



**ANÁLISIS DE TENDENCIAS
HIDROCLIMÁTICAS RECIENTES
Y TRANSFORMACIÓN DEL PAISAJE
EN LA ISLA DE PUERTO RICO**



PABLO A. MÉNDEZ LÁZARO



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

**TENDENCIAS HIDROCLIMÁTICAS
RECIENTES Y TRANSFORMACIÓN
DEL PAISAJE EN LA ISLA DE
PUERTO RICO**

Doctorando: Pablo A. Méndez Lázaro
Director: José Martínez Fernández
Departamento: Geografía

Salamanca, octubre 2010

Fotografía de Portada:
Municipio de Utuado, PUERTO RICO



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

**PROGRAMA DOCTORAL: MANEJO Y CONSERVACIÓN
DE RECURSOS NATURALES. APLICACIÓN A LA GESTIÓN
AMBIENTAL**

**TENDENCIAS HIDROCLIMÁTICAS RECIENTES
Y TRANSFORMACIÓN DEL PAISAJE
EN LA ISLA DE PUERTO RICO**

Memoria presentada por el Licenciado en Geografía
Pablo A. Méndez Lázaro para optar al **Título de Doctor**

Salamanca, octubre de 2010

Pablo A. Méndez Lázaro



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

**DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**

D. JOSÉ MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, Profesor Titular de Geografía Física en la Universidad de Salamanca, autoriza la memoria **“TENDENCIAS HIDROCLIMÁTICAS RECIENTES Y TRANSFORMACIÓN DEL PAISAJE EN LA ISLA DE PUERTO RICO”** realizada por el Licenciado en Geografía **D. PABLO A. MÉNDEZ LÁZARO** para optar al Título de Doctor.

Salamanca, octubre de 2010

Dr. José Martínez Fernández

Dedicada a la memoria de mi hermano y mi padre.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. José Martínez Fernández por su comprensión, su apoyo académico y personal. En testimonio de gratitud, le doy las gracias por haberme orientado, guiado y estimulado en momentos de dificultad, por haber compartido conmigo su conocimiento profesional docente y su habilidad investigadora, y por haber formado parte de la inspiración que necesitaba para realizar este proyecto.

También quisiera agradecer a todos los miembros del Grupo de Investigación en Recursos Hídricos (HIDRUS) del Centro Hispano-Luso de Investigaciones Agrarias en la Universidad de Salamanca. Le agradezco también a todo el equipo de trabajo en el Departamento de Salud Ambiental de la Universidad de Puerto Rico-Recinto de Ciencias Médicas, Escuela Graduada de Salud Pública y en especial al Dr. José Seguinot Barbosa, porque gracias al apoyo que me ha brindado desde el comienzo de mi carrera universitaria, he llegado a concretar grandes metas en mi vida.

Al Ing. Alberto Lázaro de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, Ing. Carlos Paniagua de la agencia *US Environmental Protection Agency* y la Sra. Nora Álvarez, de la División de Informática en el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales por haberme ayudado a obtener mucha de la información, datos y fotografías aéreas que se utilizaron en este trabajo.

Al grupo de profesores del programa doctoral “Manejo y Conservación de Recursos Naturales. Aplicación a la Gestión Ambiental” por haber sido parte de mi formación académica y profesional en esta universidad. Especialmente le agradezco a la coordinadora del programa, la Dra. María Isabel González Hernández.

A mis padres y toda mi familia, por su apoyo incondicional y su comprensión durante mi formación académica, a mi esposa Caroline y la familia Larminaux. *Merci pour votre soutien moral et vos encouragements. Merci Juliette.*

De igual forma, agradezco a todas las amistades de Salamanca (sin mencionar nombre por el miedo que se me olvide alguno), quienes hicieron de la ciudad un lugar grandioso, facilitaron la estancia e hicieron de cada día en este país uno inolvidable.

Muchas Gracias a todos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	PÁGINAS
1. INTRODUCCIÓN	23
2. OBJETIVOS	33
2.1 Hipótesis de partida y objetivo general	33
2.2 Objetivos Específicos	34
3. CONTEXTO GEOGRÁFICO	37
3.1 Contexto Histórico de Puerto Rico	37
3.2 Características Socio-políticas de Puerto Rico	40
3.3 Características físicas de Puerto Rico	43
3.3.1 Clima: Puerto Rico	43
3.3.2 Relieve y Topografía de Puerto Rico	46
3.3.3 Geología y Geomorfología de Puerto Rico	47
3.3.3a <i>Regiones Geomorfológicas Principales</i>	47
3.3.4 Biogeografía: Puerto Rico	50
3.3.5 Usos de Suelo de Puerto Rico	52
3.3.6 Recursos Hídricos de Puerto Rico	54
3.3.6a <i>Recursos Hídricos Superficiales</i>	54
3.3.6b <i>Recursos Hídricos Subterráneos</i>	57
4. MATERIALES Y MÉTODOS	62
4.1 Materiales	63
4.2 Métodos	66
4.2.1 Análisis Climatológico	66
4.2.2 Análisis Hidrológico	73
4.2.3 Transformación del Paisaje y usos de suelo	74
5. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	83

5.1 Características de la Cuenca del Río Grande de Arecibo.....	84
5.1.1 Relieve y Topografía	84
5.1.2 Geología y Geomorfología	84
5.1.3 Clima	85
5.1.4 Hidrología.....	87
5.1.5 Biogeografía	87
5.1.6 Usos de suelo y Población.....	88
5.2 Características de la Cuenca del Río Grande de Manatí.....	89
5.2.1 Relieve y Topografía	89
5.2.2 Geología y Geomorfología	89
5.2.3 Clima	90
5.2.4 Hidrología.....	91
5.2.5 Biogeografía	92
5.2.6 Usos de suelo y Población.....	92
5.3 Características de la Cuenca del Río Fajardo.....	94
5.3.1 Relieve y Topografía	94
5.3.2 Geología y Geomorfología	94
5.3.3 Clima	95
5.3.4 Hidrología.....	96
5.3.5 Biogeografía	96
5.3.6 Usos de Suelo y Población	97
5.4 Características de la Cuenca del Río Culebrinas	99
5.4.1 Relieve y Topografía	99
5.4.2 Geología y Geomorfología	99
5.4.3 Clima	100

5.4.4 Hidrología.....	101
5.4.5 Biogeografía y Suelos.....	101
5.4.5 Usos de Suelo y Población	102
6. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE PUERTO RICO	105
6.1 Precipitación de Puerto Rico	105
6.1.1 Precipitación: Cuenca Río Grande de Arecibo.....	109
6.1.2 Precipitación: Cuenca del Río Grande de Manatí	116
6.1.3 Precipitación: Cuenca Río Culebrinas.....	120
6.1.4 Precipitación: Cuenca Río Fajardo	124
6.2 Temperatura de Puerto Rico	128
6.2.1 Temperatura: Cuenca Río Grande de Arecibo	130
6.2.2 Temperatura: Cuenca del Río Grande de Manatí	131
6.2.3 Temperatura: Cuenca del Río Culebrinas.....	132
6.2.4 Temperatura: Cuenca del Río Fajardo.....	133
6.3 Características Climáticas. Evapotranspiración Potencial (ETP).....	136
6.3.1 ETP. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	138
6.3.2 ETP. Cuenca Río Grande de Manatí	139
6.3.3 ETP. Cuenca Río Culebrinas.....	140
6.3.4 ETP. Cuenca Río Fajardo	141
7. ANÁLISIS DE TENDENCIAS CLIMÁTICAS EN PUERTO RICO	145
7.1 Tendencias de la Precipitación anual en Puerto Rico.....	145
7.2 Tendencias de la precipitación mensual en Puerto Rico.	151
7.3 Tendencias de Precipitación por cuencas.....	155
7.3.1 Región Hidrográfica Cibuco-Guajataca	155
7.3.1a Cuenca del Río Grande Arecibo.....	155

7.3.1b Cuenca Río Grande de Manatí.....	161
7.3.2 Cuenca del Río Culebrinas	165
7.3.3 Cuenca del Río Fajardo	169
7.4 Análisis de Tendencias. Temperatura. Puerto Rico.....	174
8. CARACTERÍSTICAS Y ANÁLISIS DE TENDENCIAS HIDROLÓGICAS .	193
8.1 Características Hidrológicas: Cuenca Río Grande de Arecibo, Río Tanamá	193
8.1.1 Tendencias. Río Tanamá	198
8.2 Características Hidrológicas: Cuenca Río Grande de Manatí.....	201
8.2.1 Tendencias. Río Grande de Manatí	207
8.3 Características Hidrológicas: Cuenca Río Culebrinas.....	210
8.3.1 Tendencias. Río Culebrinas.....	215
8.4 Características Hidrológicas. Río Fajardo.....	219
8.4.1 Tendencia. Río Fajardo.	224
9. TRANSFORMACIÓN PAISAJÍSTICA Y CAMBIOS DE USO DE SUELO EN LA ISLA DE PUERTO RICO.....	231
9.1 Población, paisaje y usos de suelo	231
9.1.1 Cuenca Río Grande de Arecibo.....	236
9.1.2 Cuenca Río Grande de Manatí	243
9.1.3 Cuenca Del Río Culebrinas	251
9.1.4 Cuenca Río Fajardo	257
9.2 Consideraciones sobre los cambios paisajísticos y usos de suelo en la isla..	264
10. EVOLUCIÓN HIDROCLIMÁTICA Y CAMBIOS PAISAJÍSTICOS.....	271
10.1 Análisis y Evolución de la Precipitación.....	271
10.2 Análisis y Evolución de la Temperatura	275

10.3 Análisis y Evolución Hidrológica	279
10.4 Relación entre precipitación y aportación.....	285
10.5 Evolución de los usos del suelo	289
10.6 Discusión y análisis de las relaciones entre las variables estudiadas.....	291
11. CONCLUSIONES	299
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	305
LISTA DE FIGURAS.....	329
LISTA DE TABLAS.....	348
LISTA DE FOTOS	359
LISTA DE ACRÓNIMOS	362

1. INTRODUCCIÓN



Embalse Guajataba, PUERTO RICO

1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales más preciados para el ser humano y su entorno. De él depende toda la vida sobre la Tierra. Este recurso es de vital importancia para el desarrollo de culturas, pueblos y ciudades siendo el recurso más básico de las necesidades humanas. Aún así la mala gestión y el manejo inapropiado del agua, a pesar de ésta ser considerada como un recurso renovable, pueden reducir la cantidad disponible y utilizable de este recurso (DRNA, 2007).

