

Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela

Trend and Seasonality Assessment for Monthly Precipitation in Venezuela

LELYS GUENNI^{1,a}, EDGARD DEGRYZE^{2,b}, KATIUSKA ALVARADO^{2,c}

¹DEPARTAMENTO DE CÓMPUTO CIENTÍFICO Y ESTADÍSTICA, UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR, CARACAS, VENEZUELA

²CENTRO DE ESTADÍSTICA Y SOFTWARE MATEMÁTICO, UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR, CARACAS, VENEZUELA

Resumen

En este artículo se analizan los datos de 113 estaciones de precipitación mensual disponibles para años recientes en Venezuela. Los datos provienen de la red de estaciones climáticas de la Corporación Venezolana de Guayana-Electrificación del Caroní (CVG-EDELCA), la Fuerza Aérea Venezolana (FAV) y el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN). Se hace un análisis de homogeneidad utilizando la prueba de Alexandersson (Alexandersson 1986) para determinar si existen estaciones con cambios importantes en la media de la serie que no forman parte de la variabilidad climática interanual. Se ajustan modelos lineales con componente de tendencia, estacionalidad y errores autorregresivos utilizando el método de mínimos cuadrados generalizados. Se comparan distintos modelos para determinar si el componente de tendencia debe o no debe ser incluido en el modelo así como la representación del componente estacional con uno o dos armónicos, para describir el comportamiento unimodal o bimodal de la precipitación a lo largo del año. Se utiliza el criterio de información bayesiana (CIB) para la selección de los modelos propuestos. Los valores de tendencia estimados y la significancia del componente de tendencia son representados espacialmente. Se encuentra que la zona norte costera y la mayor parte de la región andina presentan una tendencia negativa en la precipitación. Por el contrario, la zona sureste del estado Bolívar presenta una tendencia positiva. Sin embargo, el componente de tendencia no es significativo para la mayoría de las estaciones. Además, el patrón estacional está mejor representado por un modelo con dos armónicos, dadas las características estacionales de las estaciones analizadas.

Palabras clave: precipitación mensual, tendencia, estacionalidad, selección de modelos, series de tiempo.

^aProfesor titular. E-mail: lbravo@cesma.usb.ve

^bAsistente de investigación. E-mail: edgardegryze@cesma.usb.ve

^cEstudiante de maestría. E-mail: katiuska@cesma.usb.ve

Abstract

This paper analyzes data from 113 Venezuelan monthly precipitation stations for recent years. The data come from the climatic network from the Venezuelan Guayana Corporation- Caroni Electrification (CVG-EDELCA), the Venezuelan Air Force (FAV), and the Ministry of Environment and Natural Resources (MARN). An homogeneity test is carried out by using Alexandersson's test (Alexandersson 1986) to detect locations with important changes in the mean, which are not part of the natural climate variability. Linear models with a trend component, a seasonal component and autoregressive errors are fitted by using Generalized Least Squares. Different models are compared to determine whether the trend component should be included within the model, as well as the seasonal component with one or two harmonics, depending on whether the precipitation presents a single or two modes along the year. The Bayesian Information Criteria (BIC) is used for model selection. The estimated trend values and the significance of the trend component are spatially represented. It is found that in the northern coastal region and most of the Andean region precipitation trends are negative. On the contrary, southeast of Bolívar state presents a positive trend. However, the model trend component is not significant for most locations. Moreover, the seasonal pattern is best represented with a model with two harmonics, given the seasonal characteristics of the analyzed locations.

Key words: Monthly precipitation, Trend, Seasonality, Selection of models, Time series.

1. Introducción

El análisis de los cambios en la precipitación a distintas escalas espaciales y temporales es un tema de suma importancia para Venezuela y para el nivel global (De Luis et al. 2000, González-Hidalgo et al. 2001, Martelo 2004). La precipitación es un componente fundamental del sistema climático; en los actuales momentos existe un amplio consenso sobre la necesidad de profundizar el conocimiento sobre su variabilidad espacial y temporal dentro del contexto del cambio climático global (Solomon et al. 2007, p. 996).

En el nivel nacional, la caracterización de la precipitación representa un papel fundamental en el comportamiento de los sistemas agroecológicos del país, en la dinámica de ciertas enfermedades endémicas como la malaria y el dengue, y en la distribución espacial y la frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos, causantes de deslaves e inundaciones.

Una de las limitaciones de muchos países, incluido Venezuela, para profundizar en estos análisis es la disponibilidad de datos climáticos de buena calidad, en particular datos de precipitación en forma de series de tiempo de larga duración (al menos de 20 años) y con una distribución espacial que permita analizar simultáneamente el problema de la variabilidad temporal y espacial para todo el país.

En Venezuela existen varias instituciones que mantienen redes de estaciones meteorológicas e hidrométricas. Entre ellas podemos mencionar: Ministerio del

Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN), con la red más extensa; Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), que mantiene una red al servicio de las ciencias agrícolas y la actividad agropecuaria nacional; Corporación Venezolana de Guayana y Electrificación del Caroní (CVG-EDELCA), con una red de estaciones hidrometeorológicas mayormente localizadas en el estado Bolívar, cuyo fin primordial es la cuantificación de los recursos hídricos de la zona; las Fuerzas Aéreas Venezolanas (FAV), que mantienen la red nacional más importante al servicio de la aviación venezolana; y la Armada Venezolana, cuya red de estaciones sirve a la navegación. En el caso de la precipitación, en el país se dispone de alrededor de unas 1200 estaciones, muchas de las cuales no operan en la actualidad.

En este artículo se pretende estimar simultáneamente la tendencia y la estacionalidad para un conjunto de estaciones de precipitación de la red de meteorológica nacional. La mayoría de las estaciones consideradas tienen datos de precipitación mensual hasta 1999; en cuanto a la distribución espacial, muchas se encuentran en la parte norte del río Orinoco.

En la sección 2 se describe el conjunto de estaciones seleccionadas de la red climatológica nacional, se explican los criterios de calidad utilizados para manipular los datos y se describen las pruebas de homogeneidad aplicadas a las series de tiempo para asegurar que los datos de las estaciones utilizadas cumplan las condiciones de homogeneidad requeridas. En la sección 3 se presenta una descripción de los modelos utilizados para representar la tendencia y la estacionalidad de las series analizadas. Los resultados obtenidos en el proceso de selección de modelos y estimación de parámetros son presentados en la sección 4. Estos resultados son discutidos en la sección 5, en la que también se presentan las consideraciones finales de este trabajo, así como las posibles extensiones del mismo.

2. Descripción de los datos y control de calidad de la información

2.1. Estaciones seleccionadas para el análisis

El área de estudio comprende todo el territorio nacional, como se indica en la figura 1. Para el análisis planteado en esta investigación, se utilizaron datos de un total de 113 estaciones climatológicas. Las estaciones climatológicas forman parte de la red de estaciones del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN), la Fuerza Aérea Venezolana (FAV) y CVG- Electrificación del Caroní (CVG-EDELCA). De estas 113 estaciones, 77 se encuentran ubicadas al norte del Orinoco con 49 años de registro (1950-1998); 36 estaciones al sur del Orinoco, de las cuales 18 tienen 30 años de registro (1969-1998). El resto posee datos entre 1921 y 2002. En la figura 11 se muestra la distribución espacial y los nombres del total de estaciones utilizadas en el análisis. Puede observarse que las estaciones no están uniformemente distribuidas, siendo las zonas de los Llanos, cordillera de Perijá, sur del Lago de Maracaibo y el delta del Orinoco las menos representadas. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), para el reporte de datos mensuales

de variables meteorológicas de superficie, cada 250000 kilómetros cuadrados deben estar representados por al menos una estación meteorológica. Sin embargo, la densidad idónea de la red de estaciones dependerá del tipo de terreno y de la cobertura superficial del área de estudio. Lo ideal es que cada tipo de cobertura (bosques, zonas urbanas, zonas agrícolas, etc.) esté representada por un número adecuado de estaciones (World Meteorological Organization 2007). En el Apéndice A (tabla 2) se presenta la lista de estaciones, se indica su ubicación geográfica (latitud, longitud y altura) y el serial que las identifica.

2.2. Control de calidad y tratamiento de los datos faltantes, datos acumulados y datos dudosos

Para el ajuste de los modelos estadísticos propuestos, se utilizan las series de datos mensuales de precipitación. Para algunas de las estaciones, se dispone de información diaria; para otras localidades, se dispone de información a nivel mensual.

Los datos analizados presentan muchos problemas de calidad, entre los cuales podemos mencionar:

- Estaciones con datos registrados utilizando distintas tecnologías de medición; por ejemplo, estaciones automáticas con transmisión satelital (GOES) y sistema digital (SD), y estaciones tradicionales (medición a través de pluviómetros). Este es el caso de muchas de las estaciones de CVG-EDELCA, para las cuales hubo un cambio de tecnología de medición y transmisión de la información debido al proceso de modernización de la red de estaciones de la empresa.
- Estaciones con datos faltantes, para los cuales no se dispone de ningún registro.
- Estaciones con datos acumulados, en los que existen muchos registros diarios que son la suma de cierto número de registros precedentes cuyo valor se desconoce.
- Estaciones con datos estimados, para las cuales no se conoce el método de estimación.

En el caso de las estaciones de CVG-EDELCA para las cuales se dispone de más de un tipo de registro en una localidad, se procedió a unificar las series de datos siempre y cuando se dispusiera de al menos un año de registro común a ambas tecnologías. También se verificó que la diferencia entre las observaciones para el periodo de registro común fuese de menos de 15 mm en más del 90 % de los casos. Solo con esta condición se procedió a unificar las series de datos. Para que una estación pueda ser incluida en el análisis, debe tener por lo menos 10 años de datos con un máximo de 20 % de datos faltantes.

