

EVALUACION DE INDICES CLIMATICOS EXTREMOS DERIVADOS DE DATOS DIARIOS.

Idelmis Tamara González García, Luis Raúl Paz Castro.

Centro del Clima, Instituto de Meteorología

Teleono:8670718

Cnc@met.inf.cu

Resumen

En el presente trabajo se evalúan índices climáticos extremos derivados de datos diarios de tres variables meteorológicas: temperaturas absolutas y acumulado de precipitación para dos estaciones meteorológicas, Casablanca y Camagüey en el periodo comprendido entre 1961-2002. Los índices fueron calculados usando la versión 3.1 del software Climdex desarrollado como resultado del primer taller de cambio climático en la región del Caribe en Kingston Jamaica, en Enero de 2001. Climdex posee cuatro subrutinas, control de calidad, test de homogeneidad, cálculo de los índices y análisis de la región. En correspondencia con los resultados obtenidos en el Caribe no todos los índices fueron relevantes, siendo los más significativos el rango intra- anual de la temperaturas, las temperaturas máximas y mínimas por encima o por debajo de la media histórica anual, las temperaturas máximas y mínimas mayores o iguales al percentil 90, el número de días consecutivos secos y el número de días con temperaturas máximas y mínimas menores que el percentil 10. Los mismos revelaron cambios en los valores extremos de los elementos climáticos y apuntan hacia un clima futuro más cálido. El conocimiento y formulación de los indicadores es una valiosa herramienta para el análisis y la detección del cambio climático, además los resultados del análisis constituyen un importante aporte ya que es aplicable en la vigilancia del clima.

Introducción.

Etimológicamente la palabra clima significa inclinación del eje de la Tierra sobre el plano de la eclíptica [1], pero con independencia de su significado etimológico este

se ha venido relacionando históricamente con condiciones meteorológicas habituales.

La Organización Meteorológica Mundial define el clima como[2]: *“El conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas caracterizado por los estados y evolución del tiempo, en el curso de un periodo lo suficientemente largo y en un dominio espacial determinado”*. Es decir, que cuando se habla del clima se hace referencia a un conjunto de condiciones meteorológicas que se presentan durante un tiempo prolongado para un lugar determinado.

Las condiciones meteorológicas pueden ser interpretadas desde dos puntos de vista principales. El primer punto de vista es el tiempo atmosférico o meteorológico, que son el conjunto de valores de los elementos meteorológicos en un lugar y tiempo determinado (los cuales varían de un día a otro y de una hora a otra), mientras que el segundo punto de vista, a los efectos del concepto de clima, está referido a aquellas condiciones que con más frecuencia se presentan en el lugar. Este concepto considera el comportamiento estadístico de cada variable y la sucesión de valores que se repiten idénticamente, cada año, cada día y cada mes, característica a la cual se le ha dado el nombre de régimen normal para diferenciarlo del régimen real de la misma variable meteorológica que cambia de un día a otro y de un año a otro.

También en el concepto de clima aparece un elemento importante y es que el clima está sujeto a fluctuaciones o variaciones temporales. A lo largo de la historia geológica el planeta ha pasado por numerosos cambios de notable magnitud, debido a causas naturales, externas e internas, entre las que se encuentran las erupciones volcánicas, la variación de la excentricidad de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, el desplazamiento de placas tectónicas, la inclinación de la eclíptica y a otras más recientes provocadas por la acción del hombre y paralelas al desarrollo científico técnico etc. De manera que el clima como recurso natural ha estado cambiando mucho antes de la existencia del hombre, aunque ha visto acelerado su tiempo de respuesta producto de las causas antrópicas con respecto a las causas naturales.

A escala global en el último milenio, se han observado cambios importantes en todos los elementos que asociamos con el clima, temperatura, precipitación, viento, etc. Estos cambios son detectados a partir del análisis de series de datos muy largas, reconstruidas usando para ello proxydata (datos paleoclimáticos y/o documentales) o utilizando índices climáticos derivados de observaciones diarias de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación[3]. Este análisis ha revelado un calentamiento a mediados del siglo XIX, seguido de un calentamiento sin precedentes durante el siglo XX. Como resultado, la década de los 90 fue la más cálida del último milenio y el año 1998 fue el más cálido en el hemisferio Norte.