Las aguas continentales representan menos del 1% de los recursos hídricos del planeta. Un 97% de este recurso se encuentra en el océano y el 2% restante se encuentra en forma de glaciares, nieve y hielo; no obstante son las aguas continentales las que son desproporcionalmente importantes para el ser humano. Se estima que el agua dulce representa sólo un 2.5% de los recursos hídricos del planeta. Este porcentaje se subdivide de la siguiente forma: 0.3% del agua dulce mundial se encuentra en lagos y reservas, el 30.8% del agua dulce mundial es subterránea en forma de acuíferos y por último el 68.9% del agua dulce mundial se encuentra en formas de glaciares y cubierta de nieve permanente (Diop y Rekecewicz, 2007). Debido a estas características especiales del agua dulce se suele decir de forma general que el agua es un recurso abundante pero poco accesible para el ser humano.

Las cuencas hidrográficas integran todas las aguas superficiales de un sistema de drenaje natural y cumplen un papel importante como fuente de alimento, abastecimiento de agua, energía, recreación y transporte. Estos flujos de agua son cruciales para la salud y productividad de estuarios y aguas costeras, por lo cual las cuencas también proveen una unión crucial entre Tierra, Mar y Atmósfera. Sin embargo son las áreas litorales las que más actividades generan a nivel mundial.

En la actualidad la población mundial crece, aumenta el desarrollo urbano, se transforma el paisaje, aumenta la demanda por los recursos, se cambia el uso del suelo, se deforesta y se fomenta la necesidad de infraestructuras ante las necesidades humanas. Debido al desarrollo económico, este aumento fragmenta los paisajes, se construyen carreteras, puentes, presas, canalizaciones de ríos y diques, lo que altera el ciclo hidrológico, ciclo de sedimentación, erosión, nutrientes y escorrentías.

Debido a estas actuaciones se han tomado iniciativas tanto a escala internacional como a escala local. A escala global los recursos hídricos cuentan con gran variedad de iniciativas enfocadas en la gestión ambiental, desde los niveles internacionales, hasta los locales y regionales. En distintos países existen normativas y legislaciones encaminadas a desarrollar programas para la Gestión Ambiental y la Gestión de los Recursos Hídricos. Abundan las definiciones sobre estas disciplinas pero al menos todas ellas concuerdan en que la gestión ambiental es un proceso de manejo que persigue entre sus objetivos el desarrollo humano y, a la vez, trata de conservar los recursos culturales y naturales (Barragán, 2003). En otras palabras el objetivo principal es proteger y restaurar los recursos terrestres, hídricos, costeros y oceánicos para mantener sus funciones ecológicas, su herencia cultural y los beneficios sociales y ambientales.

Puede afirmarse que muchos programas existentes hoy en día, enfocados a temas medioambientales, se fundamentan en la conferencia realizada en 1972 en Estocolmo con el nombre de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

(PNUMA). Dos décadas después se realizó la Agenda 21, Río 92 en Brasil. En ella se resalta la necesidad de crear planes y programas basados en la Gestión Ambiental. Recientemente, el 12 de diciembre de 2002, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) declara el año 2003 como “Lanzamiento del Año Internacional del Agua Dulce”. Casi un año más tarde, 9 de febrero de 2004, la Resolución aprobada por la Asamblea General reafirma nuestro compromiso como ser humano de ordenar los recursos hídricos y declara “Decenio Internacional para la Acción, El Agua fuente de vida 2005-2015”. El mensaje dado por el Secretario General de la ONU con motivo del Día Mundial del Agua el 22 de marzo de 2005 fue dirigido a la gestión integrada de los recursos hídricos, la escasez, la salud, el medio ambiente, la prevención de desastres, la cultura, la energía y la agricultura.

Esta preocupación por los recursos hídricos también la comparte la Comunidad Europea con la Directiva Marco de Agua (DMA) 2000/60/EC del Parlamento Europeo y el Consejo del 23 de octubre de 2000. El propósito de esta directiva es: “(...) establecer un marco de protección de las aguas continentales, aguas en transición, aguas costeras y subterráneas” (Artículo 1, Directiva Marco de Agua 2000/60/EC). Dentro del territorio español, podemos usar como ejemplo a la Comunidad Autónoma de Cataluña. La Agencia Catalana del Agua junto con el Departamento de Ecología de la Universidad de Barcelona, han sido los responsables de la implantación de la DMA en las cuencas internas a su comunidad autónoma. En su ámbito de gestión queda explícito: “las aguas superficiales, las subterráneas, las costeras y las marinas que estén influenciadas por las aguas continentales de cada distrito” (Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient, I Habitatge, 2005).

En cuanto a los territorios como Puerto Rico, los problemas pueden llegar a acentuarse debido a sus características insulares. Las islas, a nivel mundial, están marcadas por varios factores tales como el aislamiento geográfico, su reducido tamaño territorial y su limitación de recursos naturales, entre ellos el agua. Debido a estos factores los territorios insulares son extremadamente vulnerables a los cambios y variaciones en el clima, en especial a las precipitaciones (IPCC, 2007b). Es de conocimiento común que estos factores que caracterizan a los sistemas insulares condicionan el paisaje y la cultura. Hoy en día, muchas islas cuentan con unos recursos muy amenazados y una amplia legislación para protegerlos y Puerto Rico no es la excepción.

En la misma isla de Puerto Rico, algunas regiones cuentan con abundancia de recursos hídricos mientras otras carecen de los mismos. Además, las distintas crisis que ha sufrido el país durante la historia como consecuencia de sequías, huracanes y deficiencias en las infraestructuras han creado la conciencia comunitaria sobre la necesidad de enfatizar medidas de conservación y protección sobre este recurso. El fin comunitario es suplir los diferentes tipos de uso y demanda que el país necesita (DRNA, 2007). Para cumplir con este programa se ha creado muy recientemente el Plan Integral de Recursos de Agua en marzo de 2007.

Ante el debate actual de Cambio Climático, el agua ha tomado aún más protagonismo a nivel regional y global. La comprensión y entendimiento en este tema son de gran interés científico y social. Hoy en día encabeza los discursos políticos y científicos globales donde resurgen los debates sobre los conflictos acerca de este recurso (la geopolítica del agua), la gestión (el hombre como hiper-consumidor de agua y el

derecho a ella), la contaminación y la polución (las actividades humanas que pueden poner en riesgo este recurso).

El miedo y la alta probabilidad de que este cambio y las actividades humanas produzcan una alteración en la atmósfera, afecten el clima regional o global y que esto repercuta sobre las economías y los ecosistemas naturales, fomentan la investigación en esta temática. También se ha renovado el interés por el estudio de las tendencias de los diferentes indicadores climáticos e hidrológicos. Muy especialmente la temperatura y la precipitación han sido objeto de análisis (Hulme y Sheard, 1999; Brunetti et al. 2000; Chrysoulaskyis et al. 2001; Peterson et al. 2002; Saladié et al. 2002; Xu et al. 2003; Bednorz y Kossowski, 2004; Guijarro, 2004; Martínez-Fernández et al. 2005; 2007; Erazo Chica, 2006; Partal y Kahya, 2006; Smadi y Zghoul, 2006; Allan y Soden, 2007).

Cuando se habla de cambio climático, entiéndase éste como lo define el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en 2007: “cambios en el estado del clima que pueden ser identificados (utilizando pruebas estadísticas) por cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades y que persisten por un periodo extenso, décadas o más. Se refiere a cualquier cambio del clima en el tiempo, ya sea por causas y variabilidad natural o como resultado de actividades humanas”. La ONU define el Cambio Climático de la siguiente manera: “cambio climático que es atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera global y que es en adición a las variabilidades observadas del clima natural sobre periodos comparables del tiempo”.

El Cambio Climático se ha convertido en uno de los mayores problemas mundiales que afrontan las comunidades científica y gubernamentales. En un futuro, éste puede fomentar impactos en la agricultura, (poniendo en riesgo la seguridad de los alimentos), la subida del nivel del mar y con ello la aceleración de la erosión costera, el incremento de los fenómenos atmosféricos, los desastres naturales y la extinción de ciertas especies.

Entre otros, se consideran como desastres naturales las inundaciones, las tormentas y las olas de calor. Aunque ha existido un incremento de los desastres naturales en las últimas décadas, se ha observado que también muchos de estos aumentos de catástrofes naturales están estrechamente relacionados a la alta densidad poblacional ubicada en zonas altamente propensas a estos desastres. Por lo cual se entiende que también ha aumentado la vulnerabilidad del ser humano ante estos sucesos.

No sólo los indicadores climáticos han servido para interpretar el cambio climático. Algunos de los indicadores que se han utilizado para documentar la subida de las temperaturas (Fig. 1) a nivel global han sido económicos, de salud y sociales. Se han documentado indicadores en el manejo forestal y agrícola en altas latitudes del hemisferio norte, así como la siembra primaveral temprana y alteraciones en los bosques debido a los incendios y plagas (IPCC, 2007).

Respecto a los problemas de salud, muchos trabajos relacionan las variables atmosféricas con indicadores sanitarios (Mirón Pérez et al. 2006). Algunos de estos aspectos de la salud humana surgieron con la alta mortalidad en Europa debido a la ola de calor en el verano de 2003, cambios en enfermedades infecciosas en algunas regiones de Europa y el temprano comienzo de la temporada del polen. La ola de calor de 2003 en Europa reportó las temperaturas más altas jamás obtenidas desde 1940 en países

como Francia, Reino Unido, Alemania y Suiza según datos de la Organización Mundial de Meteorología en el 2003 (IPCC, 2007).

