

ANÁLISIS DE TENDENCIAS HIDROCLIMÁTICAS DE DOS CUENCAS REPRESENTATIVAS DE ISLA DE PUERTO RICO

MS. Pablo A. Méndez Lázaro

Dr. José Martínez Fernández

RESUMEN

El agua junto a las variaciones climáticas, encabezan discursos políticos y científicos globales en los que resurgen los debates sobre los conflictos acerca de este recurso, la geopolítica del agua, la gestión, la contaminación y la polución. Ante este panorama el IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático), la Organización Mundial de Meteorología (OMM), el Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y distintas organizaciones medioambientales han enfocado sus intereses científicos en estudios en los cuales se utilicen indicadores hidroclimáticos. En este contexto, este artículo analiza la evolución hidroclimática reciente en dos cuencas principales de la isla de Puerto Rico, utilizando como indicadores las temperaturas, las precipitaciones y los caudales de distintas estaciones de NOAA y el USGS. Inicialmente analizamos cada estación individualmente y luego se hizo un análisis conjunto de la cuenca. Con los resultados obtenidos, en ninguna de las cuencas se pudo establecer tendencias claras en cuanto a la precipitación total anual. Aunque algunas estaciones mostraron tendencias positivas y otras regresivas, ninguna alcanzó valores estadísticamente significativos que permita rechazar la hipótesis nula de no tendencia. Nuestro análisis indica también que en una cuenca la temperatura media anual mostró un ligero aumento, mientras que en la otra la temperatura manifestó descendió. Por otro lado, el volumen de agua anual que discurre por las cuencas ha disminuido en ambos ríos donde se pudo rechazar la hipótesis nula de no tendencia con el análisis de Mann-Kendall. No obstante, existen otros factores

Departamento de Salud Ambiental, Universidad de Puerto Rico

pablo.mendez1@upr.edu

Centro hispano Luso de Investigaciones Agrarias (CIALE), Universidad de Salamanca, España.

jmf@usal.es

Fecha recepción: 20 de enero del 2010

Fecha aprobación: 20 de mayo del 2010

que no fueron objeto de estudio en este análisis y que tienen impactos sobre los recursos hídricos, así como los distintos mosaicos paisajísticos que componen una cuenca hidrográfica.

Palabras Claves: recursos hídricos, tendencias hidroclimáticas, cambio climático.

ABSTRACT

Today, water resources and climatic oscillations dominate all political and scientific discourses where the principal debate is focused on water management, water pollution and the geopolitics of this resource. Against this background, the IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change), WMO (World Meteorology Organization), the United Nations Environmental Program (UNEP) and other environmental organizations have focused their scientific research on hydro-climatic evolution.

In this context, this article examines recent developments in hydro-climatic evolution on two main rivers in Puerto Rico, using temperature, rainfall, stream-flow and discharge data from NOAA climatic stations and USGS hydrological stations. Initially, we analyze data from each individual station and then make an integrated analysis of the basins. With the obtained results, in none of the basins was it possible to establish clear trends as to total annual precipitation. Though some stations showed positive trends and others regressive, none reached statistically significant values.

Our analysis also indicates that in one basin the annual average temperature showed a slight increase, whereas in the other basin a temperature decrease was confirmed. On the other hand, the volume of annual discharge from both rivers showed a decrease. However, there are other factors that were not considered in this analysis, such as land use, that impact water resources and the various landscape mosaics comprising a watershed.

Key Words: water resources, hydro-climatic evolution, climate change

1. Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más preciados para el ser humano y su entorno. Ante el debate actual de Cambio Climático, los recursos hídricos han tomado protagonismo a nivel regional y global. La comprensión y entendimiento en este tema es de gran interés científico y social. En los últimos años se viene realizando estudios y publicaciones sobre temas que abordan la disponibilidad de los recursos hídricos, la evolución de las características hidroclimáticas y el funcionamiento hidrológico de cuencas hidrográficas (García Ruiz et al., 2001; Saladié et al. 2002; Erazo Chica, 2006; Carlón y Mendoza, 2007; Ceballos Barbancho et al. 2007; Aksoy et al. 2007; Allan y Soden, 2007), bajo un escenario de cambio climático.

Desde el año 2001, el IPCC ha señalado que entre sus objetivos principales está la necesidad de continuar con el estudio de las precipitaciones y de relacionar los resultados del cambio climático de las escalas más generales con las regionales y locales (González Hidalgo et al. 2002). No obstante, no existen tendencias claras ni modelos globales en cuanto a recursos hídricos se refiere, cada región del Planeta muestra distintos resultados

(IPCC, 2000). El tema se agrava en los territorios insulares debido a varios factores: el aislamiento geográfico, su reducido tamaño territorial y su limitación de recursos naturales, entre ellos el agua. En consecuencia, estos territorios son extremadamente vulnerables a los cambios y variaciones en el clima, en especial las precipitaciones (IPCC, 2007). Por ello, se hace necesario conocer cual sería la respuesta de los recursos hídricos ante el cambio climático en territorios con esas características. El conocimiento de estos cambios y sus futuras tendencias en regiones y áreas específicas, influirá en la toma de decisiones a la hora de gestionar el propio recurso y el resto de aspectos relacionados con la ordenación del territorio.

2. Objetivo

De manera general, se puede decir que el Cambio Climático es una alteración del clima en comparación con años, décadas o siglos anteriores, en una región determinada o a escala global. Este cambio se debe a causas y fenómenos naturales, aunque se entiende que en las últimas décadas la influencia humana y algunos factores antropogénicos, como las emisiones de gases de efecto invernadero, han llegado a influir considerablemente. En este contexto, se han realizado numerosos estudios en diferentes países, algunos de ellos mencionados anteriormente, con el objetivo de analizar si existen cambios o alteraciones recientes en los recursos hídricos de una determinada región o país. Por todo esto, el objetivo principal de este estudio es analizar la evolución hidroclimática reciente de dos cuencas hidrográficas representativas de la isla de Puerto Rico. De tal manera, se utilizaron como indicadores las temperaturas, las precipitaciones y los caudales. Se analizaron las tendencias y fluctuaciones a corto y medio plazo con una estimación de las frecuencias y oscilaciones.

3. Características del área de estudio

El área de estudio está comprendida por dos cuencas ubicadas en una misma región hidrográfica, Cibuco-Guajataca, al centro-norte de la isla (Figura 1); la cuenca del Río Grande de Arecibo (665 km²) y la cuenca del Río Grande de Manatí (608 km²). En cada cuenca se ha escogido un río, el Río Tanamá ubicado en la cuenca del Río Grande de Arecibo y principal tributario de éste y el propio Río Grande de Manatí ubicado en la cuenca del mismo nombre (Figuras 2 y 3).

Figura 1. Mapa de las Regiones Hidrográficas en la isla de Puerto Rico.