En correspondencia con la tendencia global hacia un clima más cálido, estudios recientes en Cuba revelan la existencia de fluctuaciones importantes en los patrones temporales de la temperatura del aire y la precipitación [4] razón por la cual en el presente trabajo se propusieron los siguientes objetivos:

- Análisis de la tendencia en las series de temperaturas máxima, media y mínima, así como de la oscilación térmica.
- Evaluar los índices climáticos que cuantifiquen estos cambios y realizar un análisis del comportamiento de los mismos.

Materiales y Métodos.

Para la realización del presente trabajo se utilizaron las series de datos de valores diarios extremos de temperatura y acumulados de precipitación, de las estaciones meteorológicas Casablanca y Camagüey, pertenecientes a la red de estaciones del Instituto de Meteorología (INSMET) en el periodo comprendido entre 1961-2002.

La serie de temperatura media, para ambas estaciones, se obtuvo mediante el promedio de la temperatura máxima y mínima con el objetivo de lograr homogeneidad en los valores, con respecto a determinados períodos en los que esta se registraba mediante el valor medio de las observaciones horarias. La serie de oscilación térmica se obtuvo mediante la diferencia de los valores de temperaturas extremas.

Caracterización de las estaciones.

La estación meteorológica de Casablanca ($23^{\circ} 10'$ latitud N, $82^{\circ} 21'$ longitud W) está situada sobre una colina a unos 50 m de altitud [5], junto a la bahía de La Habana (costa norte de la región occidental de Cuba en el Golfo de México), con un entorno típicamente urbano.

La estación Camagüey se encuentra situada en los $21^{\circ} 24'$ latitud N y $77^{\circ} 51'$ longitud W a 124 m sobre el nivel del mar [5]. Fue fundada en el año 1960 aunque se realizaron observaciones desde 1954. El entorno de esta estación se puede clasificar como semiurbano.

Ambas estaciones pertenecen al Instituto de Meteorología de Cuba.

Control de Calidad de los datos.

El control de calidad del dato meteorológico de cualquier elemento se reduce, en esencia, a comparaciones con valores de control. Estos valores de control pueden ser calculados u obtenidos por diferentes formas y dependen en general, del lugar, la época y el tipo de variable. El chequeo se efectúa bajo la aceptación de que el dato en cuestión debe encontrarse dentro de un rango permisible o por debajo de un valor umbral variando la calidad del control de forma inversa con el tamaño de este intervalo [6]. Para el control de calidad de estos datos se realizó el chequeo relativo temporal que consiste en la comparación de la variación que tiene el elemento de un día a otro vecino con la máxima variación de este elemento encontrada en la muestra.

Análisis estadístico.

Para el procesamiento estadístico de las series se utilizó el software Statistic y el software Climdex v-1.3. Los valores medios anuales y medios mensuales fueron comparados con los valores medios históricos de un período denominado por la OMM como normal climatológica (norma 1961-1990), para cada elemento y para cada estación, calculados a partir de los datos diarios.

El software Climdex v-1.3 es un programa de Microsoft Excel designado a auxiliar a los investigadores en el análisis y detección del cambio climático. Específicamente Climdex guía al usuario a través de cuatro pasos, usando una interfase usuario gráfica. Este proceso consiste en los siguientes pasos:

1. Control de calidad
2. Test de homogeneidad
3. Cálculo de índices
4. Análisis de la región

El análisis de tendencia y punto de cambio se realizó mediante el programa Winstar, utilizando para ello: las pruebas de Spearman, la prueba de Pettit y la prueba de Mann.(ver gráficas 1 y 2)

Definición y formulación de los índices climáticos seleccionados.

La lista de índices fue extraída del sitio Web del Royal Netherlands Institute [7] en el que podrá encontrar los índices utilizados (ver Tabla 1) y otros, además de una amplia explicación de cada uno de ellos.

Tabla 1: Descripción de los Índices Climáticos utilizados.