Los datos diarios, los datos acumulados y los datos estimados (o dudosos) se trataron como datos faltantes. Algunos de estos datos fueron sustituidos utilizando el siguiente criterio: para los meses que tenían a lo sumo cinco datos diarios

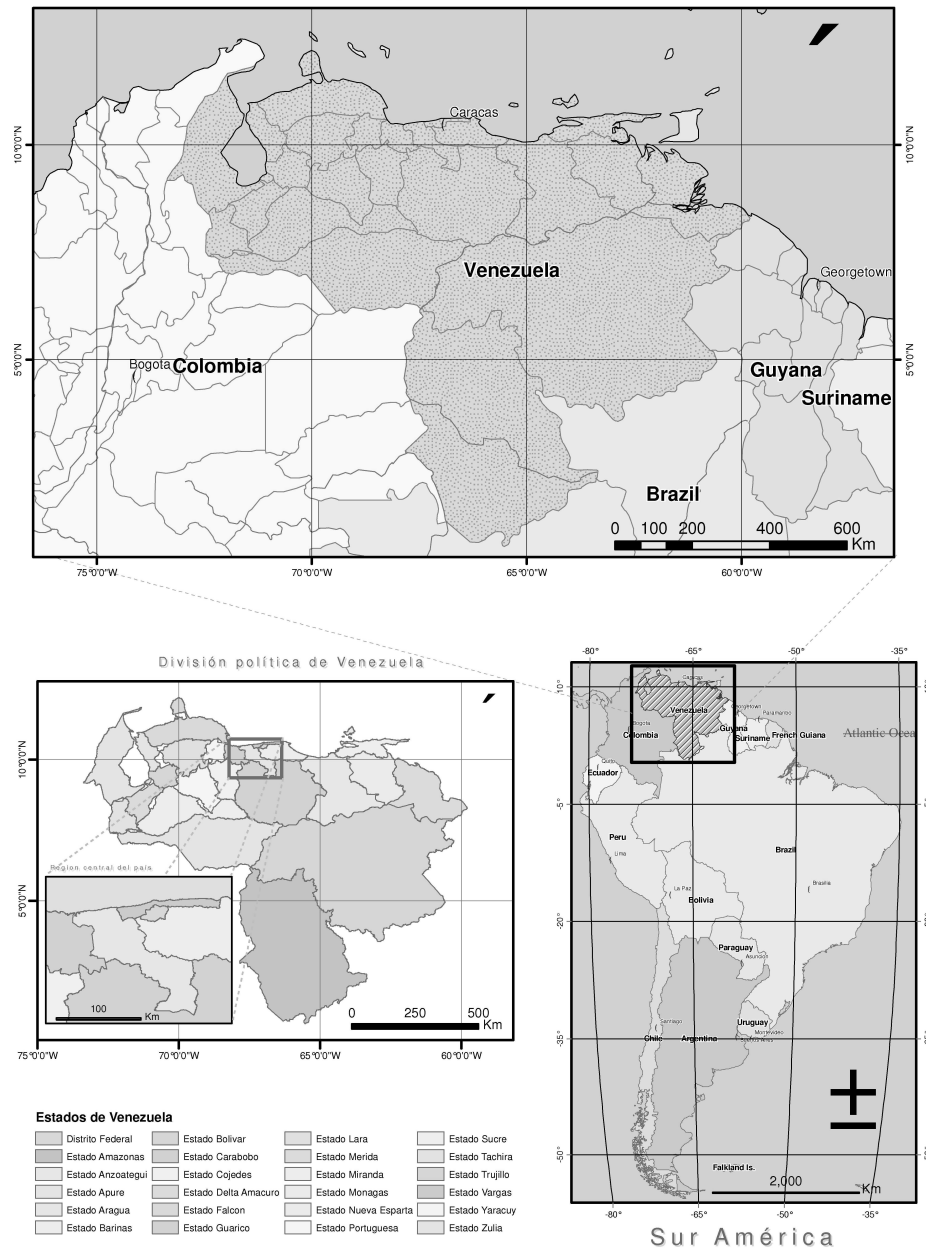


FIGURA 1: Localización de la zona de estudio.

faltantes, fueron completados con el promedio diario de por lo menos 10 años de registro del mismo mes y del mismo día. En el Apéndice A (tabla 2) se muestra una lista del número de estaciones y el porcentaje de datos utilizados en el análisis para cada estación.

En el caso de los datos mensuales, los datos faltantes fueron completados utilizando solo el promedio mensual de los años de registro, calculado a partir de al menos 10 años de datos históricos.

Es de notar que el procedimiento para la estimación de datos faltantes es heurístico. Existen en la literatura procedimientos óptimos para la estimación de datos faltantes y programas computacionales como el TSW-*TRAMO-SEATS for Windows* (Caporello & Maravall 2004), basado en la metodología de Gómez & Maravall (1994). Dado que este no es el tema central del trabajo, se consideró el uso de estrategias más sencillas para facilitar el análisis de las pruebas de homogeneidad, de tendencia y de estacionalidad, las cuales se describen en las siguientes secciones.

2.3. Pruebas de homogeneidad

Antes de iniciar un estudio de las tendencias de la precipitación en una región dada, es necesario asegurarse de que los cambios observados en la media se deban a la dinámica natural del clima. Una serie climática puede dejar de ser homogénea si la estación de medición ha sufrido cambios de instrumentos, cambios de emplazamiento o cambios de observador o de entorno (Saladié et al. 2005). Los registros climáticos son especialmente sensibles a estos tipos de cambios; por tanto, es necesario contar con una técnica que permita comprobar esta hipótesis. Una manera de verificar esta propiedad es confirmando si los cambios observados en una serie candidato también son registrados en una estación de referencia cercana. La prueba más conocida para este tipo de análisis es la SNHT (*Standard Normal Homogeneity Test*), desarrollada por Alexandersson (1986) y aplicada por primera vez a datos de precipitación del suroeste de Suecia. Para las series de precipitación mensual, la prueba se aplica a los registros anuales de un mes particular o a los registros anuales de las series, los cuales se obtienen al sumar los valores mensuales de cada año. La prueba de Alexandersson ha sido aplicada en Venezuela por Quintana-Gómez (1999) para datos de temperatura máxima y mínima.

El primer paso en el análisis es escoger un conjunto de estaciones de referencia. En este caso se seleccionaron las estaciones de la Fuerza Aérea Venezolana, consideradas las estaciones de referencia nacional, ya que forman parte de la red de estaciones de reporte diario a la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Una lista de estas estaciones se presenta en el Apéndice A (tabla 2) de este artículo. Una vez escogidas las series de referencia se aplica la prueba estimando una serie de cocientes $\{q_i\}_{i=1}^N$ entre el valor observado de la serie a la cual se aplica la prueba y el valor obtenido de una o más estaciones de referencia. El valor observado se compara con las estaciones de referencia disponibles para el estado donde se encuentra ubicada la estación candidata. En este caso se asume que las estaciones situadas en un mismo estado tienen un régimen de precipitación cuyos cambios de media, en caso de estar presentes, también estarán presentes en la estación de referencia considerada. Luego se estima la serie estandarizada de cocientes $\{z_i\}_{i=1}^N$, para la cual

$$z_i = (q_i - \bar{q})/s_q$$

donde \bar{q} y s_q son la media y desviación estándar muestral de la serie q_i .

Sea $1 \leq \nu < N$ y $\mu_1 \neq \mu_2$, donde N es el número de años de datos disponibles. Se desea probar la hipótesis nula:

$$H_0 : z_i \sim N(0, 1) \quad \forall i$$

con respecto a la hipótesis alternativa:

$$\begin{aligned} H_1 : z_i &\sim N(\mu_1, 1) & i \leq \nu \\ z_i &\sim N(\mu_2, 1) & i > \nu \end{aligned}$$

La hipótesis nula implica que la media de la serie estandarizada z_i no cambia con el tiempo, mientras que la hipótesis alternativa indica que para algún tiempo ν existe un cambio en la media de la serie.

El estadístico de prueba para determinar si existe un cambio en la media de la serie z_i es

$$T_0 = \max_{1 \leq \nu < N} \{T_\nu\}$$

donde

$$T_\nu = \nu \bar{z}_1^2 + (N - \nu) \bar{z}_2^2$$

\bar{z}_1 y \bar{z}_2 son las medias muestrales de los primeros ν y últimos $(N - \nu)$ valores de la serie z_i . Si T_0 es mayor que cierto nivel crítico para determinado nivel de significancia de la prueba, por ejemplo, del 95 %, se rechaza la hipótesis nula de homogeneidad de la serie. En la tabla 1 se muestran los valores críticos para la prueba con $\alpha = 0.05$ y $\alpha = 0.10$, según Alexandersson (1986), para distintos valores de N , que es la longitud de la serie.

TABLA 1: Valores críticos de la prueba de Alexandersson para $\alpha = 0.10$, $\alpha = 0.05$ y distintos valores de N .

N	T90 %	T95 %	N	T90 %	T95 %
25	6.55	7.75	400	8.70	10.00
50	7.25	8.55	450	8.75	10.10
75	7.65	8.95	500	8.85	10.20
100	7.80	9.15	550	8.90	10.25
150	8.05	9.35	600	8.95	10.30
200	8.20	9.55	650	8.95	10.40
250	8.35	9.70	700	9.00	10.45
300	8.50	9.80	750	9.05	10.50
350	8.60	9.90	800	9.05	10.50

Una manera más general de construir la serie de cocientes $\{q_i\}_{i=1}^N$ es definiendo q_i como

$$q_i = \frac{S_{i0}}{f(S_{ij})}$$

donde S_{i0} es el valor de la serie a la cual se aplicará la prueba, y esta se indica con el valor 0; $f(S_{ij})$ es una función del valor de la serie de la estación de referencia j . También se pueden definir los cocientes q_i para el año i normalizando previamente por la media muestral:

$$q_i = \frac{S_{i0}/\bar{S}_0}{f(S_{ij})/\bar{S}_j}$$

La función f puede definirse como la media muestral de las k estaciones de referencia:

$$f(S_{ij}) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k S_{ij}$$

Otra forma de definir esta función es utilizando el coeficiente de correlación entre la estación 0 y la estación j para $j = 1, \dots, k$. En este caso,

$$f(S_{ij}) = \frac{\sum_{j=1}^k S_{ij} \rho_j^2}{\sum_{j=1}^k \rho_j^2}$$

donde ρ_j es el coeficiente de correlación entre S_{i0} y S_{ij} . Se asume que este valor decrece con la distancia l_j que separa a ambas estaciones de modo que

$$\rho_j = \exp(-\lambda l_j)$$

donde λ se estima a partir de los datos. Para la aplicación de este último criterio, se necesitan al menos dos estaciones de referencia.

En resumen, se utilizan tres estrategias para aplicar la prueba de Alexandersson, dependiendo del método seleccionado para calcular los cocientes q_i : una en la que los cocientes se calculan sin normalizar por la media muestral ($T_{\nu 1}$); otra en la que los cocientes se normalizan por la media muestral ($T_{\nu 2}$) y una tercera en la que los cocientes utilizan la correlación entre la estación de referencia y la estación de prueba ($T_{\nu 3}$).

La prueba de homogeneidad de Alexandersson fue aplicada a 60 de las 113 estaciones debido a que no para todas las estaciones existe una estación de referencia de la FAV, localizada en el estado donde se ubica cada estación. De estas 60 estaciones, 44 se compararon con solo una estación de referencia, mientras que las 16 estaciones restantes, todas ubicadas en el estado Bolívar, se compararon con dos estaciones de referencia: la estación Ciudad Bolívar y la Santa Elena. Los resultados de esta prueba indican que 8 de las 60 estaciones fueron no homogéneas en un nivel de significancia del 5%; en consecuencia, se eliminaron del resto del análisis (tabla 2). Antes de la aplicación de la prueba se comprobó la hipótesis de normalidad de los cocientes q_i mediante un gráfico cuantil-cuantil que compara los cuantiles de cada una de las series de cocientes con los cuantiles teóricos de una distribución normal. Para dos de las 60 localidades (estaciones 1516 y 5924), no se pudo asumir la normalidad de los cocientes resultantes; por tanto no se aplicó la prueba en esos casos.

Ejemplos de la aplicación de la prueba de Alexandersson para tres localidades utilizando los tres criterios mencionados anteriormente para calcular los cocientes q_i se presentan en las figuras 2, 3 y 4 para las estaciones Arekuna (estado Bolívar), Uriman (estado Bolívar) y Sitio Oropeza (estado Miranda), respectivamente.