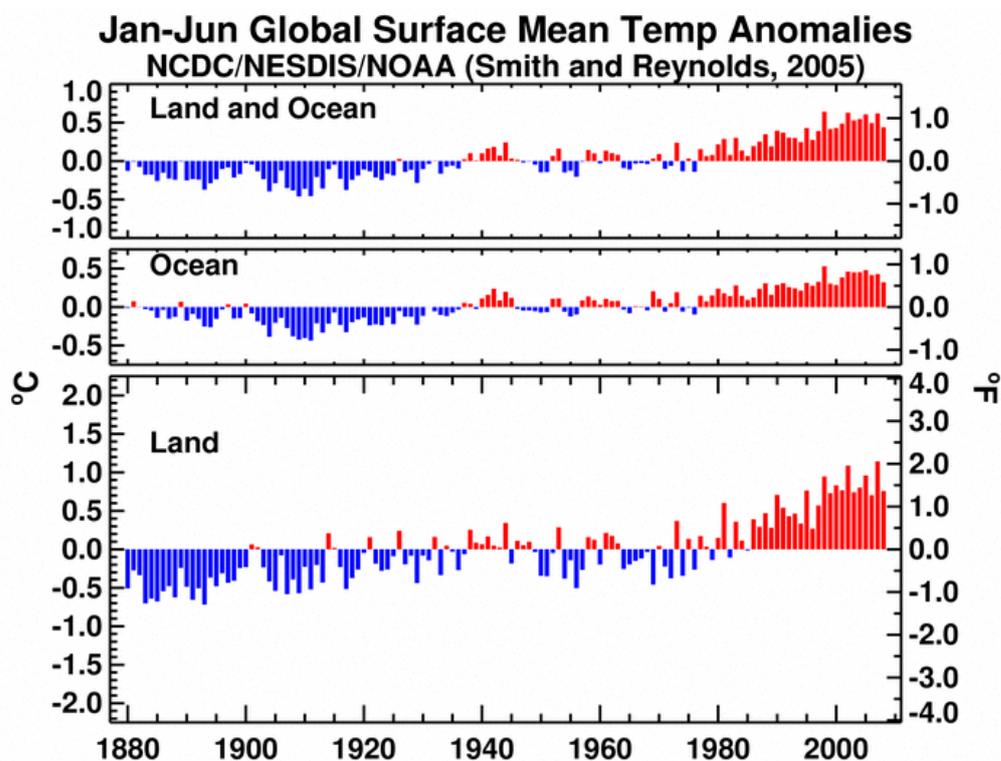


Figura 1. Evolución de la temperatura global en los últimos 120 años. Fuente: NOAA

En temas sociales y culturales, algunas actividades de vida en el Ártico también han servido de indicadores (IPCC, 2000). Actividades como la temporada de caza se han visto disminuidas en tiempo, al igual que algunos deportes de nieve que han tenido sus limitaciones también (IPCC, 2007). Respecto a indicadores económicos se han documentado impactos en el sector turístico y energético. Con este panorama el IPCC, la Organización Mundial de Meteorología, la UNEP y distintas organizaciones medioambientales han enfocado sus intereses científicos en estudios donde se utilicen indicadores hidroclimáticos. 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 de las escalas más generales con las regionales y locales (González Hidalgo et al. 2002a).

El objetivo de muchos trabajos científicos ha sido modelar un escenario y proyecciones a los que se podría enfrentar el ser humano en un futuro muy próximo. El proyecto PRUDENCE, en el continente europeo es un gran ejemplo de estos trabajos. Con este proyecto, financiado por la Unión Europea, se ha creado un escenario para Europa ante el cambio climático con una proyección del 2070-2100.

Tal y como se mencionó anteriormente, muchas investigaciones, en el contexto de Cambio Climático, se basan en las modificaciones, cambios y alteraciones espaciales y temporales que han sufrido los recursos hídricos a través de la historia. Estas alteraciones no sólo responden a los cambios naturales del clima, sino que también en ocasiones son causadas por las actividades humanas. Sin embargo, no existen patrones

de comportamiento globales en cuanto a recursos hídricos se refiere. Cada región del Planeta muestra resultados distintos (Fig. 2), de tal forma que algunas regiones recibirán un aumento de las precipitaciones mientras en otras disminuirán (IPCC, 2000). Por otra parte, también se observa en algunas regiones una alteración en la variabilidad temporal, de tal modo que, aún recibiendo la misma cantidad de lluvia, ésta se concentra en un intervalo de tiempo menor.

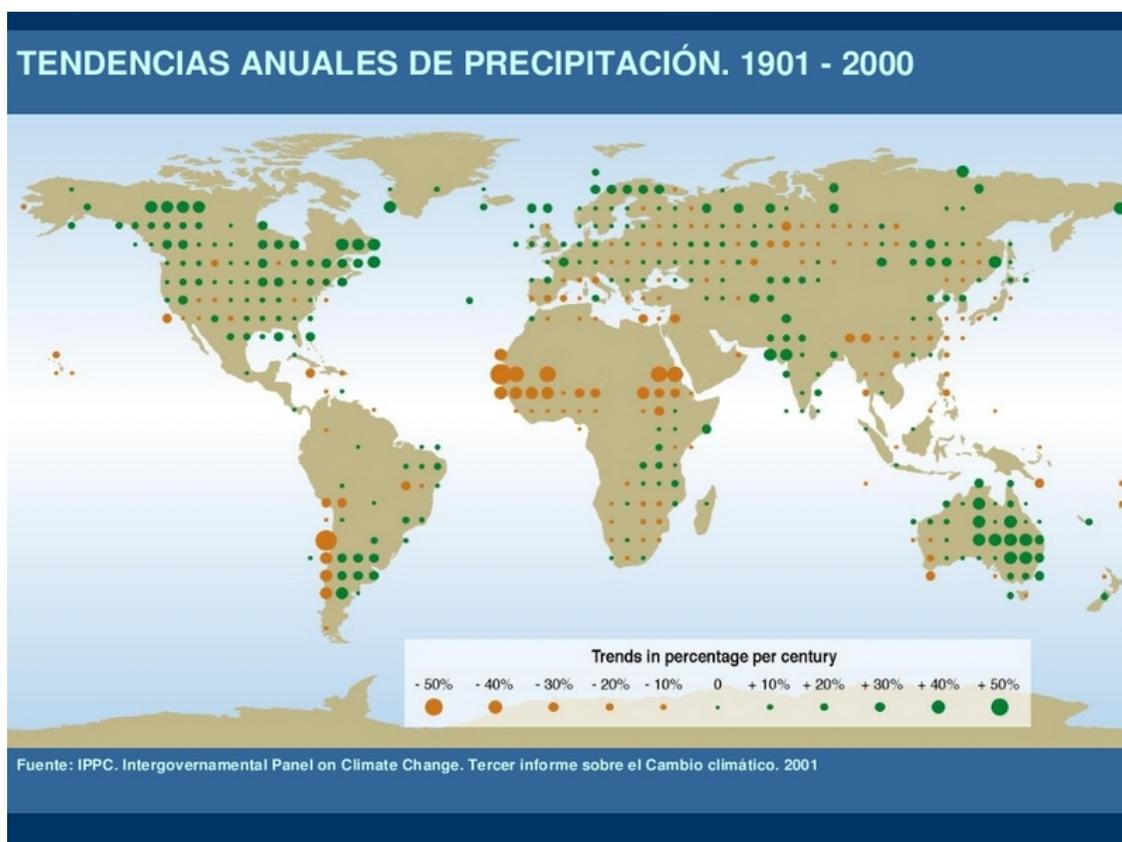


Figura 2. Tendencias anuales de la precipitación por regiones. Fuente IPCC, 2001.

El interés y la preocupación por los problemas ambientales y, más aún, en relación con los recursos hídricos se han incrementado en las últimas décadas en muchos países. Existen numerosos estudios y publicaciones realizados sobre temas que abordan la disponibilidad de los recursos hídricos, la evolución de las características hidroclimáticas y el funcionamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas (Kadioğlu, 1997; García Ruiz et al., 2001; Burn et al. 2002; Domingo et al. 2002; Gallart y Llorens, 2003; Xiong y Guo, 2004; Azevedo et al. 2005; Del Río et al. 2005; Erazo Chica, 2006; Aksoy et al. 2007; Carlón y Mendoza, 2007; Chen et al. 2007; Hamed, 2007; Ceballos Barbancho et al. 2008; Krakauer y Fung, 2008; Magalhães, 2009; Xu et al. 2009).

Los recursos hídricos están muy relacionados con el entorno en que se encuentran (Fig. 3). A esto también se le puede añadir que el funcionamiento hidrológico de un río se halla estrechamente relacionado con las características de las cuencas que drenan, incluyendo especialmente la topografía, la litología, la cubierta vegetal y los usos del suelo (García Ruiz et al. 2001). En otras palabras, su funcionamiento está condicionado a los distintos mosaicos paisajísticos que se puedan encontrar en una misma área geográfica o que converjan dentro de una misma unidad o cuenca hidrográfica.

La precipitación proveniente de la atmósfera en distintas formas (agua, nieve o granizo) suplente el agua que se mueve a través del ciclo, emergiendo en las cuencas como escorrentía. La misma es muy variada tanto en escala temporal como espacial y suele tener mayor variación anual que la evaporación (Scherer y Pike, 2003). De esta manera, el comportamiento hidrológico en condiciones climáticas similares no será igual allí donde la superficie este dominada por áreas forestales que allí donde domine el uso de suelo urbano, agrícola o pastos.



Figura 3. Ciclo hidrológico generalizado. Fuente USGS

Dado a que los recursos hídricos están condicionados por el entorno, los cambios en la estructura y la distribución del paisaje tienen gran influencia en una serie de procesos eco-hidrológicos tanto a escala espacial como temporal incluyendo la escorrentía superficial, la erosión del suelo, el intercambio de solutos y nutrientes y la calidad del agua (Fu et al. 2005). Son muchos los estudios que se han realizado para investigar los efectos de la transformación del paisaje sobre los procesos hidrológicos y que han inspirado la naturaleza de este trabajo (Calder, 1998; Costa et al 2003; Legesse et al. 2003; Andréassian, 2004; Bruijnzeel, 2004; Gallart y Llorens, 2004; Cosandey et al. 2005; Fu et al. 2005; Giertz et al. 2005; Martínez Fernández et al. 2005, 2007; Chandler, 2006; Siriwardena et al. 2006; Chappell et al. 2007; Li et al. 2007; Guo et al. 2008; ; Le Tellier et al. 2009; Magalhães, 2009; Tomer y Scilling, 2009; Tu, 2009; Weatherhead y Howden, 2009; Ruiz et al 2010). Mientras, otros se enfocan en la importancia que puede tener el bosque en el comportamiento de los recursos hídricos (Leopoldo et al. 1995; Calder, 1998, 2007; Holder, 2004).

Las superficies forestales desempeñan varias funciones importantes. Muchos de los beneficios ambientales y sociales de los bosques son bienes públicos, como la

biodiversidad, la protección del paisaje, la captura de carbono y oportunidades recreacionales. La vegetación también cumple un papel sumamente importante tanto en los procesos físicos como químicos del agua (Giertz et al. 2005). La cubierta vegetal (Fig. 4), entre otras, tiene la capacidad de interceptar la precipitación directamente por el dosel de las plantas y árboles o de devolver a la atmósfera parte del agua que había sido infiltrada en el suelo mediante el proceso de evapotranspiración (Fu et al. 2005). La cubierta forestal también puede retardar la formación de escorrentía superficial, reducir y retrasar las avenidas y los golpes de agua.