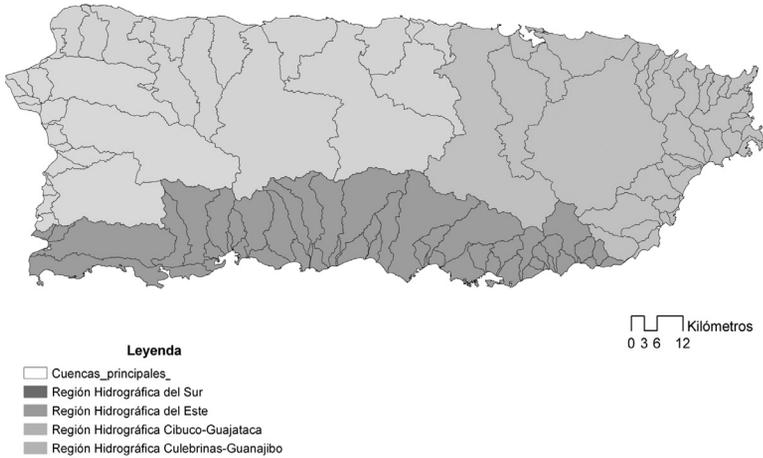


Figura 2. Cuenca Río Grande de Arecibo. Límites de la Cuencas Hidrográfica y distribución espacial de las estaciones meteorológicas (NOAA) y la estación hidrológica (USGS).

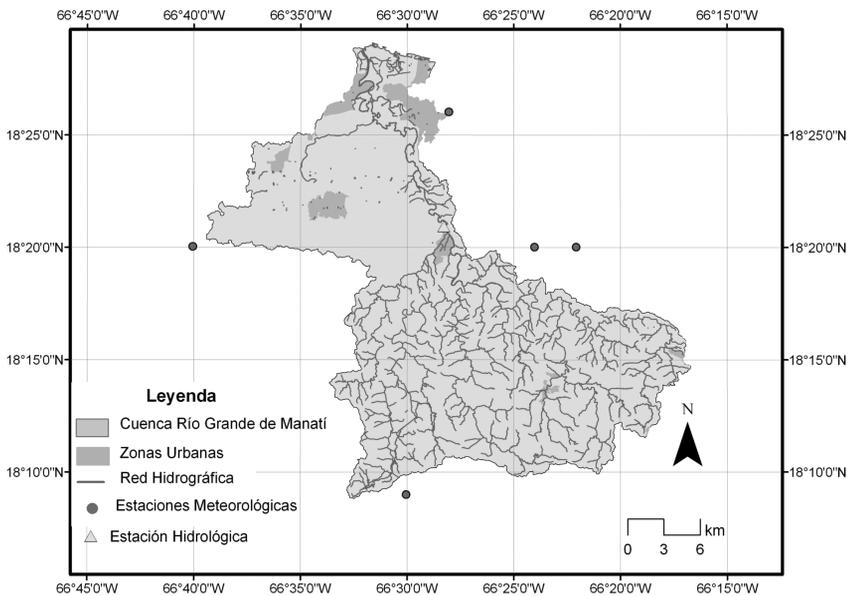
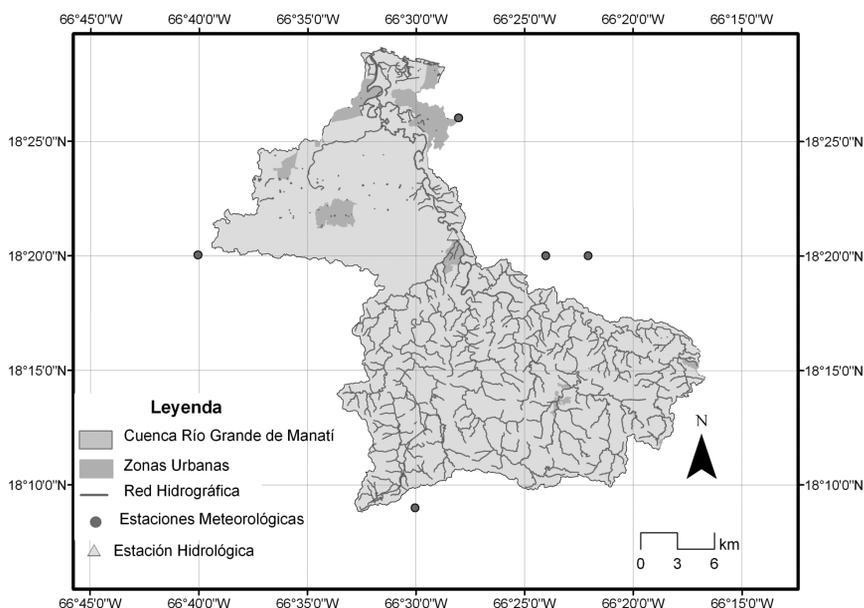


Figura 3. Cuenca Río Grande de Manatí. Límite de la Cuenca Hidrográfica y distribución espacial de las estaciones meteorológicas (NOAA) y la estación hidrológica (USGS).



Ambas cuencas tienen un clima subtropical muy húmedo. En la zona montañosa de las mismas, donde se elevan montañas que alcanzan los 1338 metros, la temperatura media es de 23° C. Sin embargo, en los valles costeros, la temperatura media puede alcanzar los 29°C. La precipitación es variada durante todo el año, cuenta con un periodo de sequía desde enero hasta abril con precipitaciones intensas durante mayo y junio. Luego, otro período seco desde junio hasta agosto y un período de lluvias abundantes de septiembre hasta diciembre.

En estas cuencas es muy frecuente que durante la temporada de lluvia ocurran aguaceros intensos diarios de corta duración, acompañados de tronadas debido al efecto orográfico inducido por la topografía y vientos constantes del norte-noreste (JCA, 2005). La lluvia es variada temporalmente y espacialmente. La distribución de la precipitación marca una gran diferencia entre la zona montañosa y las zonas costeras de las cuencas de acuerdo al análisis de las estaciones utilizadas.

La precipitación promedio anual en la cuenca del Río Grande de Arecibo es de 1966 mm (tabla 1). En las estaciones de montaña, la media anual alcanza 2420 mm mientras que en la zona costera apenas llega a 1559 mm. En la cuenca del Río Grande de Manatí, la media anual de lluvia en toda la cuenca es de 1740 mm, aunque en años de sequía apenas alcanza los 1346 mm (tabla 2). En estaciones ubicadas en los llanos costeros puede alcanzar 1512 mm de lluvia anual mientras que cerca de la Cordillera Central alcanza los 2000 mm.