Puede observarse que mientras las estaciones Arekuna y Uriman (estado Bolívar) resultan homogéneas por cualquiera de los tres criterios descritos, la estación Sitio Oropeza (estado Miranda) resulta no homogénea con un cambio importante en la media en 1983. En este caso solo pueden aplicarse los criterios 1 y 2, ya que

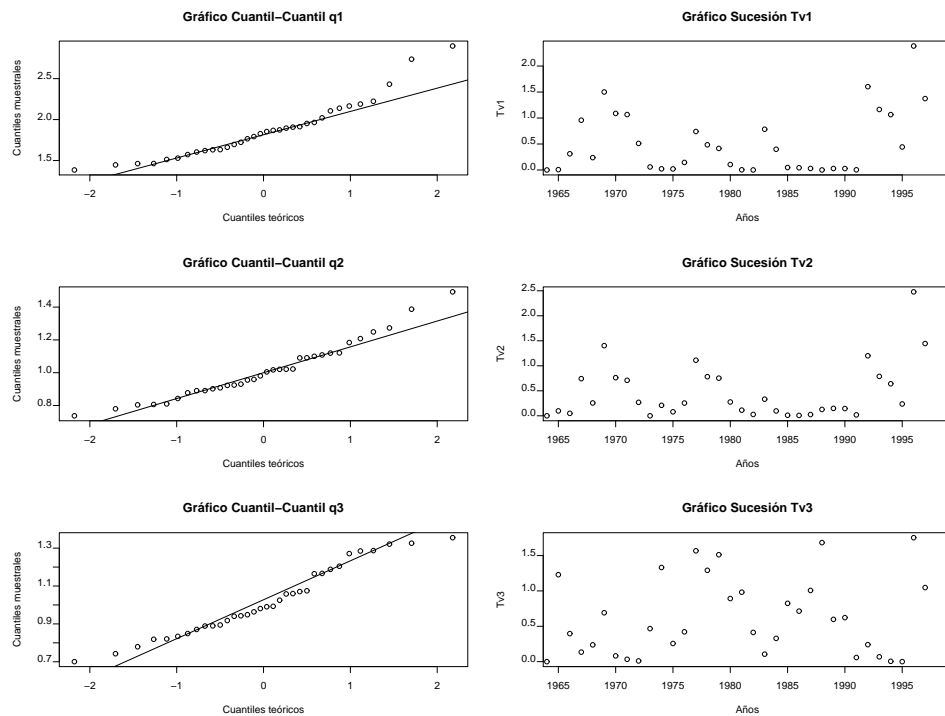


FIGURA 2: Gráficos cuantil-cuantil de comparación de los cocientes de la prueba de Alexandersson con los cuantiles de una distribución normal y valores de los cocientes vs. año para la estación *Arekuna*.

únicamente se cuenta con una estación de referencia en el estado Miranda, la de Cajigal, y se necesitan al menos dos estaciones de referencia para la aplicación del criterio 3.

3. Descripción de los modelos ajustados

La gráfica de una serie de tiempo permite observar el comportamiento de la misma en un periodo determinado; de esta manera se establecen visualmente ciertas características como la presencia o no de periodos cíclicos (ciclos estacionales) o de posibles cambios en la tendencia de la serie. En la figura 5 se presentan las series de precipitación mensual para algunas estaciones seleccionadas. Se observa un patrón cíclico en toda su extensión, algunos valores extremos que indican niveles de precipitación elevados no muy frecuentes en la estación. Además, en algunas gráficas, los valores promedios parecen aumentar con el tiempo, como en la estación Cajigal, o disminuir con el tiempo, como en la estación Santa Inés.

Otra manera eficaz de observar los ciclos estacionales predominantes en una serie de precipitación es usando los diagramas de caja, los cuales proveen también valiosa información acerca del mes o los meses en que ocurren las observaciones extremas.

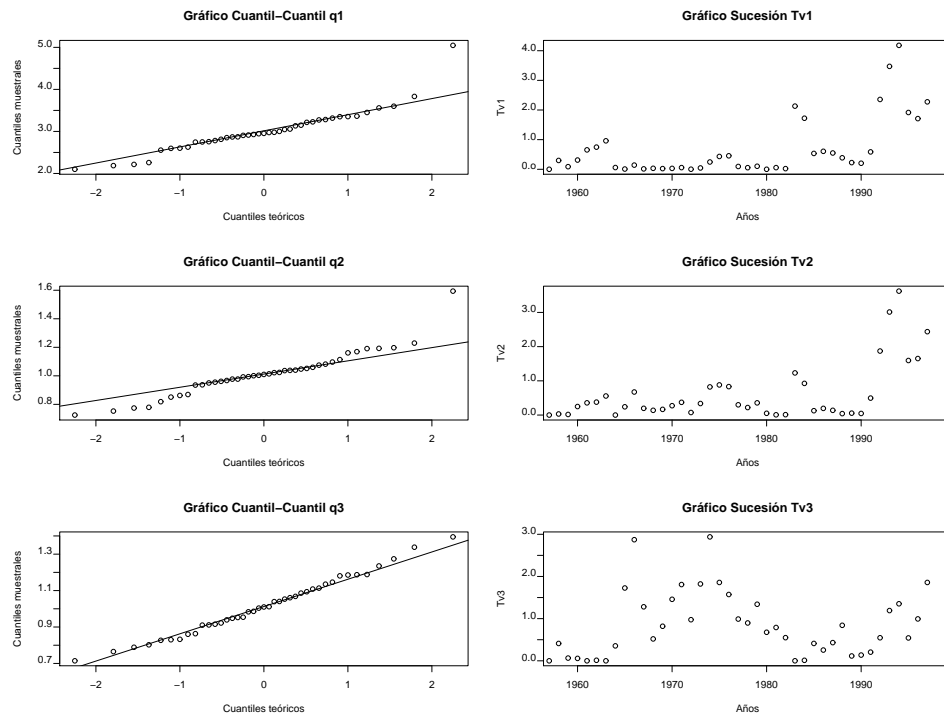


FIGURA 3: Gráficos cuantil-cuantil de comparación de los cocientes de la prueba de Alexander con los cuantiles de una distribución normal y valores de los cocientes vs. año para la estación *Uriman*.

En la figura 6 se muestran seis estaciones con sus respectivos diagramas de caja mensuales. En estos se puede observar claramente la presencia de un ciclo anual con un máximo bien definido en las estaciones Rancho Grande, Santa Inés y Kavanayén, y dos máximos anuales en las estaciones Cajigal, Villa del Rosario y Santa Elena.

En términos generales se puede observar que en Venezuela existen dos tipos de ciclos: uno unimodal y otro bimodal. Para las estaciones con ciclo unimodal, los niveles pluviométricos más altos ocurren en junio, julio y agosto, excepto en la estación Coro-Aeropuerto, donde el máximo ocurre en noviembre. Para las estaciones con ciclo bimodal, los valores máximos ocurren de abril a mayo o de septiembre a octubre.

A partir de los análisis gráficos obtenidos, las series de precipitación mensual de Venezuela pueden ser representadas matemáticamente por un modelo de la forma

$$Y_t = T_t + S_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

donde Y_t representa la precipitación mensual en el mes t ; T_t representa el componente de tendencia y S_t representa el componente estacional y ε_t representa el componente de error en el tiempo t .

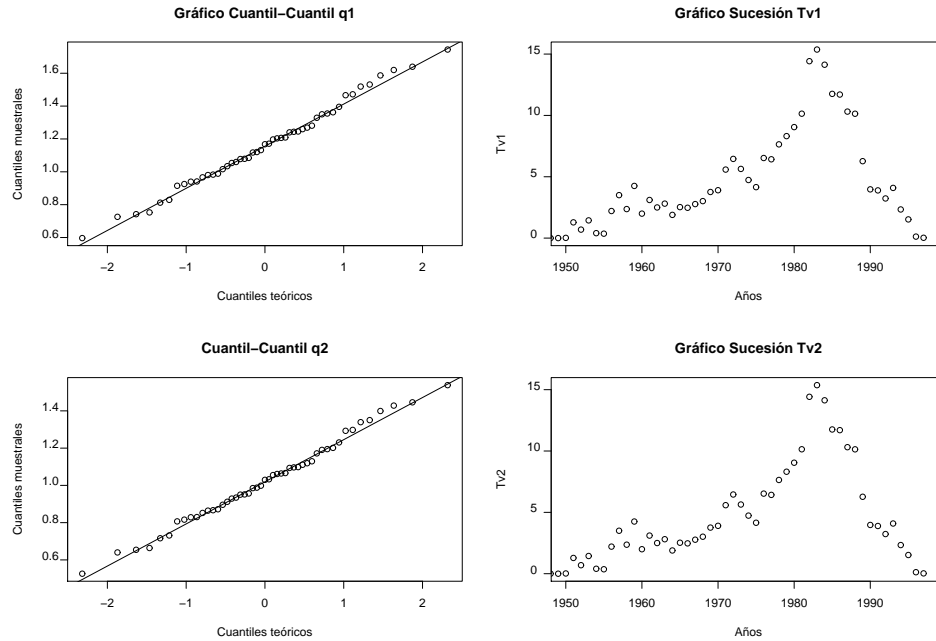


FIGURA 4: Gráficos cuantil-cuantil de comparación de los cocientes de la prueba de Alexander con los cuantiles de una distribución normal y valores de los cocientes vs. año para la estación *Sitio Oropeza*.

Usualmente se asume que ε_t es una secuencia independiente y tiene una distribución normal con media cero y varianza constante σ^2 .

En el modelo (1) se asume que el componente T_t tiene la forma

$$T_t = \alpha + \beta t$$

donde α es el intercepto de la serie, y el parámetro β representa la pendiente o tendencia del proceso.

El componente $S(t)$ se asume de la forma

$$S_t = \sum_{k=1}^2 A_k \cos(2\pi kt/12 + \phi_k)$$

que representa un polinomio de Fourier con dos armónicos con periodos 12 y 6, respectivamente, donde A_k es la amplitud y ϕ_k es la fase del k -ésimo armónico.

S_t también puede escribirse como un modelo de la forma

$$S_t = \gamma_1 \cos(2\pi t/12) + \delta_1 \sin(2\pi t/12) + \gamma_2 \cos(4\pi t/12) + \delta_2 \sin(4\pi t/12)$$

donde γ_i y δ_i son los coeficientes que deben estimarse.