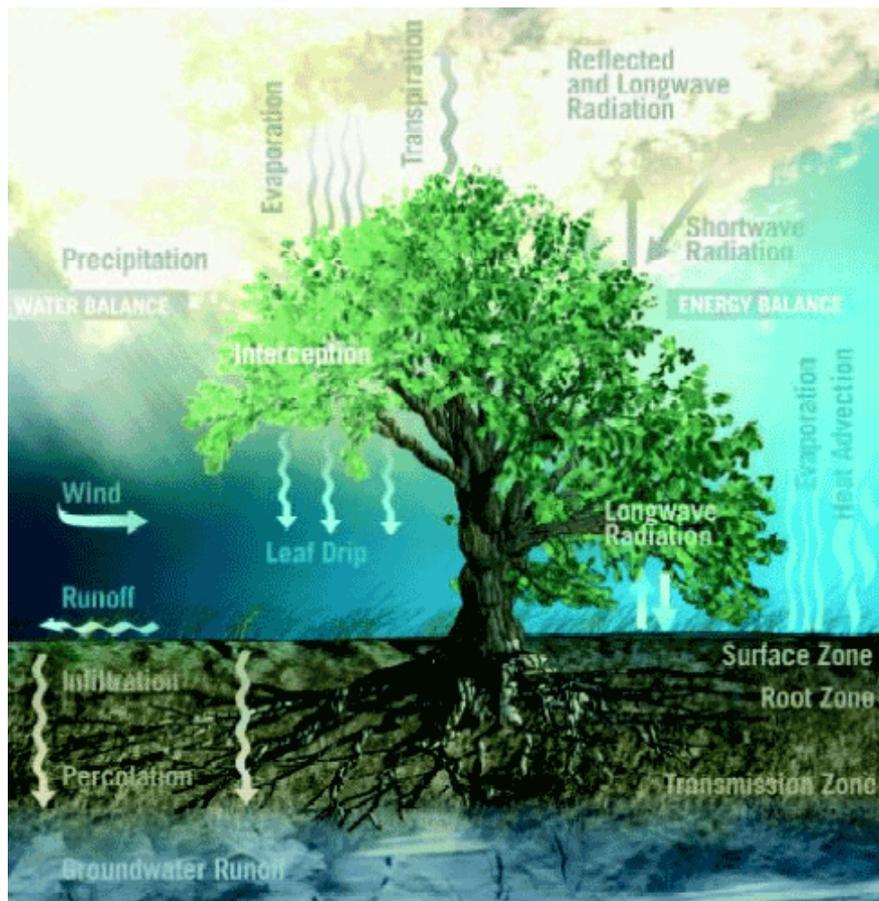


Figura 4. Interacción entre el agua y la cubierta vegetal.

La percepción entre los recursos hídricos y la vegetación ha sido una que ha ido cambiando durante la historia. Ya desde la antigüedad, el Hombre ha intentado de entender el impacto del bosque en el ciclo del agua (Andréassian, 2004). Según Andréssian (2004), desde 1821 ya surgía el debate científico y político sobre la relación bosque y agua. Algunos autores creen que la reforestación puede reducir la escorrentía superficial y que la deforestación puede incrementar la misma (Fig. 5).

En la actualidad, se ha extendido una creencia que la tala y la deforestación de superficie forestal en las áreas de captación es la raíz del problema de las inundaciones que ocurren en las áreas bajas de las cuencas y que las mismas pueden ser controladas reforestando (Bruijnzeel, 2004). La deforestación se consideran hoy en día las causas oficiales de inundaciones severas que ocurrieron en Yangtze, China en 1981

(Bruijnzeel, 2004). Según Costa et al. (2003), las modificaciones en la aportación de un río a largo plazo pueden ser causadas por las variaciones climáticas inter-decadal, cambios en los usos del suelo y cubierta vegetal en las partes altas de las cuencas, por la construcción de embalses y/o lagos artificiales y la desviación del agua para riego.

Tratándose Puerto Rico de un territorio tropical, caribeño, vale concentrarse en las funciones hidrológicas de las superficies forestales en dichas latitudes. También existen distintas percepciones sobre el impacto del despeje de superficies forestales en latitudes tropicales y sus consecuencias en las funciones hidrológicas (Bruijnzeel, 2004). En relación con la precipitación, aunque el bosque tropical no puede determinar la cantidad de precipitación, se considera que contribuye con la interceptación de la niebla, entre un 5-20% de la precipitación ordinaria (Bruijnzeel, 2004).

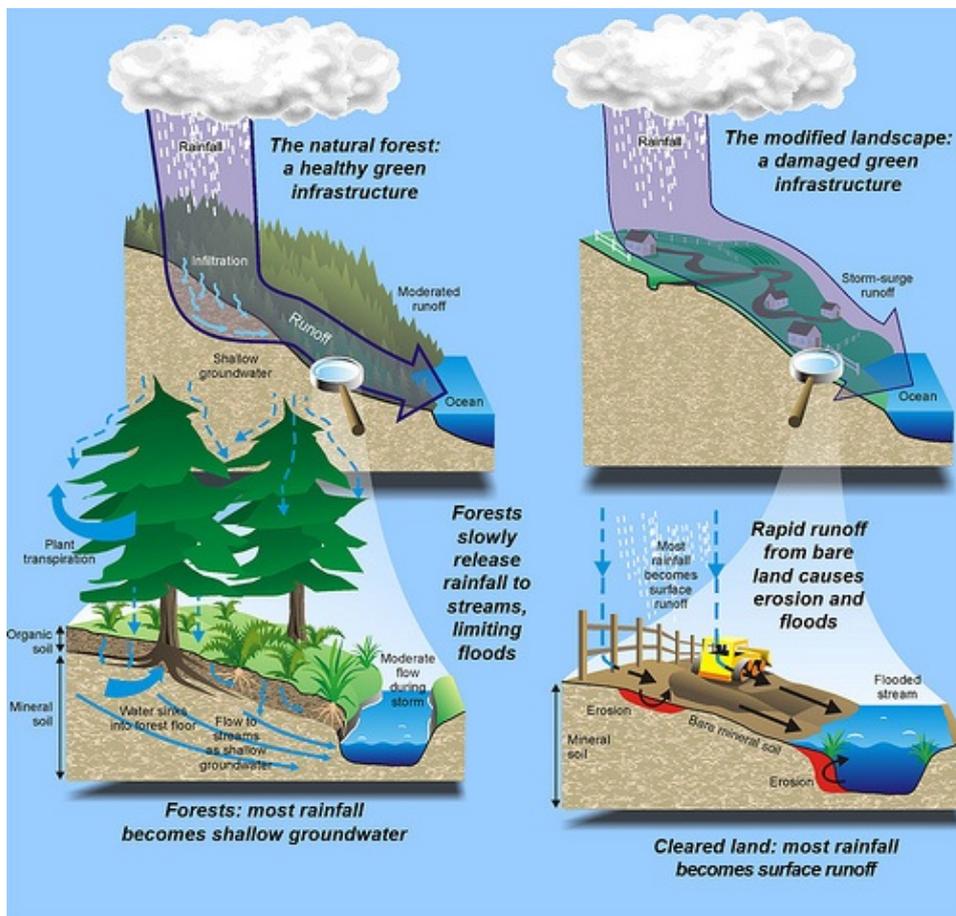


Figura 5. Ejemplo de interacción agua y usos de suelo.

Es por todo ello que se hace necesario conocer cuál sería la respuesta de los recursos hídricos ante el cambio climático, y las transformaciones que ha sufrido el territorio en zonas concretas y determinadas. El conocimiento de estos cambios y sus futuras tendencias en regiones y áreas específicas, como la Isla de Puerto Rico, influirá en la toma de decisiones a la hora de gestionar el propio recurso y el resto de componentes de la ordenación territorial.

2. OBJETIVOS



Río Fajardo, PUERTO RICO

2. OBJETIVOS

2.1 Hipótesis de partida y objetivo general

De manera general, se puede decir que el Cambio Climático es una alteración del clima en comparación con años, décadas y/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. Los indicadores o parámetros más utilizados para analizar el cambio climático han sido las temperaturas, los recursos hídricos, el aumento del nivel del mar, las emisiones de CO₂, las corrientes oceánicas, la fusión de los glaciares, entre otros.

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. Estas investigaciones han fomentado el interés por llevar a cabo este trabajo en la isla de Puerto Rico, donde hasta ahora no se ha realizado ningún estudio similar. Esto permitirá realizar comparaciones con distintos estudios llevados a cabo tanto en la Región del Caribe y en otras zonas tropicales, como a escala global.

Los recursos hídricos están muy relacionados con el entorno en que se encuentran. A esto también se le puede añadir que el funcionamiento hidrológico de un río se halla estrechamente relacionado con las características de las cuencas que drenan, incluyendo especialmente la topografía, la litología, la cubierta vegetal y los usos del suelo (García Ruiz, et al. 2001). En otras palabras, su funcionamiento está condicionado a los distintos mosaicos paisajísticos que se puedan encontrar en una misma área geográfica o que converjan dentro de una misma unidad o cuenca hidrográfica. Un paisaje puede ser descrito en condiciones de su configuración y funcionamiento, así como también por su escala y dirección de evolución. Ello refleja variaciones en el ambiente físico así como también perturbaciones naturales y actividades humanas (Crow, 2002).

Esta temática ha sido muy bien estudiada y documentada en otras regiones bioclimáticas (Bosch y Hewlett, 1982; García Ruíz et al. 2001; Niehoff et al. 2002; LeRoy Poff et al. 2006; Cabezas et al. 2008; Oudin et al. 2008) pero se tiene muy poca información acerca de las zonas tropicales. En cierta medida, se conoce lo que está ocurriendo, por ejemplo, en latitudes templadas (Bosch y Hewlett, 1982; Scherer y Pike, 2003; Cosandey et al. 2005; Molina et al. 2007; Tomer y Schilling, 2009; Tu, 2009) pero no en regiones tropicales como el Caribe. Más aún, la mayoría de las referencias citan estudios que son llevados a cabo en lugares donde la precipitación se mantiene entre 600-1100 mm de lluvia al año.

Por ello, el objetivo principal de este estudio es analizar las tendencias recientes de la escorrentía, principal componente de los recursos hídricos, en Puerto Rico y su relación con las variaciones climáticas y las transformaciones del paisaje en las últimas décadas.