Simbología	Definición	Formulación
ETR	Rango de temperatura extrema intra-anual.	$ETR_j = \text{máx}(Tx_{ij}) - \text{mín}(Tn_{ij})$ <p>Tx_{ij} y Tn_{ij} son las temperaturas máximas y mínimas en el día i del periodo j.</p>
Tn10	Porcentaje de tiempo $T_n < 10$ percentil de temperatura mínima diaria.	$T_{ij} < T_{in10}$ Tn_{ij} es la temperatura mínima del día i del periodo j y T_{in10} es el percentil 10, calculado para una ventana de 5 días centrada en cada día evaluado durante el periodo 1961-1990.

SDIL	Indice de Intensidad diaria simple.	$SDI _j = \sum_{w=1}^w R_{wj} / W$ R_{wj} es la suma de la precipitación diaria para días húmedos ($R > 1.0\text{mm}$) del periodo j.
CDD	Máximo número de días consecutivos secos ($R < 1\text{mm}$).	$R < 1 \text{ mm}$ R_{ij} es la suma de precipitación diaria para el día i del periodo j.
R10	Número de días con precipitación $\geq 10\text{mm}$.	$R_{ij} \geq 10\text{mm}$ R_{ij} es la suma de la precipitación diaria para el día i del periodo j.
Tx90	Porcentaje anual de casos donde la temperatura máxima diaria $T_x \geq$ que el 90 percentil.	
Tn90	Porcentaje anual de casos donde la temperatura mínima $T_n \geq$ que el 90 percentil de temperatura.	
TxGE	Número de días donde la temperatura máxima $T_x \geq$ que un umbral definido por el usuario.	
TxLE	Número de días donde la temperatura máxima $T_x \leq$ que un umbral definido por el usuario.	
TnGE	Número de días donde la temperatura mínima $T_n \geq$ que un umbral definido por el usuario.	
TnLE	Número de días donde la temperatura mínima $T_n \leq$ que un umbral definido por el usuario.	
R95T	Fracción del total anual de lluvia provocada por eventos por encima del 95 percentil.	

Resultados.

Análisis Estadístico para la Estación Casablanca.

Para la serie de temperaturas máximas de la estación Casablanca, los resultados de las pruebas de Mann y de Pettit revelaron la existencia de una tendencia creciente altamente significativa ($\alpha_1 < \alpha_0$), mostrando la primera un punto de cambio

en el año 1985 y la segunda un valor extremo negativo en el año 1981. La prueba de Spearman igualmente reafirma los resultados anteriores (ver Tabla 2).

Para la serie de temperaturas mínimas de la estación de Casablanca, los resultados de las pruebas de Pettit y de Mann revelaron la existencia de una tendencia creciente, altamente significativa ($\alpha_1 < \alpha_0$), coincidiendo ambas en que existe un punto de cambio en el año 1977. La prueba de Spearman reafirma los resultados anteriores (ver Tabla 2).

Para la serie de temperaturas medias de la estación Casablanca, los resultados de las pruebas de Mann y de Pettit revelaron la existencia de una tendencia creciente y altamente significativa ($\alpha_1 < \alpha_0$), mostrando la primera un punto de cambio en el año 1980. Mientras que la segunda lo indica en 1981. En este caso, los resultados de la prueba de Spearman reafirman también los resultados de las pruebas anteriores (ver Tabla 2).

Para la serie de Oscilaciones térmicas de la estación Casablanca, los resultados de las pruebas de Pettit y de Mann mostraron una tendencia decreciente que fue significativa ($\alpha_1 < \alpha_0$) en la primera de estas pruebas y no significativa en la segunda. La prueba de Mann mostró la existencia de un período de transición desde el año 1961 hasta 1975. Mientras que la prueba de Pettit mostró un valor extremo positivo en el año 1975, mostrando un punto de cambio. La prueba de Spearman mostró una tendencia decreciente, no significativa (ver Tabla 2).

Para la serie de precipitaciones de la estación Casablanca, los resultados de las pruebas de Pettit y de Mann revelaron la existencia de una tendencia creciente, la primera significativa mostrando un punto de cambio en el año 1977 y la segunda no significativa y muestra un punto de cambio en el año 1965. Los resultados de la prueba de Spearman muestran una tendencia creciente y significativa (ver Tabla 2).