En el proceso de estimación del modelo propuesto, es de suma importancia determinar la significancia estadística de los parámetros que definen T_t y S_t . Si

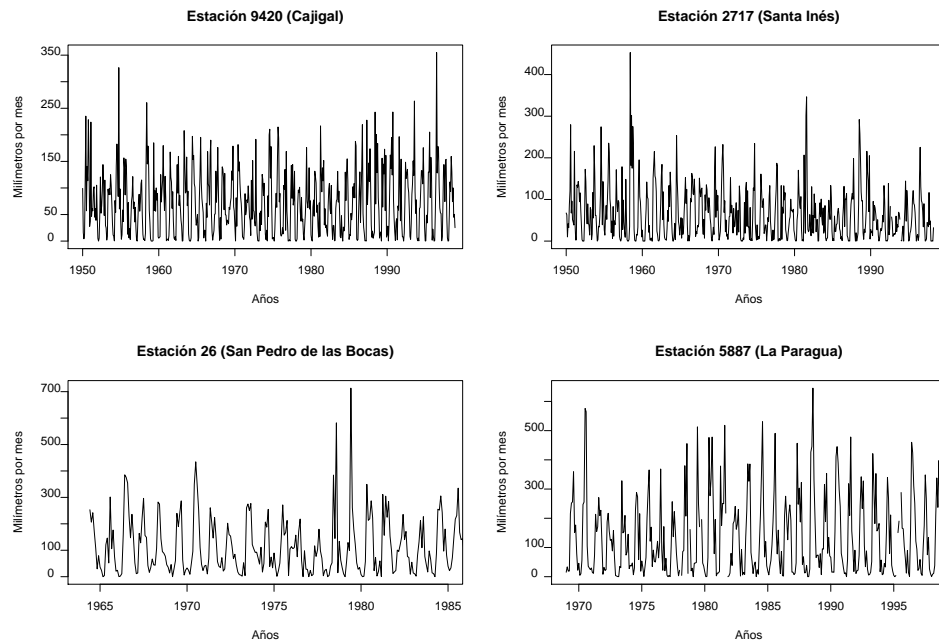


FIGURA 5: Series de tiempo de precipitación mensual para cuatro estaciones seleccionadas.

los errores ε_t no son independientes y están autocorrelacionados, los estimadores de mínimos cuadrados de los parámetros que definen T_t y S_t tendrán una menor varianza, lo cual implica que aumenta la probabilidad de cometer un error tipo I en la prueba de significancia t -Student. Este problema es muy común cuando se intenta aplicar métodos de pruebas de hipótesis estándar a series climáticas u otras series de datos geofísicos (Wilks 1997).

Al ajustar el modelo lineal (1) se verificó la presencia o no de correlación serial de los residuales, utilizando el correlograma de los residuos del modelo ajustado por mínimos cuadrados ordinarios a cada una de las series de precipitación. En la figura 7 se presentan los correlogramas para algunas de las series analizadas.

Estos correlogramas muestran que, por ejemplo, los residuales del modelo (1) de la serie de precipitación correspondientes a la estación Villa del Rosario no parecen estar autocorrelacionados, ya que los coeficientes de autocorrelación para todos los retardos se encuentran por debajo de los límites de significancia. En cambio, para las estaciones 60, 2172 y 2911, la autocorrelación serial es significativa, ya que al menos el coeficiente de autocorrelación para el primer retardo sobrepasa los límites de significancia.

Con base en estos resultados se modifica el modelo (1), considerando uno autorregresivo de orden p ($AR(p)$) para los residuales de la forma

$$\varepsilon_t = \sum_{i=1}^p \phi_i \varepsilon_{t-1} + \xi_t$$

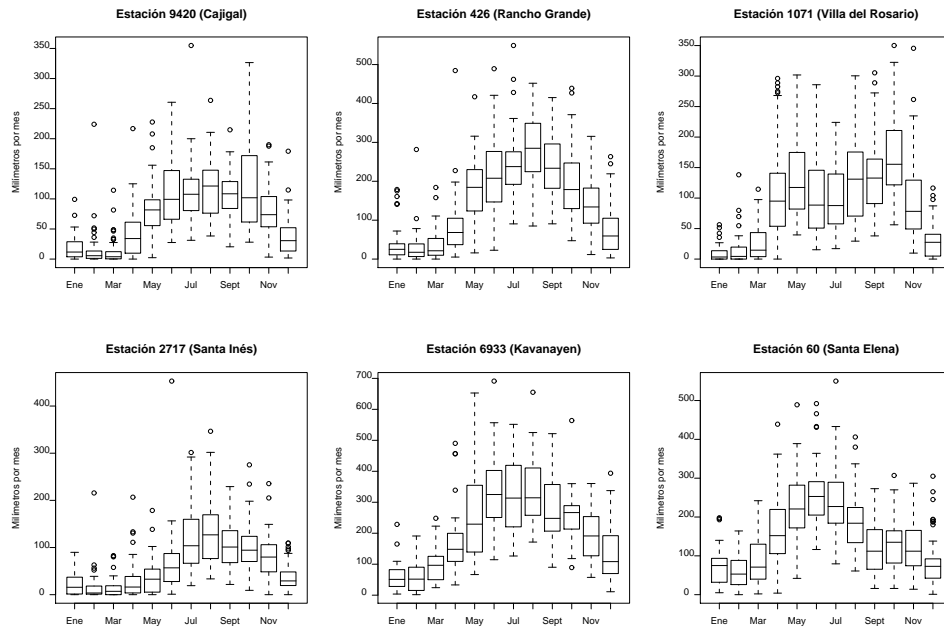


FIGURA 6: Boxplots mensuales para seis estaciones seleccionadas.

donde p es el orden del modelo autorregresivo y ξ_t es un componente de ruido blanco. La presencia de un componente autorregresivo es una característica muy común del comportamiento de muchas variables meteorológicas. Por ejemplo, el modelo AR(1) explica adecuadamente las variaciones de baja frecuencia que exhibe el sistema climático (Zwiers & Von Storch 1995) y puede ser necesario utilizar modelos de mayor orden ($p > 1$) cuando se requiere una modelación más precisa de las variables meteorológicas.

Utilizando un proceso de selección de modelos es posible considerar distintas formas de representar el comportamiento de la precipitación mensual de Venezuela a través de los siguientes modelos:

- Modelo 1: Modelo con tendencia y un armónico

$$Y_t = \alpha + \beta t + \gamma_1 \cos(2\pi t/12) + \delta_1 \sin(2\pi t/12) + \varepsilon_t$$

- Modelo 2: Modelo con tendencia y dos armónicos

$$Y_t = \alpha + \beta t + \gamma_1 \cos(2\pi t/12) + \delta_1 \sin(2\pi t/12) + \gamma_2 \cos(4\pi t/12) + \delta_2 \sin(4\pi t/12) + \varepsilon_t$$

- Modelo 3: Modelo sin tendencia y un armónico

$$Y_t = \alpha + \gamma_1 \cos(2\pi t/12) + \delta_1 \sin(2\pi t/12) + \varepsilon_t$$

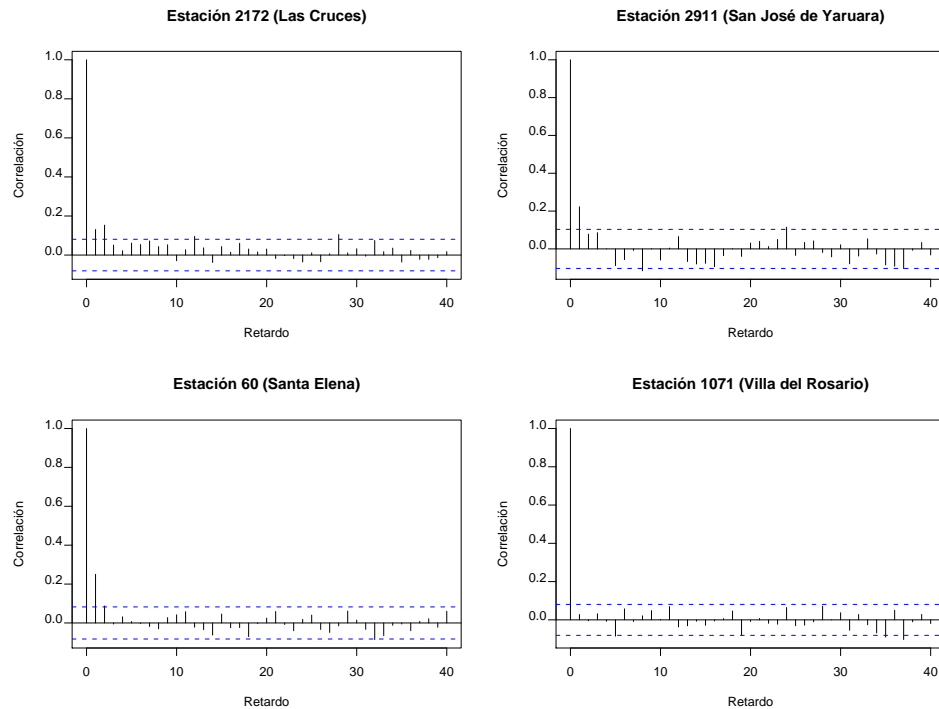


FIGURA 7: Correlogramas de los residuales del modelo 1 para cuatro estaciones seleccionadas.

- Modelo 4: Modelo sin tendencia y dos armónicos

$$Y_t = \alpha + \gamma_1 \cos(2\pi t/12) + \delta_1 \sin(2\pi t/12) + \gamma_2 \cos(4\pi t/12) + \delta_2 \sin(4\pi t/12) + \varepsilon_t$$

donde ε_t es un proceso autorregresivo de orden p .

En la primera etapa, el modelo (1) con componente de tendencia y estacionalidad se ajusta por mínimos cuadrados ordinarios para cada localidad. Luego se estiman los residuales del modelo ajustado; el orden p del componente autorregresivo para los residuales del modelo se estima utilizando el criterio CIB de comparación de modelos. Una vez determinado el orden p , se reajustan los modelos 1 a 4 con residuales $AR(p)$ utilizando Mínimos Cuadrados Generalizados mediante la función `gls` de la librería `nlme` de R (R Development Core Team 2007). Se utiliza de nuevo el criterio CIB para seleccionar el mejor modelo en cada caso. Los resultados son presentados en la siguiente sección.

4. Resultados

Los modelos 1 a 4 fueron ajustados a las estaciones de estudio, descartando las estaciones no homogéneas según el criterio de Alexandersson. Los resultados más

importantes tienen que ver con la determinación de la tendencia de la serie y su significancia. En la mayoría de los casos, el mejor modelo seleccionado según el criterio del CIB fue el modelo 4, lo cual implica que la mayoría de las estaciones no presentó un componente de tendencia significativo y el comportamiento estacional puede ser representado con dos armónicos.

En la tabla 3 del Apéndice A se muestran, para cada estación, los coeficientes del modelo ajustado, incluidos el coeficiente de media α , el coeficiente del componente de tendencia β , los coeficientes del componente estacional γ_1 y δ_1 para el primer armónico, y γ_2 y δ_2 para el segundo armónico. También se reportan los valores del criterio CIB para los modelos 1 a 4 y el modelo seleccionado según este criterio. En cada caso se indica la significancia o no del componente de tendencia y del segundo armónico.

Dado que hay un número importante de estaciones analizadas y es de sumo interés determinar la variación del comportamiento espacial de la tendencia nacional, se elaboró un mapa con los valores de tendencia estimados al incluir el componente de tendencia en el modelo. Luego se hizo una interpolación por Kriging utilizando la librería *spatial* de R; posteriormente se empleó el software ArcGIS (ESRI 2006) para la producción del mapa resultante (figura 8). Allí también se indica para cuáles estaciones resultó ser significativo o no el componente de tendencia.