Tabla 1. Precipitación (mm) media mensual por estación, media anual, coeficiente de variación (CV) anual (%) y temperatura. Cuenca Río Grande de Arecibo

	Dos Bocas	Adjuntas Substación	Adjuntas INW	Montebello	Cerro Maravilla	Temperatura media °C
CV anual (%)	17.1	19.0	19.8	27.9	20.4	1.9
Anual	1937.3	1909.9	2006.8	1558.9	2420.3	25.3
Enero	99.1	67.0	88.1	89.3	102.6	23.4
Febrero	79.7	64.5	57.3	81.9	86.7	23.3
Marzo	95.6	93.7	84.6	78.2	113.3	23.8
Abril	171.4	167.9	153.0	145.6	196.6	24.6
Mayo	261.0	215.6	208.1	200.6	284.0	25.7
Junio	148.7	124.5	147.9	85.0	170.3	26.6
Julio	129.4	156.1	161.6	80.0	155.0	26.8
Agosto	184.3	201.8	255.8	80.2	250.0	27.0
Septiembre	239.6	310.7	324.8	119.4	353.0	26.7
Octubre	231.8	284.0	265.6	174.4	402.0	26.2
Noviembre	180.9	153.6	178.8	202.4	215.4	25.3
Diciembre	115.9	70.7	81.2	163.1	91.4	24.1

Tabla 2. Precipitación (mm) Media mensual y anual por estación, coeficiente de variación (CV) anual (%) y temperatura. Cuenca del Río Grande de Manatí

	Corozal	Aceituna	Morovis	Montebello	Manatí 3E	Temperatura media °C
CV	22.0	23.9	23.6	27.9	25.1	1.2
Anual	1872.2	1956.1	1803.4	1558.9	1512.5	25.4
Enero	122.8	64.1	112.0	89.3	117.7	23.5
Febrero	97.4	60.0	79.7	81.9	80.5	23.5
Marzo	109.6	71.5	98.3	78.2	77.2	24.1
Abril	173.3	175.1	173.5	145.6	132.1	24.8
Mayo	213.7	210.2	223.2	200.6	170.4	25.8
Junio	86.0	138.4	86.6	85.0	90.3	26.8
Julio	125.6	122.3	115.5	80.0	111.1	26.9
Agosto	168.2	206.1	152.7	80.2	116.1	26.9
Septiembre	208.5	298.9	203.7	119.4	134.2	26.8
Octubre	209.5	346.4	207.1	174.4	148.2	26.3
Noviembre	201.9	189.6	205.2	202.4	177.2	25.3
Diciembre	160.0	73.5	145.9	163.1	157.5	24.1

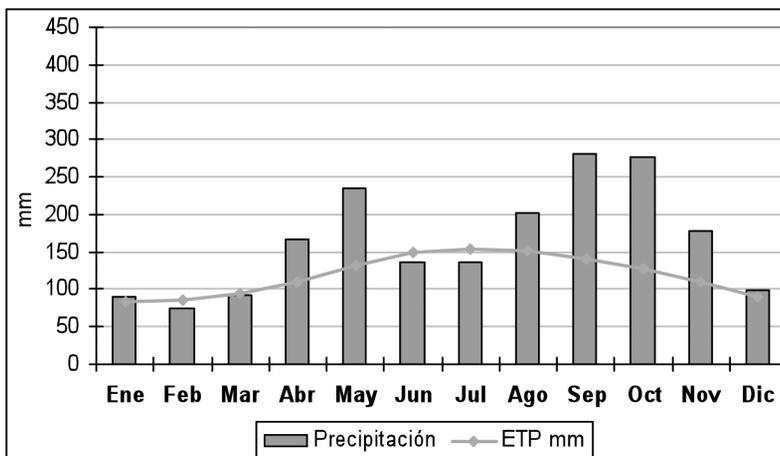
Respecto a las características de la temperatura, ambas cuencas muestran un comportamiento típico de las zonas tropicales, en general, y del Caribe en particular. La temperaturas descienden más el mes de febrero alcanzando y los meses más fríos van de diciembre a marzo, en los cuales las temperaturas se mantienen por debajo de los 24°C de media. En abril surge un aumento de las temperaturas progresivamente durante el año hasta alcanzar su pico máximo el mes de agosto. Llegado septiembre surge un descenso progresivo.

Utilizando el método Thornthwaite se obtuvo los valores de la Evapotranspiración Potencial (ETP) mensual y anual para ambas cuencas (tabla 3). Los valores más altos de ETP se pueden ver reflejados en los meses de julio y agosto, y los valores mínimos se observan en los meses de enero y febrero (Figura 4). En ella se aprecia que la ETP muestra valores más altos que la precipitación en 4 de los 12 meses del año, superada la ETP con gran diferencia en los meses que más precipitación registran en la cuenca, mayo, septiembre y octubre en la cuenca de Arecibo.

Tabla 3. Evapotranspiración Potencial mensual y anual. Cuenca Río Grande de Arecibo

Meses	ETP mm Cuenca Río Grande Arecibo	ETP mm Cuenca Río Grande Manatí
Anual	1427.4	1442.3
Enero	83.1	83.8
Febrero	85.2	86.5
Marzo	94.9	97.8
Abril	110.1	112.6
Mayo	131.9	133.2
Junio	150.0	154.7
Julio	153.2	153.9
Agosto	152.0	151.0
Septiembre	140.5	141.1
Octubre	127.5	129.2
Noviembre	108.7	108.3
Diciembre	90.3	90.2

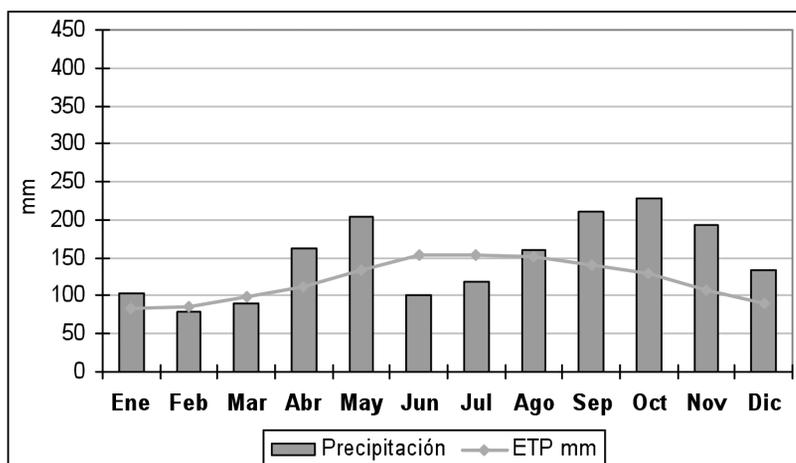
Figura 4. Precipitación media mensual y evapotranspiración potencial mensual.



Cuenca Río Grande de Arecibo.

La cuenca del Río Grande de Manatí muestra una ETP de 1442 mm anuales (tabla 3). Los meses que obtuvieron valores más altos en esta cuenca son los meses de junio y julio. El mes de julio coincide para las dos cuencas como uno de los meses con valores más altos para la ETP, sin embargo difieren en el mes de junio y agosto. Los meses en los cuales se produce menos son enero y febrero; éstos coinciden con los de la cuenca anterior (Figura 5). En ella se observa que en cuatro meses la ETP obtiene valores superiores a la precipitación. Al igual que en la cuenca del Río Grande de Arecibo es superada la ETP por la precipitación, en los meses que muestran una precipitación más alta, abril, mayo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

Figura 5. Precipitación media mensual y evapotranspiración potencial.



Cuenca Río Grande de Manatí.

La cuenca del Río Grande de Arecibo cuenta con dos cauces principales, el Río Grande de Arecibo en la parte oeste y el Río Caonillas en la parte este. El Río Tanamá es uno de los tributarios más importantes de esta cuenca y cuenta con un caudal medio anual de 1.38 m³/s y una aportación media anual de 43.5 hm³. Este tributario, originado en las zonas altas de Utuado, atraviesa, principalmente, la Región del Carso y se sumerge en varios puntos a través de túneles y cavernas antes de confluir aguas con

el Río Grande Arecibo (USGS, 1996). Dentro de la subcuenca del Río Tanamá no existe ningún embalse ni derivación hasta su confluencia aguas abajo con el Río Grande de Arecibo.

