las demás series tienen coeficientes de correlación bajos, por lo tanto se analizó otras opciones de muestreo, como interpolación espacial. La Tabla 4 muestra los coeficientes de correlación de los promedios mensuales con la altitud.

La regresión lineal de la temperatura anual respecto a la altitud muestra gradientes de temperatura de  $-0.53^\circ\text{C}/100\text{m}$  para temperatura mínima,  $-0.71^\circ\text{C}/100\text{m}$  para temperatura media y  $-0.9^\circ\text{C}/100\text{m}$  para temperatura máxima. El gradiente térmico promedio del área de estudio está sobre el promedio calculado para las zonas tropicales ( $0.65^\circ\text{C}/100\text{m}$ ).

**Interpolación Espacial** Los modelos lineales obtenidos para temperatura se aplicaron al MNA del área de estudio, con lo cual se derivó la temperatura para toda el área de estudio. La Figura 8 representa los modelos numéricos de altitud y temperaturas obtenidos para el área de estudio.

Al no hallar correlación de las demás variables con la altitud, se analizó la variabilidad espacial de los datos mediante geoestadística. La PCP presenta un semivariograma experimental que se ajusta de mejor manera a un modelo de tipo esférico. La alta correlación entre estaciones cercanas permite detectar patrones de lluvias locales, quizá modificados por el relieve. Al contrario de la PCP, la HR no muestra una tendencia espacial clara. La alta variabilidad tanto a escalas local como general no permite encontrar un patrón de comportamiento, por lo tanto el variograma no pudo ser usado para interpolación con Kriging. La Figura 9 muestra los variogramas de precipitación y humedad relativa obtenidos del análisis de semivarianza. A pesar de que estas dos variables presentan una correlación lineal con la altitud, no se puede descartar la influencia del terreno para conformar tendencias más locales que la generalidad de este estudio.

El variograma de PCP fue usado para ajustar la interpolación mediante Kriging, en cambio la HR fue interpolada con el método IPDI. El modelo numérico de PCP presenta valores elevados en las áreas correspondientes a alta montaña, mientras que en los valles disminuye el volumen. Existe una tendencia global de disminuir el promedio hacia el noroeste de la cuenca. La interpolación de la HR produjo un modelo numérico marcado por distribuciones concéntricas alrededor de las estaciones de medición. Los valores más bajos se presentan en una franja que se extiende de sureste a noroeste. La Figura 10 muestra los modelos numéricos de: (10a) precipitación media anual y (10b) humedad relativa media anual del área de estudio.

### Conclusiones

La meteorología en el área de estudio no presenta a primera vista estacionalidades definidas. De acuerdo a los datos obtenidos, la temperatura en el área de Yachay puede variar entre los  $16$  y  $22^\circ\text{C}$ , mientras que el promedio anual de temperatura es de  $17.8^\circ\text{C}$ . Esta variable presenta fuerte dependencia de la altitud por lo que resulta relativamente fácil analizar su variabilidad espacial.

La precipitación presenta un promedio anual de  $554.3$  mm, el mes más lluvioso es abril ( $76$  mm) y el menos lluvioso es agosto ( $11$  mm). La humedad relativa media es de  $84\%$  y puede variar desde  $74\%$  (en agosto) a  $88\%$  (en abril). Al contrario de la temperatura, la precipitación y la humedad relativa presentan alta heterogeneidad y baja correlación con la altitud, lo que hizo necesario aplicar procedimientos para detección de tendencias espaciales independientes. Se encontró que los datos de estas dos variables no presentan tendencias claras de variación espacial por lo que se requiere ampliar su análisis considerando otros parámetros ambientales, como la cobertura vegetal, la influencia de corrientes atmosféricas de Costa o Amazonía, el efecto de los frentes de presión, entre otros.

La precipitación es el elemento más monitorizado en el área de estudio. La mayor parte de las estaciones listadas anteriormente son de tipo pluviométricas manuales. La Heliofanía es la variable menos monitorizada. Entre las variables obtenidas para este estudio no se dispone de datos de velocidad ni de dirección de viento, radiación global, directa o difusa, y nubosidad. La obtención de estas series meteorológicas permitirá ajustar de mejor manera el proceso de análisis del comportamiento de las variables en el sitio de interés.



Las diferentes series presentan heterogeneidades considerables, que pudieran estar relacionadas con diversos factores, entre ellos el cambio de personal, el cambio de uso de suelo e infraestructura. Para comprobación de estos efectos se requiere relacionar con información de metadatos u otros datos que permitan mayor detalle de las tendencias durante el período analizado.

La información usada en este análisis y sus resultados no tienen la resolución temporal adecuada para estudios energéticos ni simulaciones del comportamiento climático a escalas locales. En este estudio se intentó obtener apreciaciones generales del comportamiento climático en la zona de interés en función de los datos disponibles en fuentes oficiales. No se incluye un análisis del comportamiento físico de los diferentes elementos climáticos, debido a que nos se dispone de series con mayor resolución temporal.