Tabla 2: Resultados estadísticos del análisis de tendencia para Casablanca.

elemento	Spearman		Prueba de Pettit				Prueba de Mann		
	tend	signi	tend	sign	Pto. ca	interc e	tend	sign	Pto. ca
Tmax	+	xxx	+	xxx	1981	1	+	xxx	1985
Tmin	+	xxx	+	xxx	1977	1	+	xxx	1977
Tmed	+	xxx	+	xxx	1981	1	+	xxx	1980
Dtr	-	x	-	xx	1975	1	-	x	61-75
Prcp	+	xx	+	xx	1977	1	+	x	1965

Leyenda:

+ Tendencia al incremento - Tendencia a la disminución

xxx Tendencia altamente significativa al nivel de significación de 5%.

xx Tendencia significativa al nivel de significación de 5%

x Tendencia no significativa al nivel de significación de 5%

Análisis Estadístico para la Estación Camagüey.

Para la serie de temperaturas máximas de la estación Camagüey los resultados de las pruebas de Pettit y de Mann revelaron una tendencia decreciente, con la diferencia de que la primera es altamente significativa y con un solo punto de cambio en el año 1972; mientras que la segunda es significativa y presenta un periodo de transición entre los años 1971 y 1973. Por otra parte la prueba de Spearman muestra una tendencia decreciente y significativa lo cual ratifica los resultados de las pruebas anteriores (ver Tabla 3).

Para la serie de temperaturas mínimas de la estación Camagüey los resultados de las pruebas de Pettit y de Mann revelaron la existencia de una tendencia creciente y altamente significativa ($\alpha_1 < \alpha_0$), mostrando la primera un punto de cambio en el año 1975 y la segunda un punto de cambio en el año 1974. La prueba de Spearman mostró una tendencia creciente y altamente significativa lo que igualmente apoya los resultados anteriores (ver Tabla 3).

Para la serie de temperaturas medias de la estación Camagüey, los resultados de las pruebas de Pettit y de Mann revelaron la existencia de una tendencia creciente y altamente significativa ($\alpha_1 < \alpha_0$), mostrando la primera un punto cambio en el año 1985. Mientras que la segunda presenta un período de transición entre los años 1976 y 1982. Por otra parte la prueba de Spearman muestra una tendencia creciente altamente significativa lo cual corrobora los resultados de las dos pruebas anteriores (ver Tabla 3).

Para la serie de oscilaciones térmicas de la estación Camagüey los resultados de las pruebas de Pettit y de Mann revelan la existencia de una tendencia decreciente altamente significativa ($\alpha_1 < \alpha_0$), mostrando ambas un punto de cambio en el año 1975. Mientras que la prueba de Spearman revela la existencia de una tendencia decreciente altamente significativa, lo cual corrobora los resultados anteriores (ver Tabla 3).

Para la serie de precipitaciones de la estación Camagüey los resultados de las pruebas de Pettit y de Mann revelan la existencia de una tendencia decreciente no significativas ($\alpha_1 > \alpha_0$), mostrando la primera un punto de cambio en el año 1969 y la segunda una gran variabilidad pero con una rama decreciente en los años comprendidos entre 1970 y 1991. La prueba de Spearman muestra una tendencia decreciente pero no significativa igualmente corroborando los resultados de las dos pruebas anteriores (ver Tabla 3).

Tabla 3: Resultados estadísticos del análisis de tendencia para Camagüey.

elemen	Spearman		Prueba de Pettit				Prueba de Mann		
	tend	signi	tend	sign	Pto. ca	interc e	tend	sign	Pto. ca
Tmax	-	xx	-	xxx	1972	3	-	xx	71-73
Tmin	+	xxx	+	xxx	1975	1	+	xxx	1974
Tmed	+	xxx	+	xxx	1985	5	+	xxx	76-82
Dtr	-	xxx	-	xxx	1975	1	-	xxx	1975
Prcp	-	x	-	x	1969	9	-	x	

Análisis de los índices climáticos. (ver gráficas 1 y 2)

El índice **ETR** (rango de temperatura intra-anual) tiene una tendencia decreciente en ambas estaciones, pero altamente significativa para la estación Camagüey y no significativa en la estación Casablanca. .