La infiltración de la escorrentía es mínima en ciertas partes de la cuenca del Río Grande de Arecibo, donde predominan las rocas volcánicas. No obstante, ésta es muy significativa en la región del Carso. Según el Servicio Geológico de los EEUU, unos 914 mm de la precipitación neta al año se infiltran al subsuelo por los sumideros y cavidades en la franja de rocas calizas al sur de Dos Bocas. Cierta parte del agua que se infiltra regresa al cauce del Río Grande de Arecibo y al Río Tanamá en forma de manantiales, que ayudan a mantener el flujo (USGS, 1996).

El río Grande de Manatí cuenta con un caudal medio anual de 6.99 m³/s y una aportación media anual de 220 hm³. Las rocas de origen volcánico son de poca porosidad por lo que su capacidad de almacenar agua queda sólo en sus fracturas. No obstante, las rocas calizas de la cuenca son de alta permeabilidad y junto con los depósitos aluviales del valle representan las zonas más productivas para los acuíferos de la Región Norte (USGS, 1978). El Servicio Geológico de los EEUU estima que en la cuenca se infiltran 1032 mm de lluvia al año en los acuíferos de la franja de rocas calizas y aluvión en la parte no confinada del Acuífero Inferior.

Ambos ríos muestran un régimen pluvial-tropical con dos estaciones, una seca y otra con caudal abundante. Presentan una disminución progresiva en el caudal al comienzo del año hidrológico en el hemisferio norte, que dura hasta la primavera. Llegada la primavera (a partir de marzo) se nota un aumento en su caudal hasta alcanzar un pico en mayo. Junio y julio muestran una pequeña disminución de las aguas volviendo a ganar caudal desde agosto hasta octubre cuando alcanza su caudal máximo mensual.

El Río Tanamá muestra un coeficiente de variación diario de 139.3% considerado muy alto. El caudal diario máximo del Río Tanamá mostró valores de 92.31 m³/s el 22 de septiembre de 1998, 62 veces superior a la media. Los meses de primavera son los meses que muestran una variabilidad anual más alta, y abril es el mes que presenta el valor más alto con un 76.4% de coeficiente de variación, considerado alto. Febrero es el mes con una variabilidad más baja, 31.4%, considerada media (tabla 4).

El Río Grande de Manatí muestra un coeficiente de variación diario de 298%, considerado muy alto. Cabe mencionar que su caudal medio

es de 6.99 m³/s, mientras su caudal diario máximo alcanzó valores de 1209 m³/s el 18 de mayo de 1985, 173 veces el valor medio. En este río, todos los meses muestran una variabilidad por encima del 55%, considerada alta. Octubre es el mes que presenta el caudal medio más alto con 12.1 m³/s y una variabilidad de 99.3%. Le sigue el mes de mayo que cuenta con un caudal medio de 11.9 m³/s y una variabilidad de 107.8% considerada muy alta (tabla 4).

Tabla 4. Datos de Caudal (Q) medio, caudal relativo, coeficiente de variación (CV) y caudal específico. Río Tanamá (1960-2004)

Periodo	Q Medio (m ³ /seg) Río Tanamá	C.V.% Río Tanamá	Q Medio (m ³ /seg) Río Grande Manatí	C.V.% Río Grande de Manatí
Anual	1.38	55.7	6.99	46.6
Octubre	2.31	43.9	12.14	99.3
Noviembre	2.02	45.6	11.00	73.7
Diciembre	1.24	46.1	7.20	97.6
Enero	0.87	36.9	5.00	65.7
Febrero	0.73	31.4	3.74	55.1
Marzo	0.71	47.5	3.90	71.0
Abril	1.07	76.4	7.53	84.3
Mayo	1.66	69.9	11.91	107.8
Junio	1.26	49.4	4.40	77.1
Julio	1.03	39.0	2.90	65.2
Agosto	1.34	41.8	4.00	123.8
Septiembre	2.18	51.4	9.04	84.8

4. Metodología

Para realizar este análisis se utilizaron cinco estaciones meteorológicas, una estación termométrica y una estación hidrológica para cada cuenca. Las estaciones meteorológicas pertenecen a la agencia federal NOAA, *Southeast Regional Climate Center* y las estaciones hidrológicas pertenecen al USGS *Water Resources Center of the United States, Surface-Water data for Puerto Rico*.

Se trabajó con datos diarios, mensuales y anuales, totales y medios pluviométricos, termométricos e hidrológicos para los periodos de cada estación. Algunas estaciones cuentan con un registro de datos desde 1948 hasta el 2004, sin embargo no todas cumplen con este periodo. De tal manera, para el análisis global se calculó una media por cada cuenca para el periodo de 1970-2001. Con los valores medios mensuales y anuales se realizaron análisis de tendencias. Debido a la ubicación geográfica de la estación Montebello, la correlación que muestra con las demás estaciones y la distancia a la que se encuentra de los límites fronterizos de las dos cuencas se ha utilizado para ambas zonas de estudio.

Para el análisis de tendencias se usó el estadístico Rho de Spearman y el de Mann-Kendall (Yue et al. 2001). Ambos estadísticos son pruebas no-paramétricas robustas. El Rho de Spearman (r_s) varía entre -1 y 1, donde 1 es correlación positiva perfecta y -1 es correlación negativa perfecta y cero significa la ausencia de correlación (Cruz Báez, 2006). El Mann-Kendall también indicará si existe tendencia negativa o positiva en cuanto a las precipitaciones, temperaturas y caudales (USGS, 1997; Yue et al. 2001; EPA, 2006; Carlón Allende y Mendoza, 2007; Ceballos Barbancho et al. 2007; Hamed, 2007; McBean and Hootie, 2008). La prueba se mide con el valor S y para una serie de datos $n > 10$, también se utiliza el estadístico Z . Si S muestra un valor altamente positivo entonces muestra claramente una tendencia positiva, si por el contrario, S muestra un valor altamente negativo entonces muestra una tendencia claramente negativa. Valores obtenidos $|Z| > 1.96$, a un nivel de significación de 0.05, indican que se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

También se realizaron análisis de regresión para cuantificar las anomalías de las variables. Algunas estaciones necesitaron relleno de lagunas para datos ausentes. Éstos se realizaron con la estimación de estaciones vecinas donde el coeficiente de correlación entre las estaciones no fuera menor de $r_s = 0.7$, con una significación estadística de 0.05 como se recomienda (González Hidalgo et al. 2002).