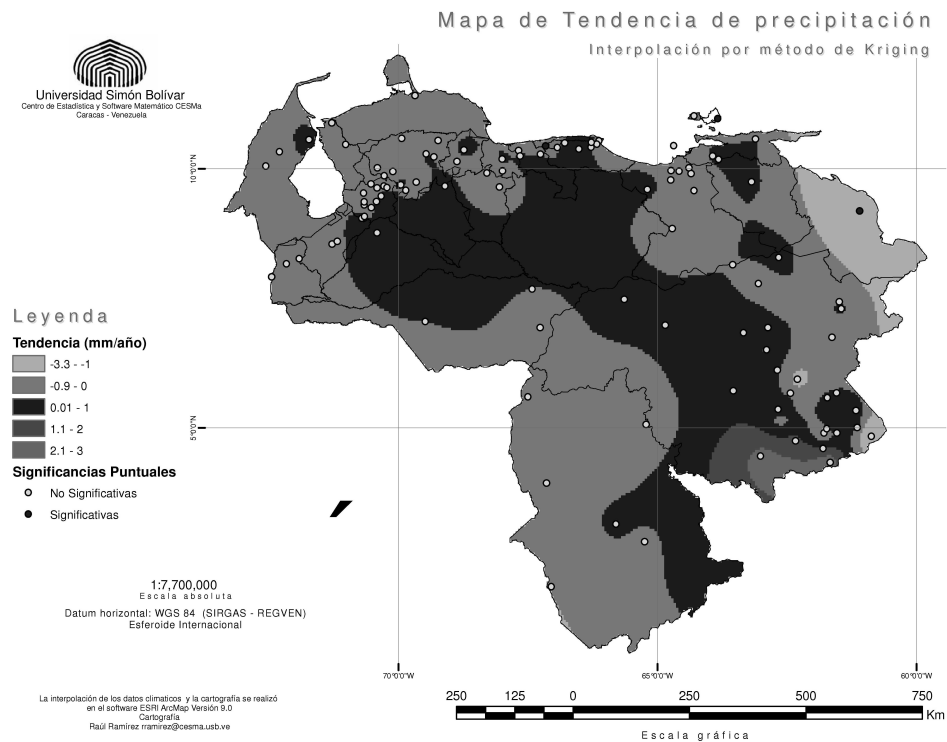


FIGURA 8: Mapa de tendencias de la precipitación en mm por año y significancia del componente de tendencia en el modelo.

De esta gráfica se desprende que la parte norte costera del país presenta una tendencia negativa en la precipitación, al igual que la mayor parte de la zona andina y la parte norte del estado Bolívar y gran parte de los estados Anzoátegui y Monagas. El componente de tendencia fue incluido en el modelo (1) para tres localidades solamente, las cuales se indican en la figura 8. Para la mayoría de las localidades analizadas, el componente de tendencia no resulta estadísticamente significativo, como se señala en la misma figura.

En la figura 9 se muestra el mapa de los errores estándar resultantes de la interpolación por Kriging en mm/año. Efectivamente se observa que los errores de interpolación son más altos en las regiones con poca cobertura de estaciones y en las zonas alejadas de los puntos de medición.

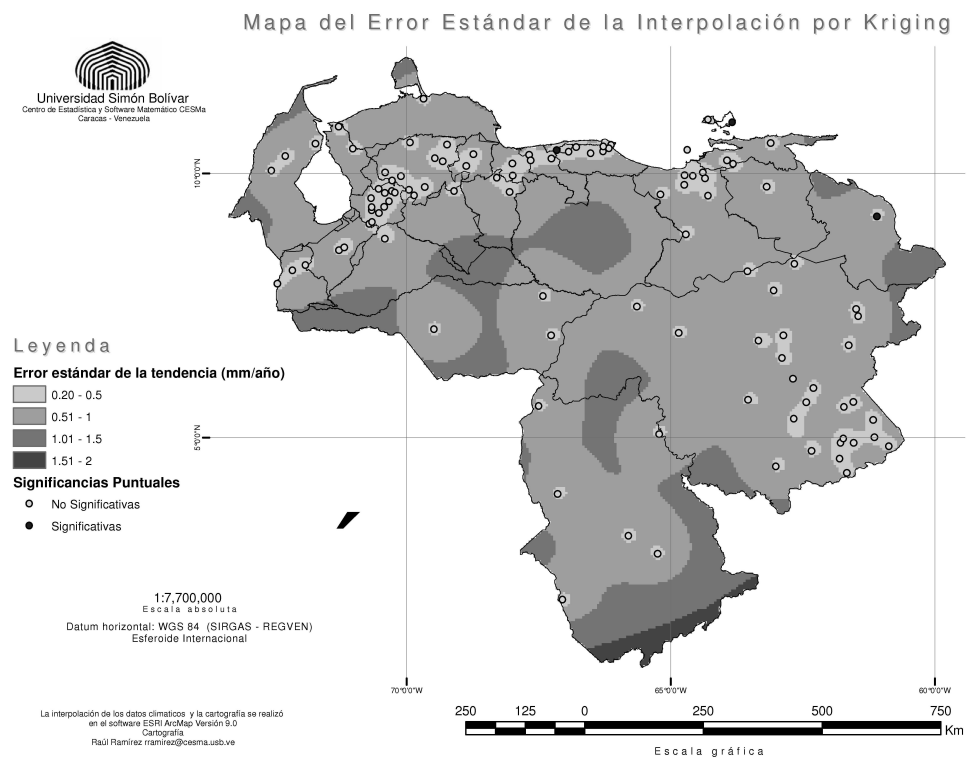


FIGURA 9: Mapa del Error Estándar de las tendencias de la precipitación en mm por año.

El comportamiento unimodal o bimodal y el orden p del componente autorregresivo de las estaciones analizadas también fue representado espacialmente en las figuras 10 y 11.

De los resultados obtenidos se concluye que mensualmente se detecta un régimen bimodal en 39 de las 113 estaciones analizadas, ubicadas mayormente en la región de la cordillera de Los Andes y en el estado Zulia. En el resto de las estaciones (74), el régimen estacional es unimodal, aunque para representarlo sea necesario un componente con dos armónicos, según el criterio CIB de selección de

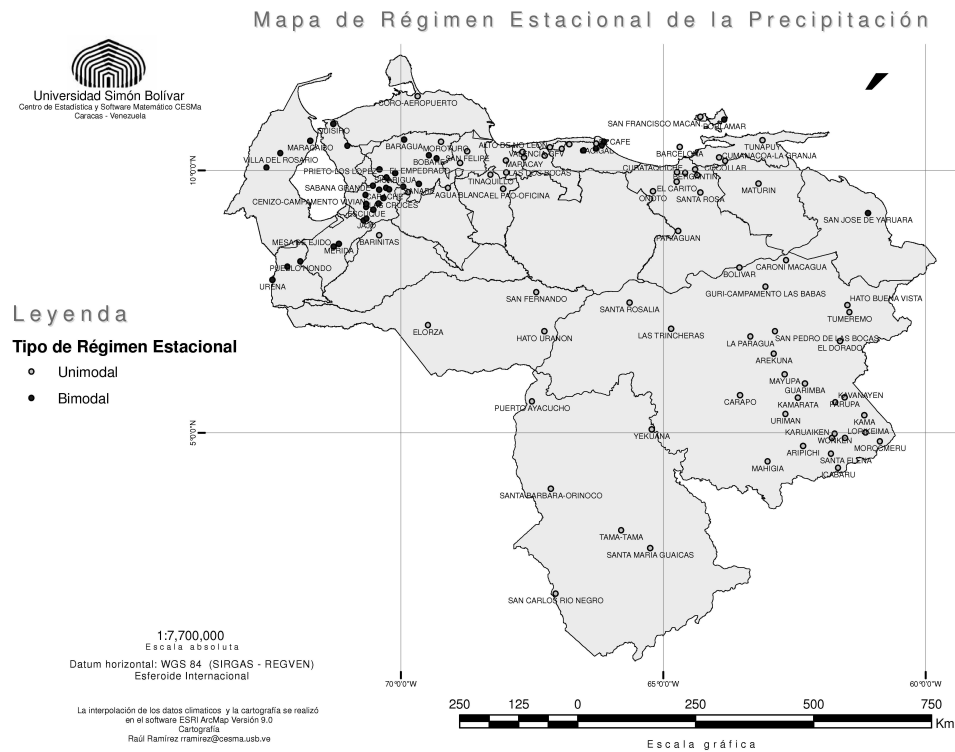


FIGURA 10: Régimen estacional de la precipitación mensual en Venezuela.

modelos. En 85 de las 113 estaciones la amplitud del primer armónico es mayor que la amplitud del segundo; de estas 85, solo 11 presentan un régimen bimodal. Sólo para las estaciones de Cocollar en el estado Sucre, Rancho Grande en el estado Aragua y Puerto Ayacucho en el estado Amazonas, el mejor modelo ajustado resultó el modelo 3 (sin tendencia y con un armónico). El componente autorregresivo de los residuales es de orden 1 para la mayoría de las estaciones a esa escala temporal (nivel mensual).

Los resultados estadísticos que describen la estacionalidad de la precipitación en Venezuela coinciden con las características climáticas de la región. La variabilidad anual de la precipitación en Venezuela está altamente influenciada por las condiciones geográficas dominantes: la presencia de la cordillera de La Costa y su interacción con el mar Caribe; la migración de la Zona de Convergencia Inter-Tropical y los impactos de los frentes fríos de Norteamérica y del Sur (Brasil y Argentina). Al oeste de los 70° W (región Andina y estado Zulia), la mayoría de las estaciones presentan un régimen bimodal que contrasta con el marcado máximo que se observa en julio-agosto en la zona de los Llanos (Poveda et al. 2006). Los máximos bimodales que ocurren en los periodos abril-mayo y septiembre-octubre son altamente afectados por las condiciones orográficas de la región.

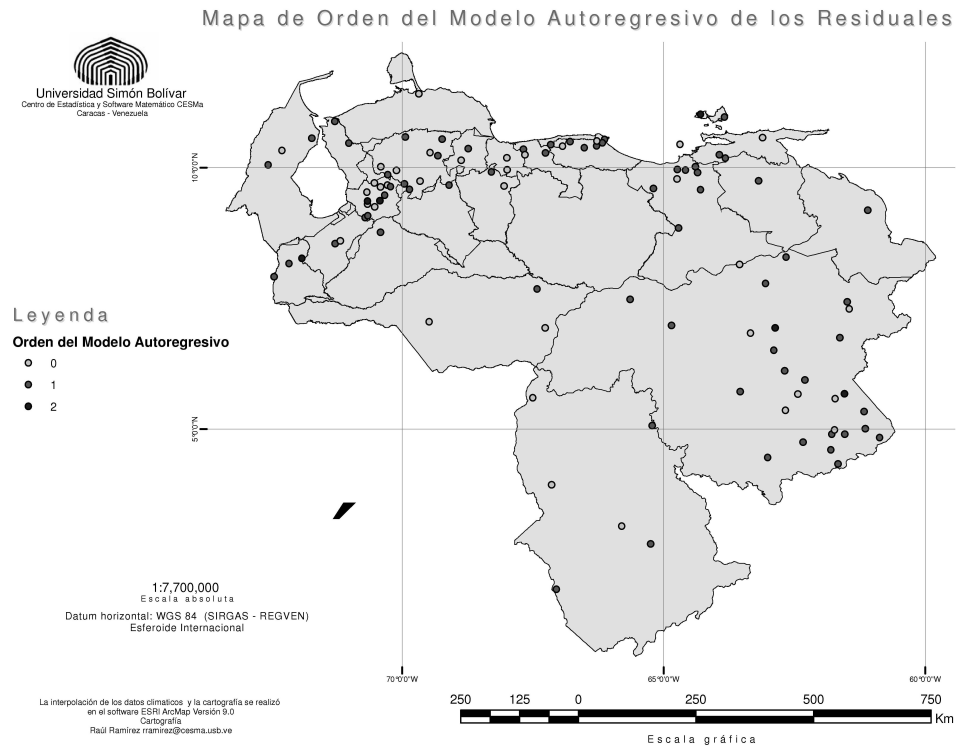


FIGURA 11: Orden del Componente Autorregresivo para el modelo de precipitación mensual en Venezuela.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos representan un primer avance en analizar la situación de la precipitación nacional en años recientes. A pesar de que no se disponen de datos actualizados para todas las estaciones, este artículo pretende consolidar un esfuerzo interdisciplinario sobre la recuperación de los datos históricos del clima nacional, enfocándose en el análisis de la calidad de la información y el resumen de la variabilidad observada.