2.2 Objetivos Específicos

- Analizar las características hidro-climáticas que definen el comportamiento de los ríos en las principales regiones hidrográficas de Puerto Rico;
- Analizar los caudales de dichos ríos en los últimos años con el objetivo de detectar posibles oscilaciones y tendencias en su caudal y en su régimen;
- Hacer un análisis de las precipitaciones en Puerto Rico para saber cómo ha sido el comportamiento de las mismas y definir si hubo algún tipo de tendencia o variación en las últimas décadas;
- Hacer un análisis de las temperaturas en la isla de Puerto Rico, en general, y de las cuencas de los ríos seleccionados, en particular, para verificar si hubo variaciones significativas en los últimos años;
- Analizar los cambios en los usos y en la cobertura vegetal, en definitiva, de paisaje, en el contexto socioeconómico puertorriqueño de las últimas décadas y cuantificar su magnitud;
- Relacionar las posibles tendencias de todas estas variables para verificar si están correlacionadas;
- Comparar los resultados obtenidos en ese trabajo con otros estudios ya desarrollados en el contexto caribeño y tropical, en general, y con los de otras regiones bioclimáticas.

3. CONTEXTO GEOGRÁFICO



Yacimiento Indígena Caguana. Utuado, PUERTO RICO

3. CONTEXTO GEOGRÁFICO

3.1 Contexto Histórico de Puerto Rico

Puerto Rico o Borinquén, conocida así por los habitantes de la isla antes de la llegada de los europeos, comprende un territorio nacional de 8940 km² más 145 km² de áreas acuáticas. El Estado Libre Asociado de Puerto Rico es un archipiélago en el Mar Caribe, ubicado al este de la República Dominicana y al oeste de las Antillas Menores; latitud 18.5° N y 66.8° W de longitud (Fig. 6). La isla principal es “la más grande de la antillas menores y la más pequeña de la antillas mayores”. Su territorio nacional abarca un grupo de islas de las cuales está incluida la isla grande, las islas municipio de Vieques y Culebra; Caja de Muerto, Desecheo, Isla Mona y Monito, y otros cientos de cayos e islotes.



Figura 6. Mapa Región del Caribe.

Al finalizar la guerra hispanoamericana, en 1898 con el Tratado de París, España entrega Puerto Rico, las Filipinas y Guam a EEUU como botín de guerra. Bajo este tratado quedó establecido que estas tierras pasan a ser territorio y propiedad de Estados Unidos. Como consecuencia la isla mantuvo un gobierno militar norteamericano durante décadas. Este tratado dio comienzo a la relación que existe hoy día entre EEUU y Puerto Rico.

Los puertorriqueños cuentan con la ciudadanía estadounidense desde 1917 tras haber sido obligados por EEUU a participar en la Primera Guerra Mundial. Este otorgamiento de ciudadanía no cambió nada en la relación política-administrativa de EEUU sobre Puerto Rico. No es hasta 1952 que se crea su nuevo nombre oficial: Estado Libre Asociado de Puerto Rico, Territorio no Incorporado a los Estados Unidos de América. Éste surge a raíz de la Carta de la Organización de las Naciones Unidas encaminada a proteger a los pueblos contra la colonización en 1945.

El Congreso de EEUU realizó un pequeño cambio a la Ley Jones de 1917 por la que le había concedido la ciudadanía estadounidense a los puertorriqueños y una legislatura, con la “Ley de Relaciones Federales” o la “Ley 600 de 1950”. La Ley 600 es la ley que le da vida al Estado Libre Asociado. Sin embargo, quedó establecido que esta ley no cambiaría el estatus de la isla en relación con los Estados Unidos y no alteraría los poderes de soberanía adquiridos por los EEUU sobre Puerto Rico bajo los términos del Tratado de París en 1898. Hoy en día el gobierno federal controla la aduana y la inmigración, el comercio interestatal entre Puerto Rico y los cincuenta estados y otros territorios estadounidenses, los servicios de correo y las licencias de las estaciones de radio y televisión. Además, regula las instituciones financieras, las compañías de telecomunicaciones y los transportes aéreos y marítimos impartidos.

Los puertorriqueños no cuentan con senadores ni representantes en el Congreso de EEUU, ni tampoco tienen delegados con derecho al voto del presidente de la nación norteamericana como lo hacen los cincuenta estados que constituyen dicho país. Puerto Rico cuenta con un Comisionado Residente en Washington con voz y derecho a expresión en el Congreso pero sin voto alguno. Así, todas las leyes federales y las que dicte el Congreso de los Estados Unidos se aplican a Puerto Rico. La Ley Suprema en Puerto Rico es la Constitución Federal de los Estados Unidos, las leyes federales y las que así dicte el Congreso, y luego la Constitución del Estado Libre Asociado de Puerto Rico.

Este panorama político estadounidense, junto con la herencia española, se ven representados y plasmado en el paisaje urbano, cultural/histórico y político actual de la isla. En él compiten ciudades coloniales españolas con centros comerciales al mayor estilo norteamericano, y centros urbanos despoblados debido a desarrollos urbanos horizontales (medidas de ordenación territorial norteamericanas aplicadas a Puerto Rico). Más aún contrasta un Código Civil Puertorriqueño de herencia española con un sistema de leyes anglosajón.

Hoy en día, la isla está compuesta administrativamente por 78 municipios (Fig. 7), su mayor división política. De estos 78, 76 se encuentran en la isla grande y dos de ellos son islas ubicadas al este de la isla grande. Todos estos municipios a su vez se subdividen en barrios y sectores.



Figura 7. Mapa Político de Puerto Rico: 78 Municipios

3.2 Características Socio-políticas de Puerto Rico

Se entiende que los patrones que conforman y transforman el paisaje están muy ligados a la cultura, las actividades sociales y económicas, y al manejo del paisaje basado en la percepción de un pueblo, lo que observan, conocen y sienten. La población total de Puerto Rico era de 3.8 millones de habitantes en el año 2000 (tabla 1) y se estima que en el 2007 existían 3.9 millones (NCEEUU, 2000). Su población y actividades económicas están distribuidas en función del terreno, la topografía y la hidrografía. Debido a ello, aproximadamente el 80% de las actividades económicas y de la población se encuentran en los llanos costeros. No obstante esta distribución de población no siempre siguió el mismo patrón espacial sino que ha sufrido cambios drásticos durante la historia.

Bajo el dominio del reinado español, en la isla de Puerto Rico, se realizaron censos de población esporádicamente. Sin embargo a partir del siglo XVIII se hicieron con más frecuencia y con escala de detalles más precisa contando con datos de población total por pueblo. Más adelante, a partir de 1899 bajo el dominio norteamericano, el gobierno de Estado Unidos realizó censos poblacionales con una frecuencia de cada diez años (Villanueva Colón, 2002). Debido a ello, Puerto Rico cuenta con unos datos y una base histórica bastantes fiables y precisos en relación a su demografía.

La densidad poblacional del país alcanza al día de hoy una media de 429 h/km² y un promedio de 1016 h/km² en la zona metropolitana de San Juan, siendo la densidad poblacional una de las más altas del mundo (NCEEUU, 2000). A lo largo de la historia la isla ha sufrido grandes cambios que han influido en la demografía tanto en la cantidad de personas como en los patrones de distribución espacial de las mismas. Hoy se puede considerar que Puerto Rico es un país mayormente urbano ya que el 71% de sus habitantes vive en lo que se considera núcleos de población urbana y sólo un 28% es la que vive en población rural (NCEEUU, 2000).

Tabla 1. Incremento demográfico de Puerto Rico. Fuente: Villanueva Colón, 2002 y NCEEUU. <http://www.census.gov/>

POBLACIÓN DE PUERTO RICO	
AÑO	POBLACIÓN (N° habitantes)
1765	44883
1846	445185
1899	953243
1930	1543913
1960	2349544
1990	3522037
2000	3808610
2009	3967179

Una zona metropolitana o área estadística metropolitana, como lo denominó el Negociado del Censo de EEUU en la década de los años 50 y 60 en Puerto Rico, era considerada a aquellos municipios de 50 mil habitantes o más (Villanueva Colón, 2002). Comenzó con sólo tres zonas metropolitanas en esa época; hoy en día son seis.

Además el criterio de definición cambió de 50 mil a 100 mil como cantidad mínima de habitantes: San Juan (1967627 h) municipio capital de la isla que cuenta con la mayor zona metropolitana, Mayagüez (253247 h), Ponce (361094 h), Caguas (308365 h), Arecibo (174300 h) y Aguadilla (146424 h) (NCEEUU, 2000). En estas seis zonas agrupan un total de 53 municipios.

Las zonas metropolitanas se alimentaron por la migración interna que sufrió la. Este fenómeno de migración urbana, del campo a la ciudad, en el país tuvo su auge para la década de 1950 y cambió por completo los paisajes agrícolas, urbanos, naturales e industriales así como también el patrón de distribución poblacional y actividades económicas. Este fenómeno, a su vez, creó un desdoblamiento en el centro de la isla, (Fig. 8) y una sobrepoblación en muchos de los llanos costeros.

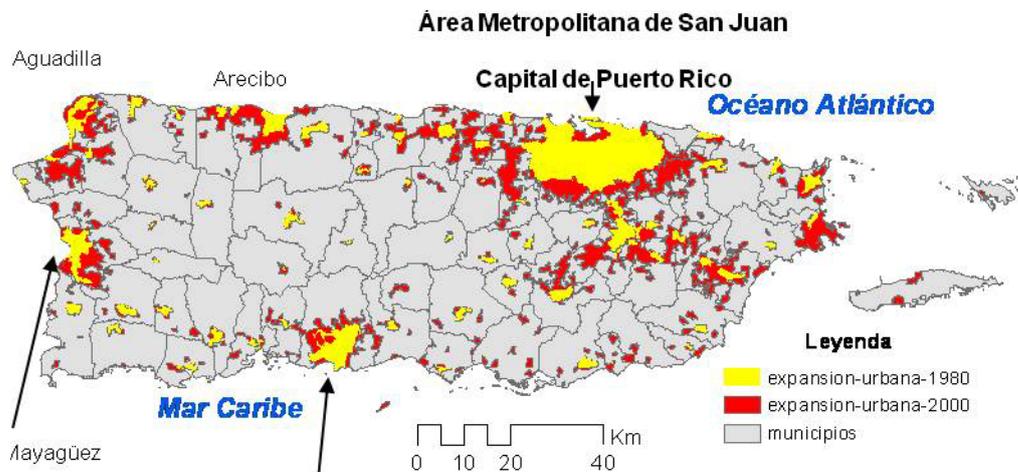


Figura 8. Mapa Expansión Urbana de Puerto Rico
Fuente: Junta de Planificación 2004

La actividad agrícola de Puerto Rico, bajo el comienzo del reinado español, estaba dirigida a cultivar caña de azúcar y otros productos menores para exportar a Europa y algo más para el consumo local (Villanueva Colón, 2002). No es hasta la mitad del siglo XIX cuando hubo cambios en la política económica que fomentaron la expansión comercial de la isla, surgieron las haciendas de mayor tamaño convirtiendo la caña de azúcar y el café en los productos principales de exportación, tanto así que en 1897 se estima que generaron más de 5 millones de dólares (López Marrero y Villanueva Colón, 2006). Ya bajo el dominio norteamericano 1899, la industria del café sufrió un gran cambio con el azote del huracán San Ciriaco. Esto promovió el desinterés de los estadounidenses en la industria cafetalera y a su vez ayudó a la industria de la caña y el tabaco que recibieron los subsidios para rehabilitar sus cultivos (Villanueva Colón, 2002).