El porcentaje de días con temperaturas máximas por encima del percentil 90 (**Tx90**), para la estación Casablanca presenta una tendencia creciente y altamente significativa mientras que la estación Camagüey la tendencia es decreciente y altamente significativa.

Para ambas estaciones, el porcentaje de días con temperaturas mínimas por debajo del percentil 10 (**Tn10**) presenta una tendencia decreciente y altamente significativa.

Para ambas estaciones, el porcentaje de días con temperaturas mínimas por encima del percentil 90 (**Tn90**) presenta una tendencia creciente y altamente significativa.

El número de días con precipitación mayor o igual a 10mm (**R10**), en ambas estaciones presenta una tendencia decreciente pero no significativa.

El número de días consecutivos secos $R < 1\text{mm}$ (**CDD**), en ambas estaciones presenta tendencia decreciente, no significativa para Casablanca y altamente significativa para Camagüey.

Una medida de precipitación extrema es el mayor acumulado de lluvia en 5 días. Frecuentemente las lluvias fuertes que conducen a inundaciones ocurren en el curso de varios días y pueden ser captadas por el índice **R5d**. Este índice se incrementó en la estación Casablanca, mientras que para Camagüey la tendencia fue decreciente y en ambos casos no significativa.

El índice de intensidad diaria simple de la precipitación (**SDIL**), presentó una tendencia creciente pero no significativa para Casablanca y decreciente y altamente significativa para Camagüey.

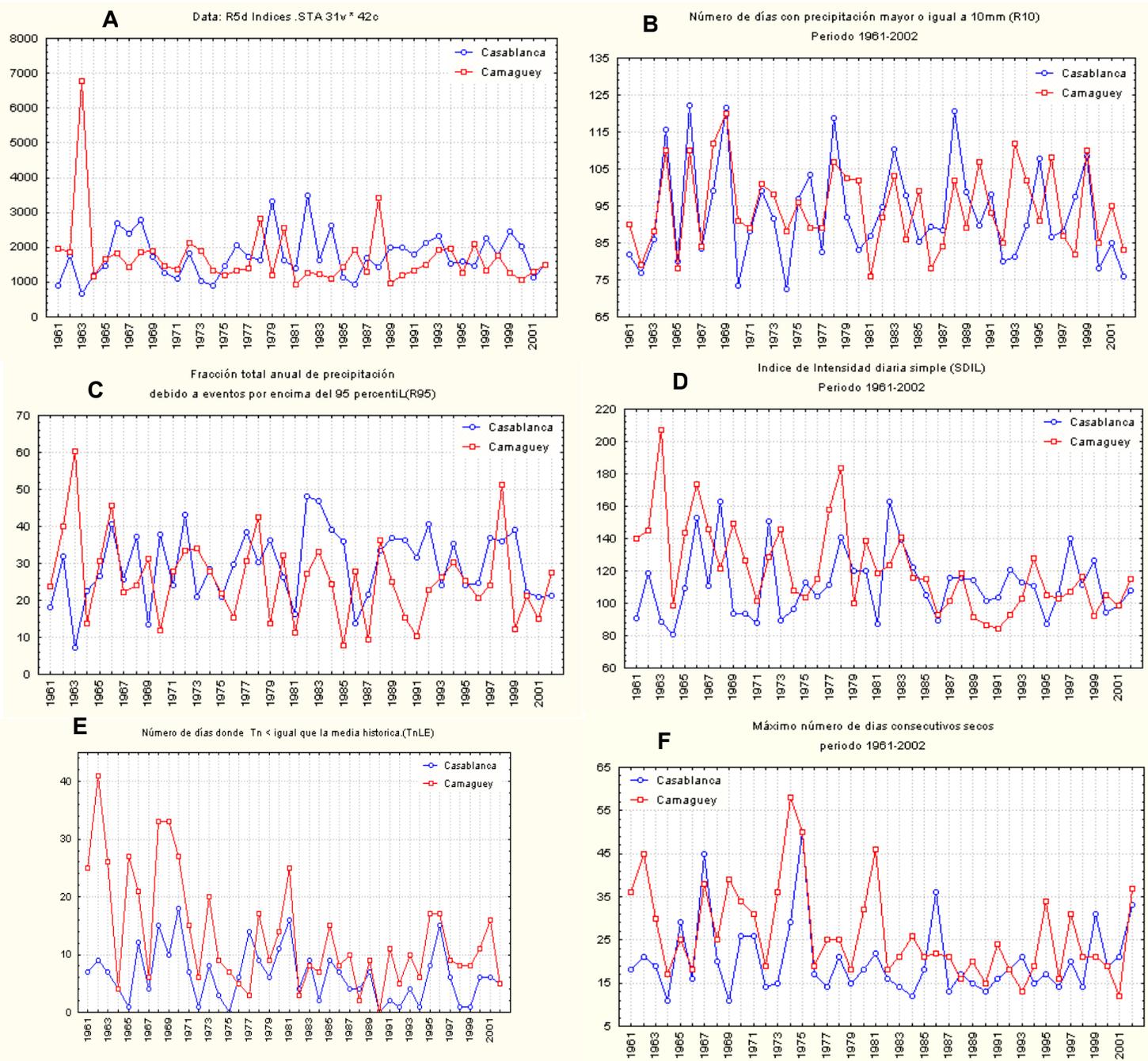
Otra medida de precipitación extrema es el índice **R95T**, presentó una tendencia creciente no significativa para la estación Casablanca y decreciente no significativa para la estación Camagüey.