Se considera imprescindible que las entidades responsables de la monitorización del clima en Yachay aumenten la red de estaciones meteorológicas multipropósito y se adquieran periódicamente datos de satélite. La integración de estas fuentes de datos en modelos climáticos determinísticos a escala local permitiría descubrir posibles comportamientos no detectados en este estudio y permitiría disponer de datos meteorológicos para su uso en diferentes aplicaciones del desarrollo de Yachay.

### Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de esta investigación que es parte del proyecto “Estudio para Diseño de Edificaciones de Bajo Consumo Energético en Yachay” del INER.

### Referencias

- [1] Yachay, E. 2013. “Proyecto Ciudad del Conocimiento Yachay”.
- [2] WMO. 2011. “Guide to Climatological Practices”. *WMO-No100. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization*, 100:117.
- [3] Hernández-García, E.; García-Valero, J.; Palenzuela-Cruz, J.; Belda-Esplugues, F. 2012. “Ejercicio de homogeneización y relleno de series diarias de temperatura máxima, mediante el uso de climatol”. en: *Cambio Climático extremo e impactos. Ed. por José M. Cuadrat Prat, Pedro Dorta Antequera, María José Estrela Navarro, Fidel González Rouco, José Antonio López Díaz, Juan Carlos García Codrón, Fernando Sánchez Rodrigo, Javier Martín Vide y Ricardo García Herrera. Primera Ed. Salamanca: Globalia Artes Gráficas y Distribución*: 409 – 419.
- [4] WMO. 2007. “Directrices sobre la gestión de datos climáticos”. *Inf. tec. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization*: 62.
- [5] Aguilar, E.; Auer, I.; Brunet, M.; Peterson, T.; Wieringa, J. 2003. “Guidelines on Climate Metadata and Homogenization”. *Inf. tec. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization*, 1186:52.
- [6] Guijarro-Pastor, J. 2004. “Climatol: software libre para la depuración y homogeneización de datos climáticos”. *R. packages*: 494 – 502.
- [7] Alexandersson, H.; Moberg, A. 1997. “Homogenization of swedish temperature data. Part I: homogeneity test for linear trends”. *International Journal of Climatology*, 17: 25 – 34.
- [8] Easterling, D.; Peterson, T. 1995. “A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series”. *International Journal of Climatology*, 15:369 – 377.
- [9] Fries, A.; Rollenbeck, R.; Göttlicher, D.; Nauß, T.; Homeier, J.; Peters, T.; Bendix, J. 2009. “Thermal structure of a megadiverse Andean mountain ecosystem in southern Ecuador and its regionalization”. *Erkunde*, 63(4): 321 – 335.
- [10] Guijarro, J. 2011. “User guide to Climatol: An R package for homogenization of climatological series”. *Baleaic Islands, Spain*.
- [11] Gallardo, A. 2006. “Geostadística”. *Ecosistemas*, 3 (1987):1 – 11.
- [12] Portalés, C.; Boronat-Zarceño, N.; Pardo-Pascual, J.; Balaguer-Beser, A. 2006. “Un nuevo método para el cálculo de precipitaciones medias mediante técnicas de interpolación geoestadística considerando las características geográficas y topográficas del territorio”. *Valencia, España*.
- [13] Golden Software Inc. 2002. “User’s Guide Surfer 8”. *Colorado, USA*.
- [14] Sosa-Paz, C. 2002. “Método geoestadístico de Krige: una aplicación a la distribución pluvial en el estado de Tabasco”. *Tesis de Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería de Sistemas. Instituto Politécnico Nacional*: 110.
- [15] Chica-Olmo, M. 2005. “La geoestadística como herramienta de análisis espacial de datos de inventario forestal”. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 19:47 – 55.
- [16] Hengl, T. 2009. “A Practical Guide to Geostatistical Mapping”. *Second Ext. Luxembourg: University of Amsterdam*: 293.
- [17] Díaz-Padilla, G.; Sánchez-Cohen, I.; Quiroz, R.; Garatuzza-Payán, J.; Watts-Thorp, C.; Cruz-Medina, I. 2008. “Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de Barlovento y Sotavento del Golfo de México”. *Agricultura Técnica en México*, 34:279 – 287.
- [18] Hartkamp, A.; De Beurs, K.; Stein, A.; White, J. 1999. “Interpolation Techniques for Climate Variables”. *Sustainable Maize and Wheat Systems for the Poor*.
- [19] Hong, Y.; Nix, H.; Hutchinson, M.; Booth, T. 2005. “Spatial interpolation of monthly mean climate data for China”. *International Journal of Climatology*, 25(10): 1369 – 1379.

- [20] CLIRSEN. 2012. “Generación de geoinformación del proyecto Ciudad del Conocimiento Yachay”. *Quito, Ecuador*.
- [21] Vega-Ruiz, D. 2009. “Análisis de la problemática agrometeorológica actual en la provincia de Imbabura”. *CIT-TOL: Cultivos Energéticos Alternativos*: 99 – 110.