Aunque el componente de tendencia no sea significativo, los valores obtenidos de pendientes negativas para la zona norte costera están de acuerdo, al menos en signo, con las proyecciones presentadas en la Primera Comunicación Nacional sobre el Cambio Climático (MARN 2005). Los resultados reportados en dicha comunicación son parte de un esfuerzo por entender cómo las condiciones de incremento de gases de invernadero pueden afectar el clima nacional a partir de las proyecciones de los modelos de Circulación General de la Atmósfera. Las proyecciones de algunos modelos sugieren una reducción de hasta el 25 % de la precipitación promedio anual en la zona norte-costera del país para 2060. Los análisis aquí presentados sugieren que si las tasas de disminución de la precipitación (pendientes negativas) observadas en años recientes se mantienen en el futuro, en unos 50 años se proyecta

una reducción de 50 a 100 mm de precipitación anual promedio en la zona norte costera y en gran parte de la región Andina. Sin embargo, en una situación de cambio climático, es posible que estas tasas de cambio disminuyan aún más. Esta situación es preocupante dado que en esta región se ubica el 80 % de la población nacional (Fuente: Instituto Nacional de Estadística, INE, Censo 2001).

Las pendientes negativas también pueden ser una evidencia de una mayor actividad del fenómeno ENSO (El Niño-Southern Oscillation) en años recientes, dado el impacto negativo de la fase caliente de ENSO (El Niño) sobre la precipitación de la región norte de Suramérica (Poveda et al. 2006).

En el análisis presentado se ha asumido una modelación estadística sencilla de las series de tiempo observadas, en la que se consideran cambios estáticos en la tendencia y en los patrones estacionales de la precipitación. Un análisis más completo consideraría modelos dinámicos en los cuales los coeficientes de tendencia y estacionalidad pueden variar con el tiempo. Este análisis estaría enmarcado en la teoría de los modelos lineales dinámicos descrita por West & Harrison (1977). La fortaleza de este nuevo análisis sería describir la variabilidad interanual de los posibles cambios de tendencia, causados por ejemplo por el impacto del evento El Niño-Oscilación Sur (ENOS) en el país. Estos resultados serán reportados en futuras investigaciones.

Agradecimientos

Agradecemos a Jhan Rodríguez y a Raúl Ramírez por su paciente preparación de muchas de las ilustraciones de este trabajo. También agradecemos a la Fuerza Aérea Venezolana, Corporación Venezolana de Guayana-Electrificación del Caroní y el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales por proveer los datos que sirvieron de insumo para este trabajo. Esta investigación fue parcialmente financiada por FONACIT, proyecto 2005-000184, Programa de Apoyo a Grupos.

[Recibido: agosto de 2007 — Aceptado: marzo de 2008]

Referencias

- Alexandersson, H. (1986), 'A Homogeneity Test to Precipitation Data', *Journal of Climatology* **6**, 661–675.
- Caporello, G. & Maravall, A. (2004), *TSW*, Banco de España, Research Department.
*<http://www.bde.es/servicio/software/tramo/tswrm.pdf>
- De Luis, M., Raventós, J., González-Hidalgo, J. C., Sánchez, J. R. & Cortina, J. (2000), 'Spatial Analysis of Rainfall Trends in the Region of Valencia (East Spain)', *International Journal of Climatology* **20**, 1452–1469.
- ESRI (2006), *ArcGIS*, 9.2 edn, Environmental Scientific Research Institute, Redlands, United States.

- Gómez, V. & Maravall, A. (1994), 'Estimation, Prediction and Interpolation for Nonstationary Series with the Kalman Filter', *Journal of the American Statistical Association* **89**, 611–624.
- González-Hidalgo, J. C., De Luis, M., Raventós, J. & Sánchez, J. R. (2001), 'Spatial Distribution of Seasonal Rainfall Trends in a Western Mediterranean Area', *International Journal of Climatology* **21**, 843–860.
- MARN (2005), *Primera comunicación nacional sobre cambio climático en Venezuela. Ministerio del ambiente y los recursos naturales*, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Fondo Mundial para el Medio Ambiente, Caracas, Venezuela.
*http://www.minamb.gob.ve/files/Cambio_Climatico/Primeracomunacional.pdf
- Martelo, M. T. (2004), Consecuencias ambientales generales del cambio climático en Venezuela, Trabajo de ascenso, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Maracay, Venezuela.
- Poveda, G., Waylen, P. & Pulwarty, R. (2006), 'Annual and Inter-annual Variability of Present Climate in Northern South America and Southern Mesoamerica', *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **234**(1), 3–27.
- Quintana-Gómez, R. A. (1999), 'Trends of Maximum and Minimum Temperature in Northern South America', *Journal of Climate* **12**(7), 2104–2112.
- R Development Core Team (2007), *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
*<http://www.R-project.org>
- Saladié, O., Brunet, M., Aguilar, E., Sigró, J. & López, D. (2005), Datos de precipitación mensual ajustada del sector nororiental de la península ibérica (1850-2000), Technical report, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H. L. (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, New York, USA.
- West, M. & Harrison, J. (1977), *Bayesian Forecasting and Dynamic Models*, second edn, Springer-Verlag.
- Wilks, D. (1997), 'Resampling Hypothesis Tests for Autocorrelated Fields', *Journal of Climate* **10**, 65–82.
- World Meteorological Organization (2007), Guide to Climatological Practices, Third Edition. Taken in May of 2007 of the web page.
*http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/guide_third_edition_draft_may2007.pdf

Zwiers, F. & Von Storch, H. (1995), 'Taking Serial Correlation into Account in Tests of the Mean', *Journal of Climate* **8**(2), 336–351.

Apéndice A.

TABLA 2: Lista de estaciones utilizadas.

Serial	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura	Nombre	Estado	Organismo	Periodo de registro	Porcentaje de existentes
3	-62.33	4.75	395	Aripichi	Bolívar	CVG	1977-00	88
5	-63.53	5.72	320	Carapo	Bolívar	CVG	1976-00	86
15	-61.67	4.33	503	Icabarú	Bolívar	CVG	1974-02	82
17	-61.17	5.33	1130	Kama	Bolívar	CVG	1974-94	81
20	-63.01	4.45	360	Mahigia	Bolívar	CVG	1976-00	81
23	-61.54	5.67	1226	Parupa	Bolívar	CVG	1974-99	87
25	-61.14	5.01	878	San Ignacio de Yuruani	Bolívar	CVG	1974-02	91
26	-62.87	6.93	249	San Pedro de Las Bocas	Bolívar	CVG	1964-85	98
36	-61.78	4.90	800	Karuaiken	Bolívar	CVG	1992-02	94
59	-62.30	5.94	466	Guarimba	Bolívar	CVG	1980-02	92
60	-61.80	4.60		Santa Elena	Bolívar	FAV	1954-00	100
62	-62.43	5.67	460	Kamarata	Bolívar	CVG	1984-02	91
†78	-61.40	6.04	155	Kilómetro 88	Bolívar	CVG	1971-92	71
84	-62.68	6.12	363	Mayupa	Bolívar	CVG	1984-01	83
†92	-61.97	6.05	421	Tuna	Bolívar	CVG	1984-00	81
102	-61.54	4.90	820	Lorikeima	Bolívar	CVG	1992-02	83
107	-60.87	4.84	879	Morocmeru	Bolívar	CVG	1990-02	85
*232	-69.68	11.42	21	Coro-Aeropuerto	Falcón	FAV	1950-98	99
426	-67.68	10.35	1160	Rancho Grande	Aragua	MARN	1950-98	97
461	-68.00	10.19	460	Valencia-Gfv	Carabobo	MARN	1950-98	96
491	-68.00	9.96	550	Las Dos Bocas	Carabobo	MARN	1950-98	97
563	-66.93	10.41	980	Caracas-La Mariposa	Miranda	MARN	1950-98	95
795	-64.29	11.03	88	San Francisco Macan.	Nueva Esparta	MARN	1950-98	99
1009	-71.29	10.89	20	Quisiro	Zulia	MARN	1950-98	96
1059	-71.02	10.47	115	Quiroz-El Tablazo	Zulia	MARN	1950-98	96
1071	-72.30	10.33	86	Villa del Rosario	Zulia	MARN	1950-98	99
1092	-72.56	10.06	99	Machiques-Granja M.A.C.	Zulia	MARN	1950-98	97
†1174	-70.53	10.24	615	Quebrada Arriba	Lara	MARN	1950-98	99
†1187	-70.08	10.16	413	Carora-Granja	Lara	MARN	1950-98	99
1231	-69.94	10.59	383	Baragua	Lara	MARN	1950-98	99
1238	-69.24	10.55	190	Moroturo	Lara	MARN	1950-98	96
1265	-69.46	10.29	660	Bobare	Lara	MARN	1950-98	99
1343	-68.74	10.36	320	San Felipe	Yaracuy	MARN	1950-98	92
1381	-68.87	10.14	235	Central Matilde	Yaracuy	MARN	1950-98	97
1425	-67.16	10.44	2101	Alto de Ño León	Distrito Capital	MARN	1950-98	95
†1446	-67.08	10.39	1628	Sitio Oropeza	Miranda	MARN	1950-98	94
1455	-67.26	10.28	650	La Urbina-Quebrada Seca	Aragua	MARN	1950-98	98
1508	-66.13	10.54	10	Carenero	Miranda	MARN	1950-98	95
1516	-66.17	10.48	30	Curiepe	Miranda	MARN	1950-98	94
1534	-66.28	10.42	65	El Café	Miranda	MARN	1950-98	95
1542	-66.52	10.38	500	Palo Gacho	Miranda	MARN	1950-98	94
†1751	-64.63	10.22	15	Puerto La Cruz	Anzoátegui	MARN	1950-98	97
1796	-64.39	10.02	310	Bergantín	Anzoátegui	MARN	1950-98	97
1806	-63.84	10.97	17	Porlamar	Nueva Esparta	MARN	1950-98	99
1828	-63.11	10.58	53	Tunapuy	Sucre	MARN	1950-98	92
1869	-63.93	10.25	234	Cumanacoa-La Granja	Sucre	MARN	1950-98	97
1873	-63.82	10.18	834	Cocollar	Sucre	MARN	1950-98	98