El número de días con temperaturas máximas mayores o iguales a la media histórica anual (**TxGe**), tuvo una tendencia creciente, altamente significativa para la estación Casablanca y decreciente, no significativa para la estación Camagüey. El número de días con temperaturas mínimas mayores o iguales a la media histórica para el mes (**TnGe**) tuvo una tendencia creciente altamente significativa en ambas estaciones. Mientras que el número de días con temperaturas mínimas menores o iguales que la media histórica para el mes (**TnLe**) tuvo una tendencia decreciente en ambas estaciones, significativa en la estación Casablanca y altamente significativa para Camagüey.

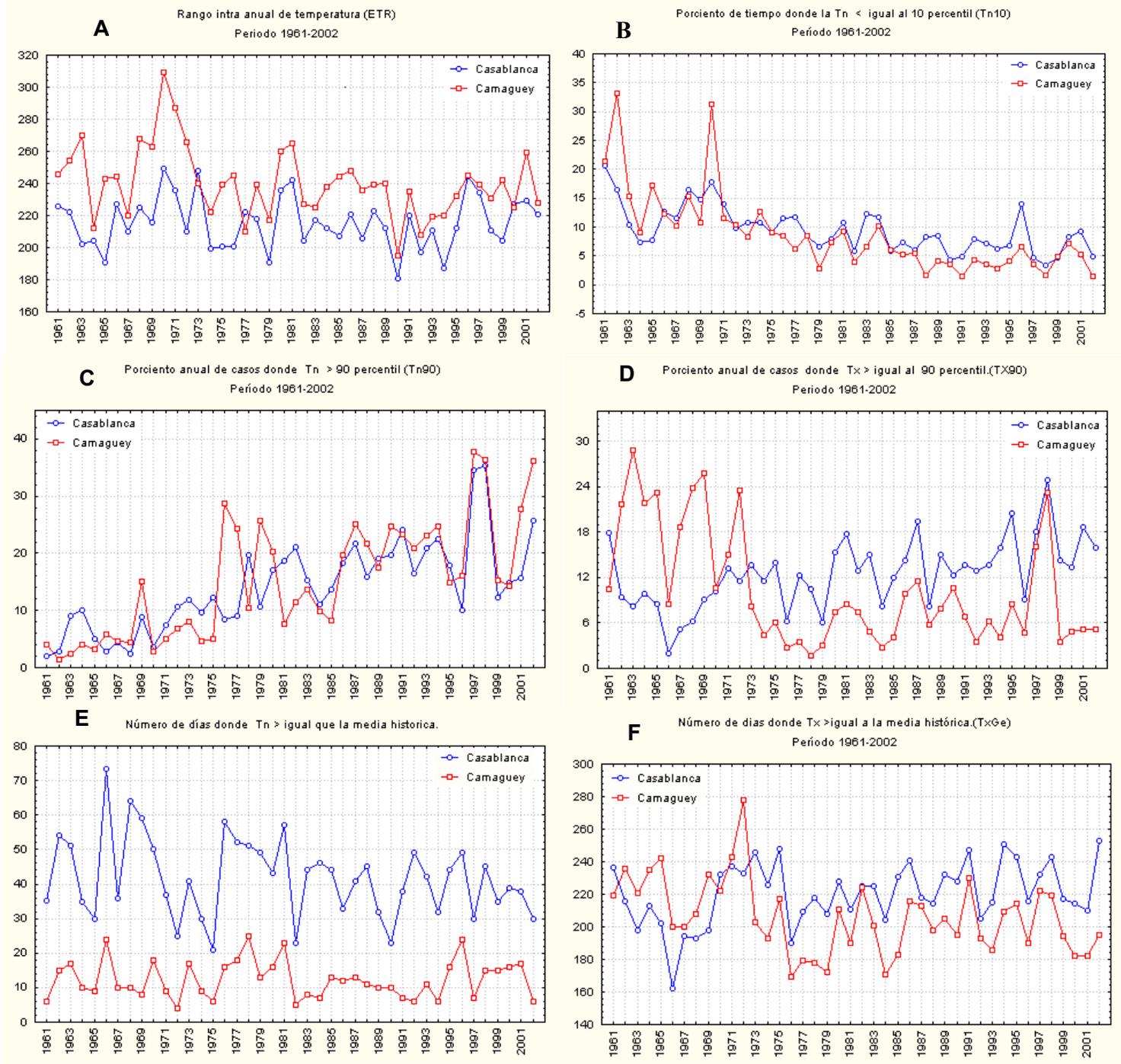
Discusión.

Realizando un análisis integrado del comportamiento de la tendencia de los elementos estudiados para la estación Casablanca en el periodo 1961-2002, se observa que para la temperatura mínima y para la precipitación el cambio en la tendencia se produce en la década de los años 70. Mientras que para la temperatura máxima, temperatura media y rango diurno de la temperatura el cambio se produce en la década de los 80. La década de los 80 constituye el punto medio del periodo analizado y pone de manifiesto la existencia de dos ciclos uno de 1961 –1980 y otro de 1981-2002 en el que la tendencia fue creciente altamente significativa. Debido a que no se posee una serie con datos posteriores al 2002, no se puede hablar de una tendencia manifiesta en la serie posterior al año mencionado; sino de la existencia de dos ciclos claramente definidos y una marcada tendencia a partir de la década de los años 70.

La oscilación térmica está disminuyendo en ambas estaciones, dado en lo fundamental por el incremento de las temperaturas mínimas para la estación Camagüey (tal como lo indican los índices Tn90 y Tn10), este hecho es coherente con los resultados obtenidos por Centella y colaboradores en el año 1995 [8] donde plantearon que el incremento de la temperatura esta relacionado con el incremento de la temperatura de la troposfera y el aumento de la temperatura superficial del mar. En el caso de Casablanca se han incrementado tanto las temperaturas máximas como las mínimas.



Gráfica 1: Descripción gráfica del comportamiento de los índices climáticos (a: R5d, b: R10, c: R95, d: Sdil, e: TnLE y f: CDD).



Gráfica 2: Descripción gráfica del comportamiento de los índices climáticos. (a: ETR, b: Tn10, c: Tn90, d: Tx90, e: TnGE y f: TxGe.)