La actividad agrícola se mantuvo como la mayor fuente de ingreso y trabajo hasta 1940. A partir de 1950 comienza el abandono de este sector. Durante y antes de esta época, la isla pasó por procesos migratorios hacia los Estados Unidos, los cuales se fueron incrementando a mediados de 1940. A su vez, en EEUU surgían transformaciones políticas y económicas, lo que se conoció como la Gran Depresión de 1930. Además el gobierno redujo los incentivos, los fenómenos atmosféricos azotaron fuertemente la isla

y el monopolio estadounidense sobre la industria azucarera afectaron directamente la caída de este sector económico en la isla (Villanueva Colón, 2002).

La caída de la agricultura creó una reacción en cadena demográfica, económica, paisajística y política. Aumentó la pobreza y el hambre en la isla lo que fomentó la migración de puertorriqueños a los EEUU. Fue el mismo gobierno de Puerto Rico el que promovió la emigración como parte de una estrategia para resolver los problemas sociales del país. Se estima que entre 1940-1960 emigraron cerca de 400 mil puertorriqueños y que hoy en día las cifras alcanzan a 3.5 millones de puertorriqueños en los EEUU (Villanueva Colón, 2002).

A partir de la década de 1950, con la creación del nuevo estatus político de la isla como Estado Libre Asociado (1952), se apostó por la industria de servicios, manufacturas, petroquímicas, farmacéuticas y fábricas tecnológicas, en otras palabras, se optó por industrializar el país (DRNA, 1999). Estos grandes centros industriales se ubicaron en lo que hoy en día son las áreas metropolitanas de Puerto Rico, San Juan, Mayagüez, Arecibo y Ponce ubicadas en municipios o llanos costeros.

La creación de estos parques industriales fomentó otro fenómeno migratorio interno que volvió a influir en la cantidad y distribución espacial de la población puertorriqueña. Surgió la migración del campo a la ciudad, se abandonaron las actividades agrícolas y los centros urbanos del interior de la isla, para movilizarse a las ciudades industriales en la costa a trabajar. Con este abandono todo el paisaje agrícola de la isla cambia y se refuerza el paisaje urbano. El porcentaje de población rural va disminuyendo con el tiempo hasta convertirse en una pequeña parte de la población. Se industrializan las ciudades principales del país y se concentra la población en varios núcleos urbanos. El sector económico de la agricultura pasó de ser el de mayor influencia en la economía local de Puerto Rico a ser el sector con menor influencia (Fig. 9) y hoy en día apenas refleja el 0.03% de los sectores económicos del país (Alameda, 2000).

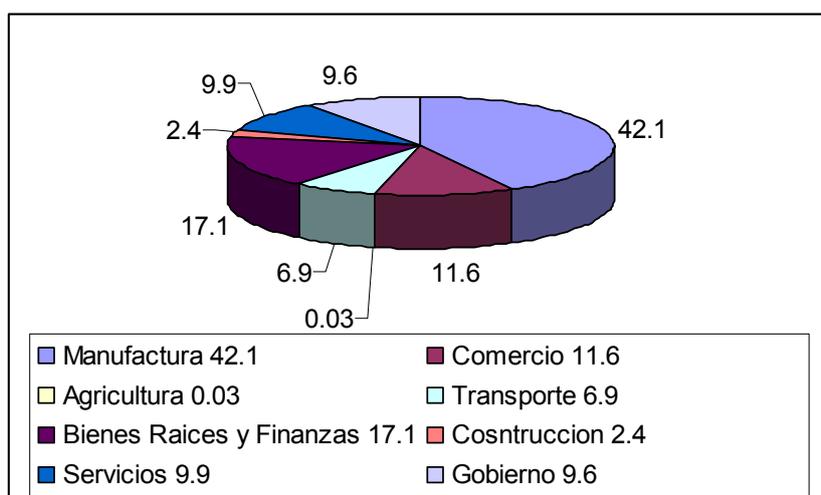


Figura 9. Porcentaje de sectores económicos de Puerto Rico en el año 2000
Fuente. Alameda, 2000

3.3 Características físicas de Puerto Rico

3.3.1 Clima: Puerto Rico

Debido a la ubicación geográfica favorable, la isla goza de temperaturas cálidas y agradables durante todo el año. Este clima tropical, está caracterizado por dos estaciones, una lluviosa y otra seca, con vientos predominantes del este-noreste producidos por los vientos alisios cargados de mucha humedad. Esta misma situación geográfica privilegiada comprende varias fragilidades como la vulnerabilidad ante las tormentas tropicales y/o huracanes que suelen tener una frecuencia en la zona del Caribe entre 5-9 veces por año.

Además, los patrones de vientos del este-noreste varían dependiendo de varios factores:

- Brisa marina diurna en las costas debido a la diferencia de calentamiento y enfriamiento entre tierra y mar durante el día y la noche (JCA, 2005).
- Tormentas y huracanes con vientos de hasta 320 km/hora, predominantes del sureste (JCA, 2005).
- Otros sistemas tropicales como vaguadas y trombas marinas que pueden inducir viento en cualquier otra dirección (JCA, 2005).

La precipitación es abundante y debido a la topografía montañosa y el relieve escarpado de la isla, los recursos hídricos forman una extensa red fluvial por donde corren las aguas con gran abundancia. Con este relieve, es muy común que ocurra una distribución de precipitaciones orográficas y de muy clara definición (Fig. 10). La Cordillera Central de la Isla es la cadena montañosa que cruza de este a oeste y la que marca claramente la diferencia que hace de línea divisoria entre la región norte y la región sur.

La isla cuenta con una distribución espacial de la precipitación y una temperatura relativamente variada lo que aporta la diferencia entre los distintos paisajes. Cuenta con unas temperaturas medias anuales que fluctúan entre los 22°-25°C en el interior y supera los 26°C en las zonas costeras con una oscilación térmica media de 6°C (JCA, 2005). La oscilación de temperatura entre el día y la noche es muy baja. Esto se debe a que el vapor de agua que atrapa la radiación infrarroja no permite que la temperatura disminuya demasiado en la noche. Sin embargo la temperatura muestra variaciones drásticas debido a los cambios por altitud. En el caso de las islas montañosas como Puerto Rico, las temperaturas cambian con la elevación en las laderas de las montañas.

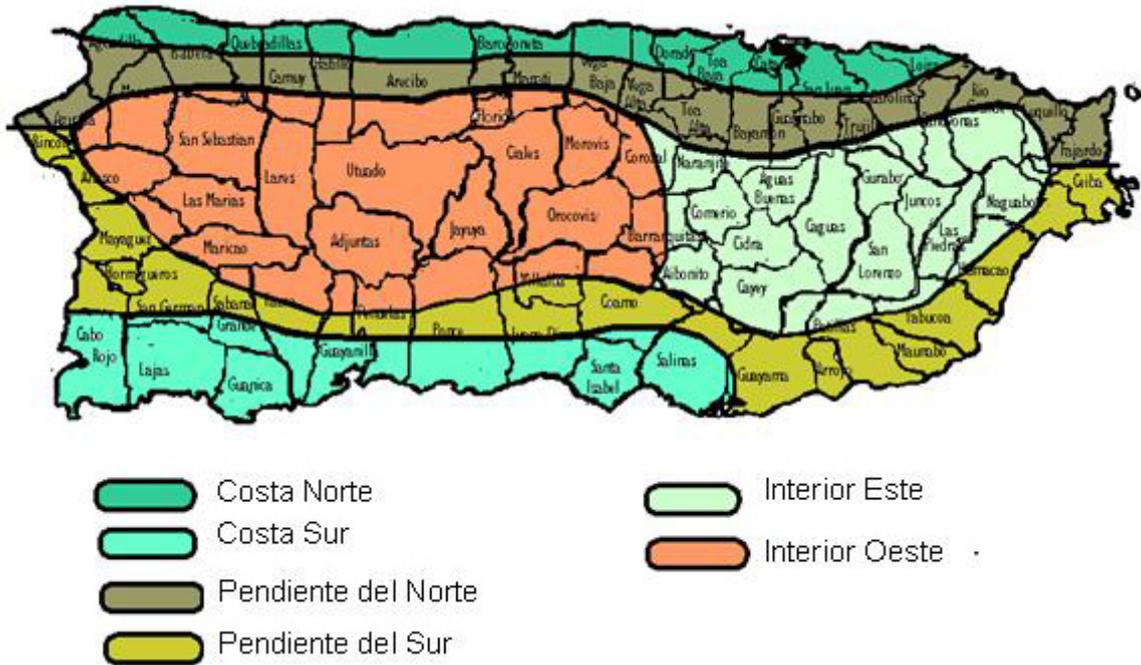


Figura 10. Regiones Climáticas de Puerto Rico. Fuente NOAA.

El periodo seco para la Isla comienza en diciembre y no finaliza hasta finales de marzo y principios de abril, con lluvias intensas a finales de abril y principios de mayo. La lluvia suele disminuir en junio y julio hasta que comienza el periodo de lluvias abundantes de agosto a octubre (Fig. 11). La Cordillera Central, la Sierra de Luquillo y la Sierra de Cayey son las cadenas montañosas más influyentes en la distribución de las precipitaciones. Las mismas sirven de barreras a los vientos alisios y causan un umbral o sombra de lluvia en la Región Sur de la Isla (DRNA, 2005b).

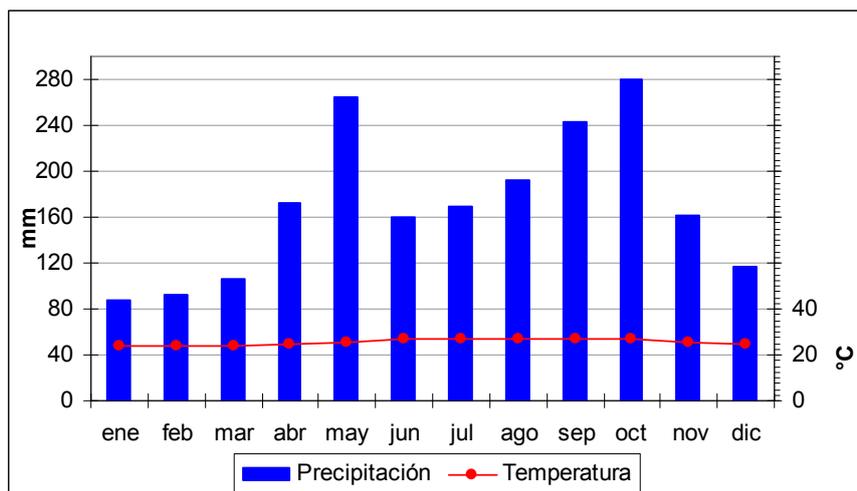


Figura 11. Comportamiento de la precipitación y la temperatura en Arecibo, Puerto Rico. Fuente: NOAA.