TABLA 2: Lista de estaciones utilizadas. (continuación)

Serial	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura	Nombre	Estado	Organismo	Período de registro	Porcentaje de existentes
†2106	-70.12	9.81	1499	El Jabón	Lara	MARN	1950-98	99
2108	-70.11	9.95	475	Sicarigua	Lara	MARN	1950-98	99
2110	-70.41	10.02	539	Prieto-Los López	Lara	MARN	1950-98	98
2118	-70.27	9.87	844	El Empedrado	Lara	MARN	1950-98	99
2126	-70.28	9.67	800	Valle Hondo	Trujillo	MARN	1950-98	95
2136	-70.22	9.64	1157	Carache	Trujillo	MARN	1950-98	97
2139	-69.86	9.59	1388	Sabana Grande-Guago	Lara	MARN	1950-98	99
2141	-70.67	9.54	124	Cenizo-Campamento Vivian	Trujillo	MARN	1950-98	98
2146	-70.42	9.64	272	Guamas de Monay	Trujillo	MARN	1950-98	98
2147	-70.33	9.47	1601	Santa Ana	Trujillo	MARN	1950-98	97
2151	-70.53	9.71	200	Sabana Grande	Trujillo	MARN	1950-98	98
2156	-70.43	9.37	790	Trujillo-Liceo	Trujillo	MARN	1950-98	95
2162	-70.66	9.31	1001	Escuque	Trujillo	MARN	1950-98	97
2172	-70.66	9.37	756	Las Cruces	Trujillo	MARN	1950-98	96
2185	-70.53	9.25	1180	Santiago de Trujillo	Trujillo	MARN	1950-98	92
2193	-70.71	9.05	1747	La Mesa de Esnujaque	Trujillo	MARN	1950-98	96
2195	-70.66	9.08	1693	Jajo	Trujillo	MARN	1950-98	95
2234	-69.66	9.74	1330	Sanare	Lara	MARN	1950-98	100
2239	-69.10	9.67	175	Agua Blanca	Portuguesa	MARN	1950-98	95
2241	-69.96	9.69	941	Humocaró Bajo	Lara	MARN	1950-98	98
2316	-68.29	9.92	385	Tinaquillo	Carabobo	MARN	1950-98	94
2349	-68.05	9.65	128	El Pao-Oficina	Carabobo	MARN	1950-98	96
†2608	-65.16	9.96	12	Clarines	Anzóategui	MARN	1950-98	98
2648	-65.20	9.60	35	Onoto	Anzóategui	MARN	1950-98	98
2703	-64.74	9.97	160	San Bernardino	Anzóategui	MARN	1950-98	98
2713	-64.58	9.96	69	Curataquiche	Anzóategui	MARN	1950-98	99
2717	-64.35	9.91	160	Santa Inés	Anzóategui	MARN	1950-98	98
2722	-64.74	9.79	100	El Carito	Anzóategui	MARN	1950-98	98
2755	-64.29	9.58	280	Santa Rosa	Anzóategui	MARN	1950-98	98
2911	-61.09	9.19	2	San José de Yaruara	Delta Amacuro	MARN	1969-98	98
3042	-71.29	8.55	1520	Mesa de Ejido	Mérida	MARN	1950-98	97
3074	-71.92	8.27	2100	Pueblo Hondo	Táchira	MARN	1950-98	94
3082	-72.16	8.17	485	Mesa de Seboruco	Táchira	MARN	1950-98	92
3126	-70.41	8.77	550	Barinitas	Barinas	MARN	1950-98	94
3712	-64.72	8.85	240	Pariaguán	Anzóategui	MARN	1950-98	97
3933	-62.66	8.29	57	Caroni Macagua	Bolívar	CVG	1950-98	99
4012	-72.45	7.92	350	Ureña	Táchira	MARN	1950-98	94
4291	-69.48	7.05	90	Elorza	Apure	MARN	1969-98	89
4660	-65.64	7.48	72	Santa Rosalía	Bolívar	MARN	1969-98	99
4663	-64.85	6.98	230	Las Trincheras	Bolívar	MARN	1969-98	99
4907	-61.49	7.43	171	Hato Buena Vista	Bolívar	MARN	1969-98	98
4970	-63.05	7.78	293	Guri-Campamento Las Babas	Bolívar	CVG	1969-98	99
5027	-66.79	10.50	965	Caracas-Caurimare	Miranda	MARN	1950-98	88
5408	-67.27	6.93	78	Hato Uranon	Apure	MARN	1969-98	89
5887	-63.33	6.83	290	La Paragua	Bolívar	CVG	1969-98	98
5924	-61.63	6.75	120	El Dorado	Bolívar	MARN	1969-98	97
6928	-62.89	6.51	345	Arekuna	Bolívar	CVG	1969-98	100
6931	-62.67	5.36	395	Uriman	Bolívar	CVG	1969-98	98
6933	-61.72	5.58	1200	Kavanayen	Bolívar	CVG	1969-98	97
7906	-61.73	4.98	950	Wonken	Bolívar	CVG	1969-98	95
9401	-67.05	1.93	119	San Carlos Río Negro	Amazonas	MARN	1969-98	96
9402	-65.80	3.14	112	Tama-Tama	Amazonas	MARN	1969-98	99
9404	-67.14	3.94	120	Santa Bárbara-Orinoco	Amazonas	MARN	1969-98	98
9408	-65.22	5.07	138	Yekuana	Amazonas	MARN	1969-98	98
9415	-65.25	2.80	116	Santa María Guaicas	Amazonas	MARN	1969-98	93
*9420	-66.27	10.51		Cajigal	Distrito Capital	FAV	1950-98	100

TABLA 2: Lista de estaciones utilizadas. (continuación)

Serial	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura	Nombre	Estado	Organismo	Período de registro	Porcentaje de existentes
*9421	-71.73	10.57		Maracaibo	Zulia	FAV	1950-98	100
*9422	-64.68	10.45		Barcelona	Anzóategui	FAV	1950-98	100
*9423	-63.18	9.75		Maturín	Sucre	FAV	1950-98	100
*9424	-63.55	8.15		Bolívar	Bolívar	FAV	1950-98	100
*9425	-71.18	8.60		Mérida	Mérida	FAV	1950-98	100
*9426	-69.32	10.23		Barquisimeto	Lara	FAV	1950-98	100
*9427	-67.65	10.25		Maracay	Aragua	FAV	1950-98	100
*9428	-67.50	5.60		Puerto Ayacucho	Amazonas	FAV	1961-00	100
*9429	-61.45	7.30		Tumeremo	Bolívar	FAV	1959-00	100
*9432	-67.42	7.68		San Fernando	Apure	FAV	1921-00	100

*Estaciones utilizadas como estaciones de referencia en la prueba de Alexandersson.

†Estaciones no homogéneas según la prueba de Alexandersson.

TABLA 3: Coeficientes de los modelos ajustados y comparación de modelos.

Serial	α (mm)	β (mm/mes)	Significativo	γ_1	δ_1	γ_2	δ_2	CIB ₁	CIB ₂	CIB ₃	CIB ₄	Mejor modelo
3	253.37	0.11	NS	-87.05	-37.16	57.51	-17.77	3493.68	3448.93	3486.65	3441.84	4
5	309.18	0.06	NS	-199.74	-149.53	61.60	8.42	3690.80	3648.24	3682.75	3640.01	4
15	192.16	0.22	NS	-85.44	-4.83	48.03	-6.79	4129.60	4088.10	4128.26	4087.67	4
17	174.69	0.04	NS	-129.41	-107.18	31.20	14.84	2900.39	2876.14	2892.00	2867.63	4
20	272.83	0.20	NS	-79.51	-6.43	49.18	-32.16	3655.29	3613.32	3651.60	3610.22	4
23	129.94	0.01	NS	-54.40	-62.29	4.20	-7.60	3580.91	3579.38	3572.17	3570.65	4
25	158.73	0.03	NS	-89.27	-49.21	34.53	-17.61	4039.57	4002.64	4030.16	3993.03	4
26	113.94	0.01	NS	-84.25	-61.58	20.10	23.17	3060.63	3035.96	3052.11	3027.46	4
36	271.32	-0.13	NS	-125.21	-81.29	60.43	0.58	1493.65	1475.45	1489.21	1470.93	4
59	300.07	-0.12	NS	-152.60	-149.09	61.59	2.36	1668.03	1650.52	1663.36	1645.77	4
60	145.78	0.08	NS	-80.40	-24.87	33.24	-11.52	6495.71	6446.63	6492.01	6443.82	4
62	174.18	-0.04	NS	-84.75	-116.49	9.29	-9.66	2627.30	2622.91	2618.86	2614.53	4
84	284.37	-0.04	NS	-170.22	-184.38	30.60	29.92	2722.08	2709.20	2715.57	2702.66	4
102	224.13	0.02	NS	-124.35	-61.07	37.21	-18.56	1611.41	1598.81	1606.62	1593.97	4
107	156.33	-0.27	NS	-80.88	-65.05	33.92	-16.44	1960.36	1949.99	1955.56	1945.29	4
232	31.86	-0.02	NS	7.79	-14.97	7.87	-6.95	6040.08	6025.29	6029.21	6014.61	4
426	147.14	-0.03	NS	-68.62	-102.57	NS	NS	6743.47	6746.39	6733.58	6736.50	3
461	85.68	0.01	NS	-64.16	-59.28	2.75	-7.20	6204.15	6201.07	6191.00	6187.89	4
491	130.58	-0.03	NS	-71.95	-89.38	11.36	-18.43	6539.55	6506.08	6530.95	6497.93	4
563	75.24	0.00	NS	-35.95	-46.83	12.99	-7.94	6141.57	6110.53	6128.00	6096.93	4
795	42.64	-0.03	NS	6.64	-31.16	1.03	9.10	6234.55	6228.21	6226.90	6220.51	4
1009	40.08	-0.02	NS	-8.98	-33.89	-4.05	-22.18	6005.13	5919.34	5994.37	5909.44	4
1059	116.97	-0.01	NS	-45.37	-56.81	-8.06	-39.14	6501.11	6381.95	6488.97	6369.71	4
1071	88.59	-0.01	NS	-34.71	-47.99	-12.32	-37.75	6555.96	6428.17	6543.20	6415.30	4
1092	125.27	0.00	NS	-51.13	-53.52	-7.87	-49.43	6810.67	6696.73	6798.63	6684.33	4
1231	40.59	0.00	NS	-1.45	-26.00	-14.09	-27.04	6354.84	6269.19	6342.09	6256.17	4
1238	91.35	-0.02	NS	-49.39	-50.11	23.56	-3.71	6448.26	6407.16	6437.32	6396.43	4
1265	30.88	0.00	NS	-6.86	-10.74	6.24	-13.62	5734.55	5668.41	5720.27	5654.05	4
1343	130.13	0.01	NS	-52.16	-66.51	24.04	-5.18	6701.37	6673.01	6689.20	6660.74	4
1381	92.61	-0.01	NS	-66.35	-50.93	21.61	-8.45	6345.76	6289.61	6332.78	6276.62	4
1425	92.87	-0.05	S	-26.31	-31.46	11.59	-12.23	6115.79	6081.16	6116.96	6084.26	2
1455	67.09	0.00	NS	-48.99	-43.98	7.75	-4.64	6108.36	6101.75	6095.05	6088.40	4
1508	95.07	-0.01	NS	21.13	-59.08	26.55	-22.40	6737.64	6682.26	6725.70	6670.22	4
1516	129.01	-0.04	NS	25.68	-70.46	43.73	-22.30	7027.90	6956.91	7018.01	6947.41	4

TABLA 3: Coeficientes de los modelos ajustados y comparación de modelos. (continuaci.)