5. Resultados y Discusión

En cuanto a la precipitación, en la cuenca del Río Grande de Arecibo se encontró que de cinco estaciones utilizadas, tres de ellas mostraron tendencias regresivas con el estadístico Rho Spearman (tabla) y dos

presentaron valores positivos, sin embargo son valores muy cercanos a cero y carentes de significación estadística. En la cuenca del Río Grande de Manatí, cuatro de cinco estaciones mostraron tendencias regresivas con el estadístico Rho Spearman (tabla 5). No obstante, también son valores muy cercanos a cero y carentes de significación estadística. De esta manera, la cuenca del Río Grande de Arecibo presenta un coeficiente de correlación $r_s = 0.07$ y $r_g = 0.02$ en la cuenca del Río Grande de Manatí, las dos carecen de significación estadística. Estos datos han sido confirmados con el estadístico Mann-Kendall. En la cuenca del Río Grande de Arecibo: Dos Bocas, Montebello y Adjuntas 1NW han mostrado tendencias regresivas para la precipitación con Mann-Kendall al igual que con Rho Spearman. Además, en Adjuntas 1NW y Dos Bocas, se pudo rechazar la hipótesis nula de no tendencia con valores $|Z| > 1.96$. Por otro lado, aunque a nivel global la cuenca del Río Grande de Arecibo mostró tendencias positivas con ambos análisis estadísticos (Rho Spearman y Mann-Kendall), ninguno de ellos presentó valores significativos, por lo cual no se puede establecer una tendencia clara de la precipitación en dicha cuenca.

Tabla 5. Coeficiente de correlación entre el tiempo y precipitación total anual para cada cuenca y estación

Estación (periodo)	Código	Rho de Spearman	Significación Estadística	C.V. %	Precip. Med Anual (mm)
Cuenca del Río Grande de Arecibo (1970-2001)	N/A	0.07	N	18.2	1966.0
Dos Bocas (1948-2006)	663431	-0.04	N	17.1	1937.3
Adjuntas 1NW (1955-2006)	660053	-0.02	N	19.8	2006.8
Adjuntas Substation (1970-2006)	660061	0.32	N	19.0	1909.9
Cerro Maravilla (1970-2006)	6623366	0.28	N	20.4	2420.3
Montebello (1970-2001)	666270	-0.06	N	27.9	1558.9
Cuenca del Río Grande de Manatí (1970-2001)	N/A	0.02	N	17.9	1740.6
Corozal Substation (1955-2006)	662934	-0.06	N	22.0	1872.2
Aceituna (1955-2005)	660040	-0.15	N	23.9	1956.1
Morovis 1N (1957-2005)	666390	0.003	N	23.6	1803.4
Manatí 3E (1956-2005)	665807	-0.10	N	25.1	1512.5

N= valores no significativos

En la cuenca del Río Grande de Manatí (tabla 6), todas las estaciones mostraron tendencias regresivas con Mann-Kendall. Tres de ellas mostraron un valor $|Z| > 1.96$, por lo cual se pudo rechazar la hipótesis nula de no tendencia a un nivel de 0.05. Por otro lado, la cuenca del Río Grande de Manatí muestra una tendencia regresiva en el tiempo con Mann-Kendall y un valor $Z = -2.48$.

Tabla 6. Análisis de Mann-Kendall para la precipitación total anual en cada cuenca y por estación.

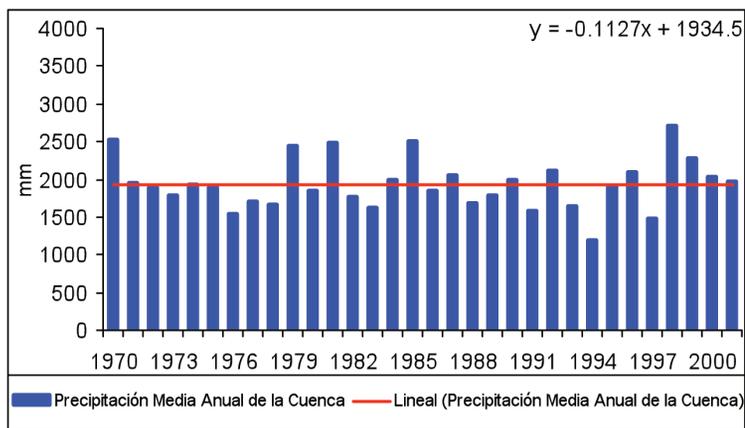
Estación	S de Kendall	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$	Valor p
Cuenca Río Grande de Arecibo	8	0.71	No	0.47
Dos Bocas	-51	-2.67	Si	0.007
Adjuntas 1NW	-40	-2.31	Si	0.02
Adjuntas Substation	136	12.71	Si	0.0001
Cerro Maravilla	122	9.59	Si	0.0001
Montebello	-16	-1.33	No	0.18
Cuenca Río Grande de Manatí	-28	-2.48	Si	0.01
Corozal Substation	-52	-4.61	Si	0.0001
Aceituna	-121	-6.79	Si	0.0001
Morovis 1N	-8	-0.43	No	0.66
Montebello	-16	-1.33	No	0.18
Manatí 3E	-101	-9.75	Si	0.0001

$|Z| > 1.96$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia

Valor $p < 0.05$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia

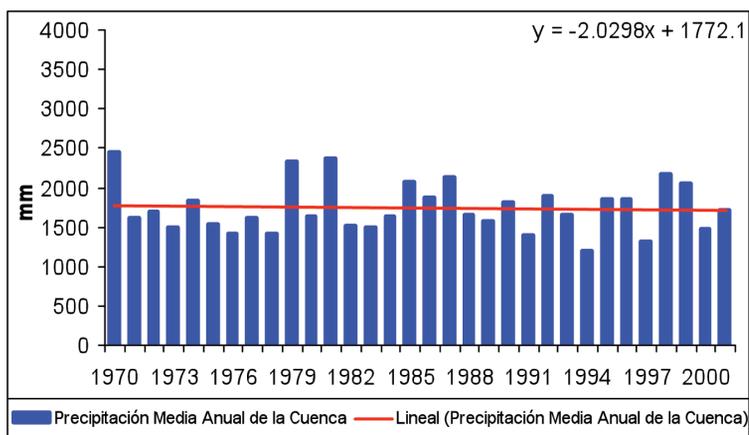
Como se puede observar en los análisis de regresión (Figura 6) para la precipitación media anual en la cuenca del Río Grande de Arecibo, ésta no presenta tendencia significativa, mientras que para la cuenca del Río Grande de Manatí (Figura 7) se aprecia una ligera tendencia regresiva como se mostraba con Mann-Kendall. En cierta forma, puede que la variabilidad interanual que han mostrado las cuencas, un 18% de coeficiente de variación (C.V.) y, entre 30% y el 65% en algunos meses, haya influenciado en la detección de tendencias.

Figura 6. Evolución de la precipitación media anual en la cuenca del Río Grande de Arecibo. 1970-2001



(B)

Figura 7. Evolución de la precipitación media anual en la cuenca del Río Grande de Manatí. 1970-2001.



En el caso de las temperaturas, las cuencas muestran tendencias completamente opuestas (tabla 7). La cuenca del Río Grande de Arecibo mostró una disminución de las temperaturas para el periodo de análisis de

esta variable (1948-2006). El coeficiente de correlación entre el tiempo y la temperatura media anual en esta cuenca fue de $r_s = -0.42$, significativo a un nivel de 0.01. Por el contrario la cuenca del Río Grande de Manatí mostró un aumento de las mismas con un $r_s = 0.16$, aunque carece de significación estadística.