Los índices de precipitación extrema presentan tendencia creciente no significativa para la estación Casablanca, mientras que para Camagüey la tendencia es decreciente no significativa. En el caso de Casablanca este hecho puede estar relacionado con el aporte de precipitación debido al paso de los sistemas frontales y a que el clima de Cuba se ha tornado más extremo durante las tres últimas décadas y de que los brotes de tornados y eventos intensos se han hecho mas frecuentes desde 1977 [9]. Para Camagüey puede estar relacionado con los cambios en la circulación atmosférica en nuestra área y a la tendencia decreciente de grandes precipitaciones asociadas a la ocurrencia de ciclones tropicales [9], por lo que en algunas zonas de la región central y en la región oriental se aprecian procesos de sequías severas que se vienen desarrollando desde hace varias décadas.

Conclusiones

1. Para la estación Casablanca las temperaturas mínimas, máximas y medias y las precipitaciones presentan una tendencia creciente, altamente significativa para las temperaturas y sin significado estadístico para las precipitaciones, mientras que la oscilación térmica esta disminuyendo significativamente.
2. Para la estación Camagüey las temperaturas mínimas y medias presentan una tendencia altamente significativa al incremento, mientras que las temperaturas máximas, la oscilación térmica y las precipitaciones tienden a decrecer, sin significado estadístico para las precipitaciones.
3. El análisis del comportamiento de los índices revela la existencia de importantes cambios en los extremos climáticos más acentuado en la temperatura que en las precipitaciones.
4. Los resultados obtenidos para las estaciones cubanas concuerdan en gran medida con lo reportado a escala global por Frich y colaboradores., 2002 [10] y con los resultados obtenidos en la región del Caribe por Thomas C.Peterson y colaboradores [11].
5. El rango intra anual de temperatura extrema está disminuyendo, el número de días y noches cálidas se está incrementando, mientras el número de días y

noches frías están disminuyendo y el número de días consecutivos secos esta disminuyendo.

Recomendaciones

1. Evaluar los índices climáticos al menos en las estaciones con series largas existentes en país.
2. Los resultados que emerjan del análisis formen parte del sistema de vigilancia del clima existente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Jansa, J. M. (1974): "Curso de Climatología." Inst. Cub. del Libro, La Habana; 445 pp.
2. O.M.M.(1992):Vocabulario Meteorológico Internacional ,.Nº182.
3. Zwiers F, Howard Cattle, Thomas C.Peterson and Abdalah Mokssit, 2003: Detecting Climate Change. WMO, N°3, vol 52
4. Centella A, L. Naranjo, L. Paz, P. Cardenas, B. Lapinel, M. Ballester, R. Perez, A. Alfonso, C. González, M. Limia, M. Sosa, 1997:Variaciones y cambios del clima en Cuba. Informe Técnico. Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba, 58pp.
5. ACC, 1991:Resumen Climático de Cuba, Editorial Academia, 127pp.
6. Control de calidad de las series de datos y de los datos meteorológicos mensuales y diarios de superficie. Pedro A Cárdenas Pérez. Insmet (en prensa)
7. Royal Netherlands Meteorological Institute (Indíces KNMI), sitio web: <http://www.knmi.nl/samenw/eca/htls/index2.html>.
8. Centella, A. (1997) Temperatura Superficial del aire y precipitación atmosférica en: Variaciones y cambios del clima en Cuba .Ed Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba, 58pp.
9. Alfonso,A.P.B. Lapinel y L. R.Naranjo (1997) Tormentas Locales severas , Grandes Precipitaciones y Sequias en :Variaciones y cambios del clima en Cuba Ed:Instituto de Meteorología , La Habana , Cuba , 58pp.

10. Frich, P., L. V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A. M. G. Klein Tank, T. Peterson, Observed coherent changes in climate extremes during the second half of the twentieth century, *Clim. Res.*, 19, 193-212, 2002.
11. Peterson, T. C., M. A. Taylor, R. Demeritte, D. L. Duncombe, S. Burton., E. Thompson, A. Porter, M. Mercedes, E. Villegas, R. S. Fils, A. Klein Tank, R. Warner, A. Joyette, W. Mills, L. Alexander and B. Gleason, Recent Changes in Climate Extremes in the Caribbean Region. *J. Geophys. Res.- Atmospheres*, 107, No. D2, 4601, 2002.