La isla cuenta con una media de 1752 mm de lluvia anual (DRNA, 2005b). El máximo de precipitaciones se encuentra en la Cordillera de Luquillo en el Bosque Pluvial de El Yunque, al noreste de la isla donde suelen sobrepasar los 5000 mm de lluvia al año. Las

precipitaciones mínimas se suelen dar en el Bosque Seco de Guánica al sur de la isla, con una media de 800 mm de lluvia al año. La región norte es la región más lluviosa de la isla. Esta cuenta con 1550 mm de precipitación media anual. La región sur cuenta con una media de 910 mm, siendo la parte más seca de la isla. La gran mayoría de los eventos de lluvia en la isla son de corta duración y gran intensidad.

La brisa de tierra, generada mayormente en la noche y la madrugada, también es un factor determinante en la distribución de la precipitación. La brisa de tierra es menor en intensidad que la brisa marina pero genera precipitación en las zonas costeras del este y claros en el oeste (JCA, 2005). Así se puede observar también la convergencia de los vientos en horas de la tarde que influyen en la distribución de la precipitación y perturbación en los vientos alisios y, por consiguiente, la diversidad de microclimas en Puerto Rico.

Los sistemas o los frentes de frío también influyen de manera significativa en el clima de la isla, causando lluvias de intensidad moderada pero de magnitud significativa (DRNA, 2005b). Estos frentes provienen de Estados Unidos y ocurren en los meses de invierno. Suelen producir lluvias periódicas usualmente intensas acompañadas de temperaturas más frías y pueden durar varios días (DRNA, 2005b).

La evapotranspiración en Puerto Rico tiene una media de 1048 mm anual. En los valles costeros es >1050 mm y en las áreas montañosas puede alcanzar los 700 mm anuales. Ésta equivale a un 64% de lluvia promedio en la isla aunque puede llegar a un 90% en algunas zonas costeras.

Otros fenómenos determinantes en el clima no sólo de Puerto Rico sino en el Caribe son los huracanes. De 1989 a 2004, cinco huracanes han pasado directamente sobre Puerto Rico, el Huracán *Hugo* septiembre de 1989, el Huracán *Marilyn* septiembre de 1995, Huracán *Hortense* 1996, Huracán *Georges* septiembre de 1998 y el Huracán *Jeanne* 2004. Desde el 2004 hasta el presente (2010) no han pasado huracanes sobre la isla. Se estima que entre 1799-1998 (200 años) un total de 40 huracanes afectaron las provincias habaneras de Cuba (Pérez Suárez et al. 2000). De estos 40 huracanes el 48% de ellos ocurrió en octubre y el 30% en septiembre (Pérez Suárez et al. 2000).

Como media, la temporada de huracanes comienza la primera decena de junio y termina a finales de octubre. Sin embargo, la distribución de la frecuencia tiene un máximo absoluto en junio y otro relativo en agosto. No obstante se han registrado huracanes en meses extemporáneos, antes de junio y en diciembre (Ballester y González, 2001). Desde el punto de vista hidrológico, los huracanes o tormentas tropicales generan cantidades extremas de agua y escorrentía, creando inundaciones y deslizamientos. Lamentablemente llegan a cobrar vidas humanas y unas inmensas pérdidas económicas para todos los países que se encuentren en su trayectoria.

Las islas de Puerto Rico y el Caribe también sufren periodos de sequías generalizadas. Estas sequías son causadas por efectos climáticos regionales y El Niño. La isla ha sufrido sequías en el año 1934, 1964, 1974 y en 1994 (DRNA, 2005b). Sin embargo las sequías también pueden afectar sólo a regiones de la isla de Puerto Rico debido a los efectos orográficos. La sequía de 1964 afectó fuertemente a la región sur de la isla mientras que la sequía del 1994 afectó seriamente la región del norte. Datos oficiales informan que la sequía de 1964 se extendió hasta 1967 y la precipitación mermó en un

30% de la media anual, representando un déficit de 1016 mm en dos años en una región que apenas alcanza los 900 mm de lluvia por año (DRNA, 2005b).

3.3.2 Relieve y Topografía de Puerto Rico

La topografía y el relieve son resultado de procesos destructivos y constructivos que han estado actuando durante millones de años modelando el paisaje que luce hoy la isla. El relieve de Puerto Rico es mayoritariamente montañoso.

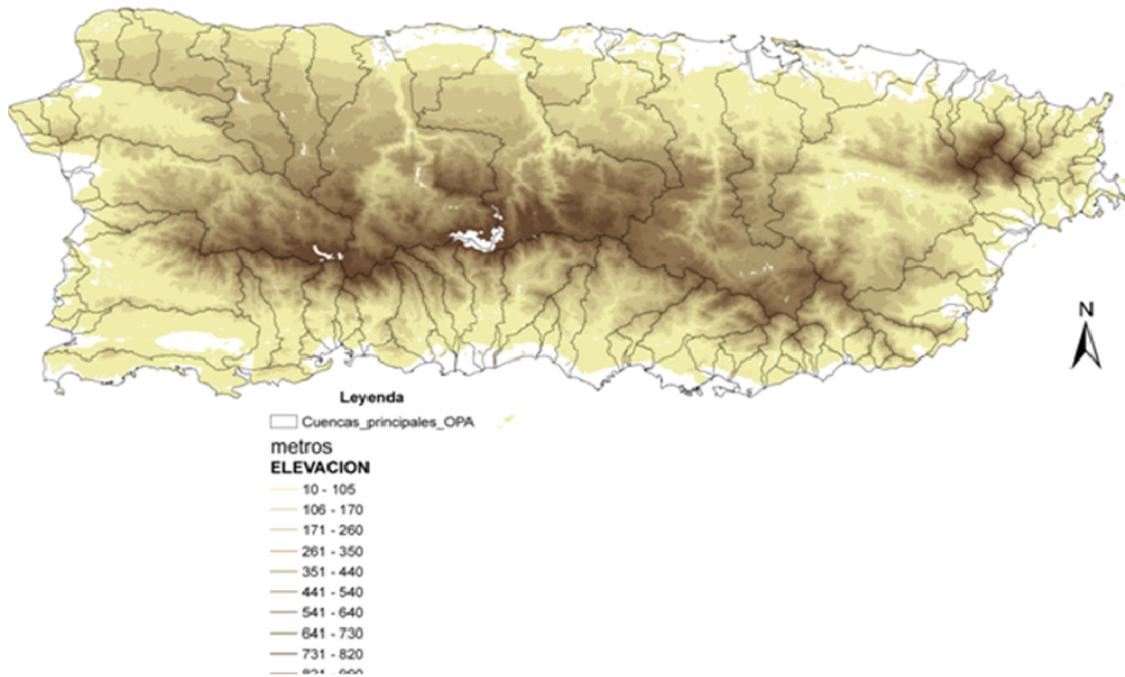


Figura 12. Relieve y Topografía de Puerto Rico.

Un 85% del territorio en Puerto Rico (Fig. 12) se encuentra a menos de 500 metros de elevación sobre el nivel del mar (JCA, 2005). Esto sitúa un 14% restante del territorio entre los 500 y los 1000 metros de elevación y menos de un por ciento a más de 1000 metros de altitud. Una cuarta parte de su terreno cuenta con pendientes muy empinadas, donde llegan a superar los 45° de inclinación (López Marrero y Villanueva Colón, 2006).

En el centro de la isla, su elevación, contorno y vegetación la convierten en la principal área de captación y recarga para los cuerpos de agua subterráneos y superficiales a su vez que una barrera protectora contra los fuertes vientos en tiempos de tormentas (Junta de Calidad Ambiental, 2005). Es en esta cadena de montañas donde se encuentran los picos más altos de la isla, El Toro con 1064 m, y es una de las zonas más lluviosa (Junta de Planificación, 2006).

3.3.3 Geología y Geomorfología de Puerto Rico

La isla cuenta con una geología muy variada y compleja. En la década de los 50 (después de la creación del Estado Libre Asociado), el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) inició un programa cartográfico para Puerto Rico. En él se realizaron 51 cuadrángulos geológicos de escala 1:20000 representando las formaciones rocosas y las estructuras geológicas de la isla (USGS, 2002). No obstante éstas no son las únicas investigaciones geológicas. Existen numerosas investigaciones sobre las formaciones y estructuras geológicas de Puerto Rico desde 1919 realizados por la Academia de las Ciencias de Nueva York, por lo que también podemos contar con unas referencias muy fiables y extensas.

La isla grande de Puerto Rico debió surgir del fondo oceánico entre 130 y 150 millones de años atrás, en el período Cretácico de la era Mesozoica. La isla de Puerto Rico es una parte emergente de la micro-placa Puerto Rico-La Española. Es un bloque estable en la zona de subducción entre la Placa de Norte América y la del Caribe, lo que ha dado origen a la zona más profunda del Océano Atlántico, la Trinchera de Puerto Rico al norte de la isla (Van Gestel et al. 1999). Esta trinchera alcanza profundidades de 8500 metros y además está asociada con las anomalías de gravedad más negativas en la Tierra.

Es un territorio de origen volcánico, y emergió debido a la actividad producida entre las placas tectónicas del Caribe y la de Norteamérica (USGS, 1996). Estos procesos de formación fueron los que dieron origen al paisaje tan montañoso y escarpado de la isla. No obstante, no todo el territorio de Puerto Rico pertenece a la misma Era geológica. Las islas e islotes que pertenecen al territorio nacional se formaron con posterioridad (Seguinot, 2002).

Generalmente se destacan dos grupos de formaciones geológicas en la isla, las de origen volcánico (rocas intrusivas y extrusivas) y las de rocas sedimentarias. Las rocas volcánicas extrusivas (depósitos de lava y cenizas) se concentran en el interior de la isla, mientras que las intrusivas aparecen en áreas de menor extensión localizadas en el sudeste y algunos sectores de la Cordillera Central (USGS, 2002). La formación geológica de la isla se produjo durante cinco periodos geológicos, Triásico, Jurásico, Cretácico, Terciario y Cuaternario, y comprende dos Eras, la Mesozoica y la Cenozoica.