Tabla 7. Coeficiente de Correlación entre tiempo y temperatura media anual en ambas cuencas.

	Rho Spearman	Significación Estadística
Cuenca Río Grande de Arecibo, Dos Bocas	-0.42	**
Cuenca Río Grande de Manatí, Manatí 3E	0.16	N

** - valores significativos al nivel de 0.01

N – valores no significativos

El análisis de Mann-Kendall confirma ambas tendencias mostrando un valor $S = -494$, y un valor $Z = -22.83$ para la cuenca del Río Grande de Arecibo y un valor $S = 133$ con un valor $Z = 7.74$ en la cuenca del Río Grande de Manatí (tabla 8). De esta manera, en las dos cuencas se rechaza la hipótesis nula de no tendencia ya que sus valores $|Z|$ superan el valor crítico de $|Z| = 1.96$. Se detecta una clara tendencia regresiva de las temperaturas en la cuenca del Río Grande de Arecibo (Figura 8), mientras que en la cuenca del Río Grande de Manatí, se observa un aumento de las mismas (Figura 9).

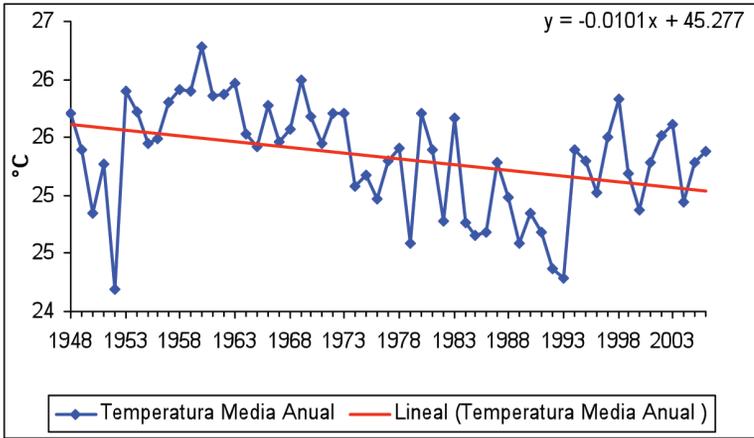
Tabla 8. Análisis de Mann-Kendall para la temperatura media anual.

Estación	S de Kendall	Z	Rechazo de hipótesis nula $p < 0.05$	Valor p
RGA Dos Bocas	-494	-22.83	Si	0.0001
RGM Manatí 3E	133	7.74	Si	0.0001

$|Z| > 1.96$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia

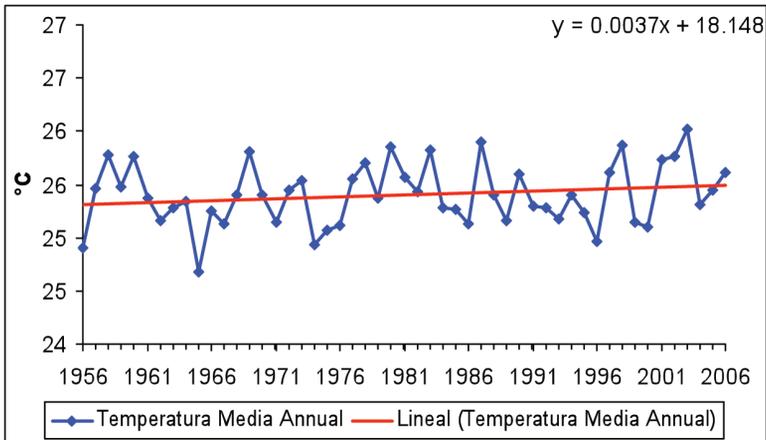
Valor $p < 0.05$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia

Figura 8. Evolución de la Temperatura media anual.



Cuenca Río Grande de Arecibo, 1948-2006.

Figura 9. Evolución de la Temperatura media anual.



Cuenca Río Grande de Manatí, 1956-2006

Según el IPCC (2007), la variabilidad interanual en las islas del Caribe está muy influenciada por el fenómeno ENOS (El Niño). En un estudio

realizado en El Salvador se encontró que, de 16 estaciones pluviométricas utilizadas, 10 presentaron disminución, cinco mostraron aumento y en una no se pudo detectar tendencia (Erazo Chica, 2006). Esta misma incertidumbre en cuanto a la precipitación en El Salvador se ha evidenciado en el trabajo del MMARN (1998). En la isla de Cuba también se ha llegado a conclusiones similares en cuanto a las tendencias de la precipitación. Algunos modelos indican para esa isla una reducción de la precipitación total anual, y otros muestran un incremento (Centella et al. 2000). Además, muchos modelos climáticos indican un proceso de sequía sobre la parte de Centro América y en las islas del Caribe, siendo más acusado en el continente que en las islas (Hulme y Sheard, 1999).

Según Peterson et al. (2002), el clima en la Región del Caribe está cambiando y el rango de las temperaturas extremas interanual ha decrecido. Estos cambios en las temperaturas hay que tenerlos en consideración pues ello puede causar alteraciones en la evapotranspiración, la humedad edáfica y la infiltración (IPCC, 2000). Otras investigaciones afirman que la región del Caribe, considerada como un todo, se calienta ligeramente más despacio que el promedio global, siendo más acusado el calentamiento en las tierras elevadas de México y menor en las islas del Caribe y Centro América (Hulme y Sheard, 1999). En la isla de Cuba se proyecta que en un futuro, la temperatura media anual del aire pudiera verse incrementada entre 1.6°C y 2.5°C para el año 2100 (Centella et al. 2000). Se estima que el incremento de la temperatura en Cuba puede ser tan importante, que aún en los casos donde haya ocurrido un aumento de las precipitaciones, podría ocurrir una intensificación y expansión de los procesos de aridez y sequía como consecuencia del incremento de la evaporación (Centella et al. 2000).

Respecto a las tendencias de la aportación de los ríos, Río Tanamá y Río Grande de Manatí, ambos muestran tendencias regresivas en el tiempo con Rho Spearman y Mann-Kendall. Con Rho Spearman, ninguno obtuvo valores significativos (tabla 9), pudiéndose enmascarar también la tendencia debido a la alta variabilidad interanual que mostraron los ríos, 56% de coeficiente de variación en el Río Tanamá y 46% en el Río Grande de Manatí. Algunos meses llegaron a alcanzar una variabilidad interanual

de hasta 76% y 107%. Por el contrario, con Mann-Kendall se pudo rechazar la hipótesis nula de no tendencia en los dos ríos (tabla 10) y muestran claramente una tendencia regresiva perceptible también en el análisis de regresión (Figura 10 y 11).

Tabla 9. Coeficiente de Correlación entre tiempo y aportación anual en ambos ríos. 1960-2004.

Estación	Rho Spearman	Significación Estadística	Aportación Media Anual (hm ³)
Río Tanamá NR Utuado	-0.05	N	43.5
Río Grande de Manatí at Ciales	-0.15	N	220.0

N – valores no significativos

Tabla 10. Análisis de Mann-Kendall para la aportación anual en ambos ríos. 1960-2004.