Serial	α (mm)	β (mm/mes)	Significativo	γ_1	δ_1	γ_2	δ_2	CIB ₁	CIB ₂	CIB ₃	CIB ₄	Mejor modelo
1534	167.29	0.01	NS	10.87	-78.13	60.17	-0.37	7168.33	7084.12	7157.10	7072.65	4
1542	129.90	0.02	NS	-21.82	-70.11	52.82	14.13	6828.41	6704.02	6817.46	6693.00	4
1796	112.88	-0.03	NS	-36.12	-102.78	-1.07	12.03	6552.03	6546.23	6542.35	6536.53	4
1806	53.22	-0.05	S	14.19	-10.92	17.79	12.35	6026.50	5958.29	6026.15	5960.51	2
1828	120.97	0.00	NS	-53.45	-61.67	43.94	-5.27	6655.63	6520.51	6642.91	6507.58	4
1869	119.50	0.01	NS	-23.25	-91.42	-10.84	-9.39	6566.73	6556.54	6554.20	6543.98	4
1873	85.91	0.01	NS	-20.46	-52.69	NS	NS	6325.16	6328.16	6312.74	6315.73	3
2108	71.90	-0.01	NS	7.84	-22.99	-17.01	-43.55	6688.61	6544.76	6676.04	6532.03	4
2110	82.97	-0.01	NS	-5.15	-36.23	-13.92	-41.85	6536.47	6366.50	6524.35	6354.54	4
2118	82.33	-0.03	NS	-6.24	-30.36	-16.59	-44.22	6522.35	6350.32	6512.03	6341.37	4
2126	70.80	-0.02	NS	2.54	-14.41	-11.14	-33.33	6343.77	6197.52	6333.32	6187.92	4
2136	56.41	-0.01	NS	-15.94	-15.35	-9.92	-24.27	6015.46	5899.35	6002.76	5886.67	4
2139	132.77	-0.02	NS	-71.83	-40.78	32.09	-17.96	6592.30	6507.65	6580.52	6495.93	4
2141	86.50	-0.01	NS	-1.11	-24.82	-11.30	-42.81	6616.75	6470.63	6604.40	6458.29	4
2146	105.38	-0.02	NS	7.40	-22.63	-11.13	-48.70	6759.34	6613.20	6747.58	6601.57	4
2147	66.82	0.01	NS	3.68	-4.34	-16.51	-37.28	6438.55	6294.58	6426.38	6282.11	4
2151	107.26	-0.02	NS	-13.09	-36.98	-16.97	-45.88	6836.52	6716.65	6825.38	6705.77	4
2156	66.60	0.00	NS	-1.32	-4.50	-15.86	-37.28	6396.40	6236.37	6383.63	6223.53	4
2162	71.84	0.00	NS	-13.22	-18.21	-11.34	-22.53	6237.08	6153.58	6223.64	6140.02	4
2172	69.93	-0.02	NS	-9.90	-18.11	-8.53	-23.55	6236.53	6154.31	6225.11	6143.07	4
2185	63.96	0.00	NS	-9.64	-12.15	-15.68	-33.64	6227.95	6016.92	6214.52	6003.19	4
2193	48.75	0.01	NS	-19.12	-14.84	-9.40	-25.73	5928.84	5773.31	5916.33	5760.77	4
2195	72.80	-0.03	NS	-19.48	-21.34	-15.75	-36.15	6241.44	6049.61	6232.86	6044.34	4
2234	68.76	-0.01	NS	-29.18	-17.16	13.26	-23.68	6192.80	6085.04	6180.00	6072.38	4
2239	123.92	0.01	NS	-96.86	-75.79	25.93	-9.52	6565.82	6518.51	6553.62	6506.15	4
2241	57.16	0.01	NS	-25.35	-6.83	11.13	-18.01	5934.61	5850.61	5921.90	5837.70	4
2316	107.49	-0.03	NS	-77.02	-62.03	15.55	-9.56	6381.07	6354.22	6371.71	6345.31	4
2349	105.68	-0.02	NS	-80.96	-64.18	15.49	-6.47	6420.61	6397.65	6410.69	6387.96	4
2648	89.83	0.01	NS	-54.76	-83.20	8.37	18.25	6257.44	6216.52	6244.57	6203.58	4
2703	76.60	-0.02	NS	-46.94	-70.48	7.95	16.76	6147.71	6106.95	6136.49	6095.80	4
2713	77.13	-0.01	NS	-38.21	-65.85	7.07	15.09	6119.66	6084.82	6107.39	6072.52	4
2717	64.42	-0.05	NS	-16.86	-54.08	-4.24	5.63	6222.82	6222.12	6220.02	6219.30	4
2722	88.87	-0.01	NS	-40.25	-82.16	2.81	16.01	6278.28	6250.55	6266.51	6238.73	4
2755	53.99	-0.04	NS	-31.52	-50.57	-1.14	10.92	6231.72	6222.89	6228.58	6219.92	4
2911	215.13	-0.26	S	-31.97	-52.30	79.35	0.44	4319.18	4202.85	4321.59	4213.47	2
3042	69.81	-0.02	NS	-9.51	-22.20	1.05	-36.34	6212.28	6054.82	6200.61	6043.55	4
3074	71.46	-0.05	NS	-7.86	-5.11	-6.67	-40.97	6512.25	6386.71	6504.28	6378.65	4
3082	199.44	-0.05	NS	20.10	-5.09	-11.28	-78.01	7248.17	7121.83	7238.63	7112.78	4
3126	229.93	0.08	NS	-132.24	-101.56	-2.32	-47.15	7145.80	7091.71	7140.82	7087.53	4
3712	87.12	-0.04	NS	-54.58	-77.26	2.19	8.27	6626.08	6625.17	6619.09	6618.17	4
3933	96.64	0.03	NS	-57.90	-52.62	40.44	16.69	6484.38	6332.51	6473.78	6322.55	4
4012	62.81	-0.03	NS	14.16	-4.06	-0.27	-39.63	6544.09	6435.32	6533.34	6425.18	4
4291	152.36	0.00	NS	-140.72	-84.27	22.94	-2.60	4063.12	4042.70	4052.33	4031.86	4
4660	158.41	0.02	NS	-131.67	-114.82	32.25	36.66	4272.55	4225.09	4262.95	4215.30	4
4663	151.28	0.01	NS	-106.95	-93.47	32.50	20.95	4159.97	4119.89	4150.01	4109.74	4
4907	102.07	-0.01	NS	-48.33	-25.13	39.40	11.61	3978.45	3902.27	3968.12	3891.61	4
4970	110.11	-0.03	NS	-54.40	-43.94	42.76	12.62	4083.95	4014.22	4074.00	4004.09	4
5027	88.78	0.01	NS	-41.30	-55.61	12.33	-7.34	6208.05	6188.21	6195.11	6175.20	4
5408	152.18	-0.02	NS	-156.64	-112.21	25.23	33.18	4284.20	4245.06	4274.27	4235.03	4
5887	134.00	0.06	NS	-105.37	-95.31	18.91	32.01	4263.88	4231.25	4255.26	4222.81	4
5924	112.41	-0.04	NS	-46.16	-39.45	29.05	13.68	4046.66	4011.45	4037.11	4001.86	4
6928	211.43	0.09	NS	-163.69	-159.39	37.43	52.78	4409.49	4351.73	4401.66	4344.21	4
6931	339.14	0.08	NS	-229.94	-177.62	73.80	14.47	4589.73	4532.66	4581.72	4524.64	4
6933	209.01	0.02	NS	-98.35	-95.97	17.48	-16.92	4371.70	4361.49	4361.88	4351.64	4
7906	260.92	0.04	NS	-132.46	-93.34	38.12	-6.26	4375.09	4349.21	4365.88	4339.92	4
9401	279.13	-0.08	NS	-90.19	-5.19	30.98	-11.10	4283.12	4263.17	4275.15	4255.41	4

TABLA 3: Coeficientes de los modelos ajustados y comparación de modelos. (continuaci.)

Serial	α (mm)	β (mm/mes)	Significativo	γ_1	δ_1	γ_2	δ_2	CIB ₁	CIB ₂	CIB ₃	CIB ₄	Mejor modelo
9402	276.20	0.02	NS	-167.62	-34.19	53.70	-25.63	4404.73	4345.48	4395.03	4335.59	4
9404	265.93	-0.07	NS	-188.44	-75.96	37.63	-24.82	4310.68	4267.51	4302.35	4259.54	4
9408	206.02	-0.07	NS	-187.11	-109.86	44.10	15.84	4283.59	4242.08	4275.21	4233.82	4
9415	207.54	-0.02	NS	-109.80	-17.17	29.57	-22.10	4232.25	4201.90	4222.50	4192.11	4
9420	71.97	0.01	NS	-28.63	-49.78	5.32	-8.42	6157.70	6148.13	6144.73	6135.11	4
9421	42.87	0.01	NS	-9.81	-31.32	-8.68	-26.55	6175.71	6077.77	6163.24	6065.11	4
9422	51.76	-0.01	NS	-34.41	-46.79	10.53	14.44	5860.44	5782.52	5849.24	5771.51	4
9423	110.49	0.01	NS	-40.17	-60.42	38.93	13.51	6480.12	6343.45	6467.78	6330.75	4
9424	81.28	0.00	NS	-53.63	-55.30	20.40	13.91	6505.07	6457.15	6492.09	6444.09	4
9425	31.28	-0.01	NS	7.63	-15.71	6.77	-7.54	6024.24	6010.43	6011.88	5998.18	4
9426	142.25	0.00	NS	-32.57	-51.28	-6.43	-73.37	6841.54	6595.11	6829.87	6582.71	4
9427	44.55	0.01	NS	-26.12	-11.50	11.91	-12.65	5860.85	5787.94	5847.55	5774.49	4
9428	75.87	0.00	NS	-55.56	-60.52	NS	NS	6270.99	6272.80	6257.66	6259.46	3
9429	189.53	0.01	NS	-161.05	-75.65	43.43	-2.80	5734.88	5681.51	5723.77	5670.29	4
9432	118.24	0.00	NS	-118.87	-84.65	17.03	21.24	10990.99	10934.46	10976.73	10920.09	4

α : Coeficiente de media. β : Coeficiente de tendencia. γ_1 : Coeficiente del coseno para el primer armónico. δ_1 : Coeficiente del seno para el primer armónico. γ_2 : Coeficiente del coseno para el segundo armónico. δ_2 : Coeficiente del seno para el segundo armónico. CIB_{*i*}: Criterio de información bayesiana para el modelo $i = 1, 2, 3, 4$. NS: No Significativo. S: Significativo.