Estación	S de Kendall	Z	Rechazo de hipótesis nula $p < 0.05$	Valor p
Río Tanamá NR Utuado	-38	-2.88	Si	0.002
Río Grande de Manatí at Ciales	-98	-5.77	Si	0.0001

$|Z| > 1.96$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia

Valor $p < 0.05$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia

Figura 10. Aportación Anual, representación de la mediana y línea de tendencia. Río Tanamá, 1960-2004

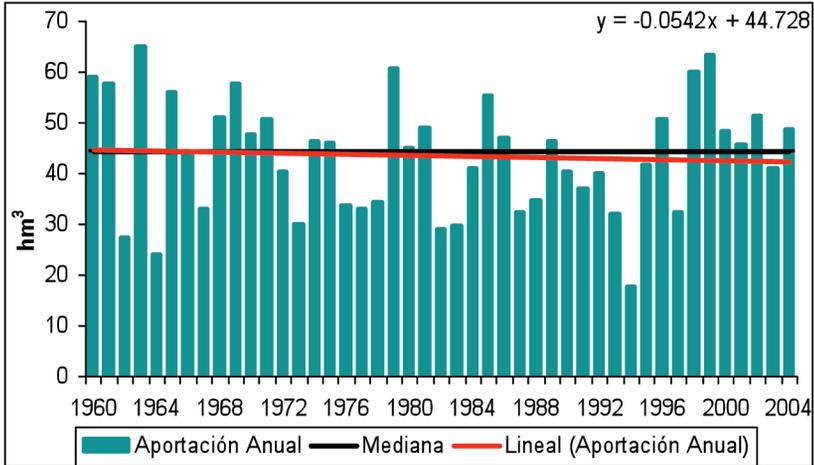
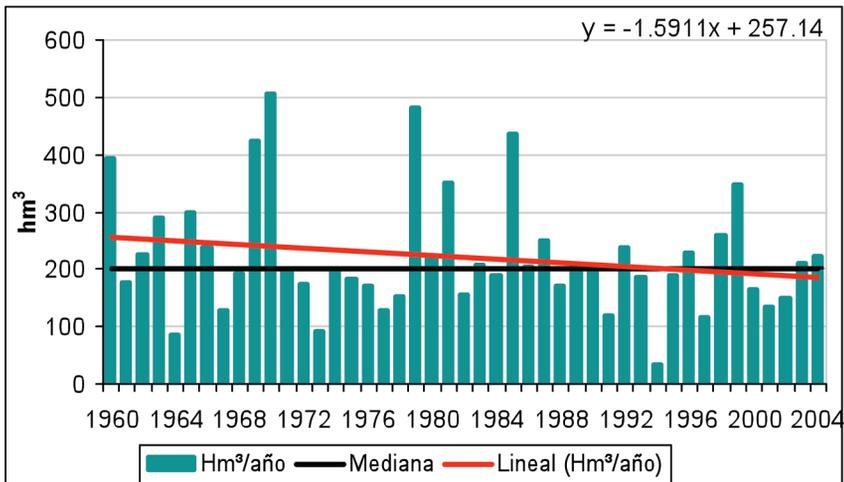


Figura 11. Aportación Anual, representación de la mediana y línea de tendencia. Río Grande de Manatí



6. Conclusión

En relación con la tendencia de la precipitación, a escala anual, con el estadístico Rho Spearman no se pudo detectar una tendencia clara, ya que ambas cuencas presentan valores positivos pero muy cercanos a cero. La cuenca del Río Grande de Manatí muestra una tendencia regresiva en el tiempo con Mann-Kendall, mientras que la cuenca del Río Grande de Arecibo exhibe valores positivos con los que no se pudo rechazar la hipótesis nula de no tendencia. Debido a estos resultados no se puede establecer tendencias claras de disminución o incremento de las precipitaciones en la región hidrográfica.

En cuanto a las tendencias de la temperatura, se obtuvieron direcciones completamente opuestas en ambas cuencas con los estadísticos Rho Spearman y Mann-Kendall. La cuenca del Río Grande de Manatí mostró una tendencia positiva con ambos análisis estadísticos, sin embargo, con Rho Spearman no muestra valores significativos. Con Mann-Kendall, se pudo rechazar la hipótesis nula de no tendencia. En la cuenca del Río Grande de Arecibo se observa una tendencia regresiva de las temperaturas en el tiempo con ambos análisis. El Rho Spearman mostró valores negativos claramente significativos y con el Mann-Kendall quedó también rechazada la hipótesis nula de no tendencia. De esta forma, tampoco se puede establecer una tendencia clara de la temperatura en la región hidrográfica ya que una cuenca muestra un aumento y otra presenta una disminución.

Referente a la aportación, ambos ríos muestran tendencias regresivas en el tiempo con los dos análisis estadísticos. Ninguno presenta valores significativos con el análisis Rho Spearman, aunque puede que la alta variabilidad que mostraron los dos ríos (que alcanzan hasta el 100% de coeficiente de variación) oculte en alguna medida dicha tendencia. Por el contrario, con Mann-Kendall sí se pudo rechazar claramente la hipótesis nula de no tendencia en los dos ríos. También se pudo observar una ligera tendencia positiva en la variabilidad de ambos cauces con el análisis de regresión y con el estadístico Rho Spearman ($r_s = 0.22$ en el Río Tanamá y $r_s = 0.23$ en el Río Grande de Manatí). Con éstos resultados obtenidos, queda establecido que la Región Cibuco-Guajataca muestra una tendencia a la disminución de los volúmenes de aguas de escorrentía y un ligero aumento de la variabilidad anual. Esto nos hace observar los valores obtenidos con la ETP debido a que la precipitación media anual en la cuenca del

Río Grande de Manatí fue de 1740 mm y la ETP alcanza valores de 1477 mm anuales, un 84% del agua precipitada. Mientras, en la cuenca del Río Grande de Arecibo precipita una media ponderada de 1966 mm anuales, la ETP alcanza valores de 1461 mm, un 74% de lo que precipita. Por esta razón, los resultados de las temperaturas se han de tomar con prudencia, de manera que, aunque las precipitaciones no muestren tendencias regresivas, un leve aumento de la temperatura (lo que indica mayor evaporación), serían condiciones que pueden crear una tendencia regresiva en los volúmenes de agua en ambos ríos. Esto podría evidenciar, de una manera u otra, que las variables climáticas (temperatura) están condicionando e influyen en el comportamiento hidrológico de dichas cuencas. Sin embargo, es de conocimiento común que la evapotranspiración actual está condicionada por la proporción relativa y tiempo de la disponibilidad del agua, energía disponible y sobre todo el tipo y condiciones de la cubierta vegetal (Tomer y Schilling, 2009).

Ambas cuencas abarcan distintos tipos de bosque tropical entre ellos, bosque muy húmedo montaña abajo. Los bosques tropicales representan una región donde la demanda climática probablemente limita la evaporación forestal (Calder, 1998). En un área forestal de alta interceptación suele haber una pérdida de agua por transpiración mucho más elevada que en los bosques maduros primarios (superficie mucho más aclarada), donde ocurre menor pérdida por transpiración (The National Academies, 2008). Es por todo esto que, a través de este análisis no se puede asegurar que quede completamente explicado el comportamiento hidrológico y las tendencias que mostraron los ríos en estudio debido al comportamiento de la precipitación y de la temperatura. Se pudieron justificar algunos aspectos relacionados entre precipitación y aportación, aún así, no se consiguió argumentar de la misma manera en el caso de las tendencias.

Por otro lado, un estudio más exhaustivo para establecer tendencias e impactos sobre los recursos hídricos se puede realizar si se toma en consideración la transformación que ha sufrido el paisaje puertorriqueño en la historia (abandono de tierras agrícolas, urbanización, deforestación). Es de conocimiento común que todos estos factores deben tomarse en consideración para detectar cambios y establecer los impactos que puede causar la transformación del paisaje sobre los recursos hídricos.

A la luz de los resultados de este trabajo, los factores climáticos por sí solos, no pueden explicar las variaciones que se están produciendo en los caudales circundantes de los ríos estudiados. Por esta razón, se hace necesario abarcar el estudio de esos otros factores mencionados y poder establecer así las pautas que permitan hacer una adecuada gestión del territorio que favorezca en cualquier caso, el mantenimiento del buen estado de los recursos hídricos de la zona de estudio, en particular, y de Puerto Rico en general.

7. Referencias:

- Aksoy, H., Erdem Unal, N., Vesselin Alexandrov, Snejana Dakova and Jaeyoung Yoon. (2007). "Hydrometeorological Analysis of northwestern Turkey with links to climate change". En: *International Journal of Climatology* (2007). DOI: 10.1002/joc.1599
- Allan, R. P., Soden, B. J. (2007). "Large discrepancy between observed and simulated precipitation in the ascending and descending branches of the tropical circulation". En: *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L18705, doi:10.1029/2007/GL031460, 2007.
- Carlón Allende, T. y Mendoza, M. E. (2007). "Análisis hidrometeorológico de las estaciones del Lago de Cuitzeo". En: *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM*. ISSN 0188-4611, Núm. 63, pp. 56-76.
- Calder, I.R. (1998). "Water use by forest, limits and controls". En: *Tree Physiology* 18, 625-631.
- Ceballos B., A., Morán T., E., Luengo U., M. A. And Llorente P., J. M. (2007). "Water resources and environmental change in a Mediterranean environment: The south-west sector of the Duero River Basin (Spain)". En: *Journal of Hydrology*. (2008) 351, 126-138.
- Centella, A., Llanes, J., Paz, L., López, C y Limia, M. (eds.). (2000). *Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. República de Cuba. 166pp.
- Crúz B., A. (2006). *Introducción a la Estadística Elemental para Geografía*. Departamento de Geografía, Colegio de Ciencias Sociales. Universidad de Puerto Rico-Río Piedras. 159pp.

- Erazo Ch., A. M. (2006). *Variaciones hidroclimáticas o evidencias de cambio climático en El Salvador*. Servicio Nacional de Estudios Territoriales. SNET 14 pp.
- García J., M., Berguería P., S., López M., J. I., Lorente G., A. y Seeger, M. (2001). *Los Recursos Hídricos superficiales del Pirineo Aragonés y su Evolución Reciente*. Geoformas Ediciones. 192pp.
- González H., J. C., Vicente, S. M., De Luis, M., Štěpánek, P., Cuadrat, J. M., Raventós, J. y Sánchez M., J. R. (2002). *Reconstrucción de registros pluviales y creación de una base de datos mensuales en la vertiente mediterránea española*. 10pp
- Hamed, K. H. (2007). "Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis". En: *Journal of Hydrology*. (2008) 349, 350-363.
- Hulme, M y Sheard, N. (1999). *Escenario de Cambio Climático para Mesoamerica*. Unidad de Investigación Climática, Norwich, Reino Unido, 6pp.
- Intergubernamental Panel on Climate Change. (IPCC). (2000). *Special Report on the Regional Impacts of Climate Change*. Edited By: Watson, R.T., Zinyowera, M. C. and Moss, R. H.
- Intergubernamental Panel on Climate Change. (IPCC). (2007). *Climate Change 2007. Working Group II Report. "Impacts, Adaptation and Vulnerability"*. 978 0521 70597-4 Paperback. Edited By: Parry, M., Canziani, O., Palutikof, J., van der Linden, P. and Hanson, C. 696pp.
- Mcbean, E. and Mootie, H. (2008). "Assessment of impact of climate change on water resources: a long term analysis of the Great Lake of North America". En: *Hydrology and Earth System Sciences*. 12, 239-255.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MMARN). Primera Comunicación Nacional de Cambio Climático. (1998). "Escenarios de Cambio Climático para la evaluación de los impactos en El Salvador". (eds.) Centella Artola, A., Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología de Cuba, 26pp
- Neelin, J. D., Münich, M., SU, H., Meyerson, J. E. and Holloway, C. E. (2006). "Tropical drying trends in global warming models and observations". En: *Proceedings of the National Academy of Science of the United State of America (PNAS)*. Communicated by James C.

- McWilliams, University of California, Los Angeles. Vol. 103, n° 16, 6110-6115.
- Peterson, T. C., Taylor, M. A., Demeritte, R., Duncombe, D. L., Burton, S., Thompson, F., Porter, A., Mercedes, M., Villegas, E., Semexant Fils, R., Klein Tank, A., Martis, A., Warner, R., Joyette, A., Mills, W., Alexander, L. and Gleason, B. (2002). "Recent changes in climate extreme in the Caribbean region". En: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, NO. D21, 4106, 2002.
- Saladié, O., Brunet, M., Aguilar, E. sigró, J. y López, D. (2002). *Evolución de la Precipitación en el sector suroriental de la depresión del Ebro durante la segunda mitad del siglo XX*. Grupo de Investigación del Cambio Climático. Unitat de Geografia. Univesitat Rovira y Virgili. Tarragona. 335-346.
- The National Academies. (2008). "Hydrologic effects of a Changing Forest Landscape" Report in Brief. 2008 The National Academy of Sciences.
- Tomer, M.D, Schilling, K.E. (2009). "A simple approach to distinguish land-use and climate change effects on watershed hydrology". En: *Journal of Hydrology* 376 (2009) 24-33.
- US Department of Interior: United States Geological Survey (USGS). (1997). *Analysis of minimum 7-day discharges and estimation of minimum of 7-day, 2-year discharge for streamflow-gaging stations in the Brazos river basin, Texas*. Water Resources Investigation Report 97-4117. Prepared in cooperation with the Brazos River authority. By: Timothy H. Raines and William H. Asquith.
- US Environmental Protection Agency (EPA). Office of Environmental Information Wahington. (2006). *Data Quality Assessment: Statistical Methods for Practitioners*. EPA QA/G-9S. EPA/240/B-06/003. February 2006. 198pp.
- Yue, S., Pilon, P. And Cavadias, G. (2001). "Power of Mann-Kendall and Spearman's rho test for detecting monotonic trends in hydrological series". En: *Journal of Hydrology*. 259 (2002) 254-271.