La isla se divide generalmente en tres regiones geomorfológicas, la región central de la cordillera, las regiones de roca caliza de origen marino en las costas norte y sur y por último la región de los valles aluviales costaneros en las costas norte y sur (DRNA, 2005b).

3.3.3a Regiones Geomorfológicas Principales

La isla se subdivide en tres regiones geomorfológicas generales (Fig. 13): la Zona del Interior Montañoso Central, la Zona Cárstica y los Llanos Costeros (USGS, 2002). Son las estructuras geológicas y su escarpado relieve las que influyen directamente sobre la topografía y todo el sistema de drenaje de la isla.



Figura 13. Regiones geomorfológicas principales de Puerto Rico. Fuente: López Marrero y Villanueva Colón, 2006

- Interior Montañoso Central

La mayoría de las formaciones geológicas de la región central datan del periodo Cretáceo, hace aproximadamente 70 millones de años. Esto indica que el origen de las rocas está relacionado con erupciones volcánicas en el Caribe y con movimientos sísmicos de gran magnitud en las placas geológicas cercanas (DRNA, 2005b). Estos sismos contribuyeron a elevar, reducir, distorsionar, fragmentar y modificar la lava.

La zona central de la isla está mayormente compuesta por lava y material de origen volcánico (Seguinot, 2002). En ella pueden encontrarse rocas de origen intrusivo y otras de origen extrusivo. Las rocas intrusivas pueden verse en el Batolito de San Lorenzo expuestas mediante la erosión. Las rocas extrusivas en la parte central-este de Puerto Rico han estado sometidas a procesos, lentos pero continuos, de climatización lo cual la hace más resistente a los procesos de erosión (DRNA, 2005b). La estructura central está dominada por fallas y lineamientos geológicos.

Ésta es la zona topográfica más extensa que existe en la isla. Está constituida por distintas cadenas montañosas, entre las que más destacan la sierra de Cayey, la sierra de Luquillo y la Cordillera Central, sin embargo no son las únicas. Existen varias cadenas de montañas que también forman parte de esta región pero, por estar próximas a la costa y separadas de las cordilleras principales, no se consideran parte del interior montañoso, no por ello tienen menos importancia en la geografía física de Puerto Rico. Su composición geológica y rocosa varía mucho, de rocas volcánicas (lavas y tufas) a granodioritas, cuarzdioritas y plutónicas. La altura de sus picos llega a superar los 1300 metros de altitud sobre el nivel del mar.

- Zona Cárstica o Carso Norteño

Ésta es la segunda región de mayor extensión territorial en el país y se extiende desde el municipio de Loíza hasta el municipio de Aguadilla (Cruz Báez y Guilbe, 2002). En el Periodo Terciario, grandes cantidades de residuos de organismos marinos compuestos de carbonato cálcico, se depositaron en las áreas llanas de estas áreas volcánicas de la región central tanto al norte como en el sur. En este periodo los ríos descargaban gran cantidad de sedimentos, especialmente arenas y arcillas erosionados de la Región Central de la isla, mezclándose luego con los depósitos marinos calcáreos. Los sismos elevaron la plataforma de la Isla sobre el nivel del mar exponiendo los materiales a un contacto directo con la atmósfera y la acción directa de los ríos. Al día de hoy está constituida por una zona geológica de roca sedimentaria y principalmente caliza, donde su mineral principal es la calcita (USGS, 1978). Este tipo de roca es altamente soluble por agua acidulada, lo que da origen a diferentes relieves en la región (JP, 2006). En su topografía resaltan los mogotes, abras, dolinas, sumideros, zanjones y farallones; y en su ámbito subterráneo, las cuevas, cavernas y aguas subterráneas (JP, 2006).

Aunque la mayor manifestación de estas formaciones geológicas están ubicadas al norte de la isla, existe otra región caliza en el sur de Puerto Rico; sin embargo no sufrió el mismo proceso evolutivo que la región del Carso Norteño. Son depósitos calizos del Periodo Terciario y además se pueden encontrar algunos en la parte central oeste de la isla. La región caliza del sur se diferencia a los del norte en su alto contenido de arcilla, lo que impidió que su proceso de erosión no haya sido igual. Los ríos del sur depositaron gran cantidad de aluvión sobre roca volcánica donde no había depósitos calcáreos. Las pendientes del sur que declinan hacia el mar alcanzan un promedio de 10-30° de inclinación mientras que en el norte alcanzan los 3° (DRNA, 2005b). Ésto es un indicador de energía acumulada en la cuenca: a mayor pendiente, mayor la energía acumulada.

Las singulares características biofísicas de esta región (relieve, clima, geología, suelo e hidrología) constituyen un paisaje único y un área imprescindible para la recarga de acuíferos y aguas subterráneas y donde abundan las cuevas, mogotes y sumideros. Es en esta región del Carso norteño donde se encuentra la mayor reserva de aguas subterráneas de la isla: El Gran Acuífero del Norte (USGS, 1978).

Esta región se interrumpe en segmentos con cañones que discurren dirección sur a norte formados por algunos ríos principales de la zona: río de Guajataca, Grande de Arecibo, Grande de Manatí y el río de Camuy (JP, 2006). Otra característica muy singular e interesante de esta zona son las formaciones de cuevas. El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico estima que existen aproximadamente 2000 cuevas de las cuales sólo 207 están documentadas.

- Llanos Costeros Aluviales

Cada litoral de la isla está constituido por suelos variados. En las llanuras aluviales del norte predomina la arena y las arcillas depositadas por los ríos más caudalosos de la isla que desembocan en el Océano Atlántico. Esta zona se extiende desde el municipio de Aguadilla hasta Luquillo y cuenta con una serie de dunas consolidadas llamadas

eolianitas; éstas forman una línea desde el municipio de Loíza hasta Arecibo (Seguinot, 2002).

Esta zona norte se divide en dos sub-regiones: la Sección Sub-húmeda del Oeste (Aguadilla-Arecibo) y la Sección Húmeda Aluvial (Arecibo-Luquillo). La sección sub-húmeda del oeste se caracteriza por playas de dunas de arenas dispersas y algunas mesetas de rocas calizas (JP, 2006). La sección húmeda aluvial es predominantemente llana con algunos montículos cársticos y líneas de dunas de arena en la costa (Cruz Báez y Guilbe, 2002). Gran parte de estos llanos costeros se inundan periódicamente, lo que conforma un paisaje de humedales, pantanos, ciénagas, lagunas de agua salada y extensos manglares.

Los llanos costeros del sur se caracterizan por depósitos de aluvión en formas de abanicos, y el sedimento más común es la grava, proveniente de la Cordillera Central (JP, 2006). Estos llanos costeros son más estrechos que los del norte y se extienden desde el municipio de Patillas hasta Ponce. Los ríos son cortos y arrastran gran cantidad de sedimentos que luego depositan en las áreas llanas.

Las llanuras del este están compuestas mayormente por material rocoso de origen volcánico proveniente de las montañas que se precipitan al mar y los sedimentos más comunes son las arenas, las gravas, la arena cuarzosa y la arcilla (Seguinot, 2002).

La zona costera del oeste está constituida por llanos aluviales de los ríos principales en la zona. Al igual que el litoral este, contiene puntas de montañas rocosas de origen volcánico que terminan en el mar, sin embargo también se pueden encontrar sedimentos de arena en la región (Morelock et al. 2003). Está constituida por valles desde el municipio de Cabo Rojo hasta en el municipio de Aguadilla y al igual que la costa este son de forma triangular, sin embargo como los ríos son más caudalosos cargan con mayor cantidad de sedimentos y crean valles más extensos y alargados (JP, 2006).

3.3.4 Biogeografía: Puerto Rico

Aunque el territorio de Puerto Rico es relativamente pequeño, no ha sido impedimento para que sus características geográficas gocen de numerosos paisajes y de una gran diversidad ecológica. Estos paisajes naturales se distinguen por sus formaciones geológicas, su topografía y relieve, ecosistemas y una extensa red fluvial que alimenta sus costas.

Respecto a suelos, de los once tipos de suelos principales, según la clasificación del USDA (*United States Department of Agriculture*), en la isla se pueden encontrar ocho de ellos: inceptisol, ultisol, oxisol, mollisol, entisol, vertisol, alfisol e histosol. Ésto se debe a la complejidad del material rocoso, a los patrones de lluvia y la inclinación de los sistemas montañosos (Barreto, 2002).

Los bosques representan cerca del 41% del territorio de la Isla. Las zonas más deforestadas son los valles aluviales y las zonas más cercanas a las costas. En el centro de la isla existe una gran diversidad ecológica (flora y fauna), muchas de las especies amenazadas y en peligro de extinción; así como también grandes extensiones de recursos forestales que albergan a estas especies.

Los bosque y la cobertura vegetal de la Isla han sido clasificadas utilizando el sistema de zonas de vida natural del científico norteamericano L. R. Holdridge (DRNA, 2005b). El sistema tiene los límites bien definidos y se fundamenta en los patrones de precipitación y biotemperatura.

Puerto Rico, según el sistema de vida natural, se divide en seis zonas: Bosque Seco Subtropical, Bosque Húmedo Subtropical, Bosques Muy Húmedo Subtropical, Bosques Pluvial Subtropical, Bosque Muy Húmedo Montano Bajo y Bosque Pluvial Montano Bajo (tabla 2).

Tabla 2. Zonas Ecológicas Naturales de Puerto Rico. Fuente DRNA

Zonas Biológicas y Ecológicas	% Cubierta Boscosa Total	Área (km ²)
Bosque Seco Subtropical	17.6	1582
Bosque Húmedo Subtropical	58.4	5250
Bosque Muy húmedo Subtropical	22.6	2032
Bosque Pluvial Subtropical	0.1	9
Bosque Muy Húmedo Montano	1.2	108
Bosque Pluvial Montano Bajo	0.1	9

El Bosque Seco Subtropical, como bien dice su nombre, es el más seco de las seis zonas en la Isla. Éste se puede encontrar en el suroeste de Puerto Rico (Bosque Seco de Guánica), Isla Mona, Vieques, Culebra y Desecheo (DRNA, 2005b). La precipitación puede variar desde 609 mm hasta 1016 mm anuales. Su vegetación no suele superar los 15 metros de altura, es de carácter boscoso organizado en estratos continuos y con un alto porcentaje de especies caducifolias. Durante la estación seca suele acumularse gran cantidad de hojarasca en el suelo.

Dentro de las especies más comunes en estos bosques son: la bayahonda (*Prosopis juliflora*), el sebucán (*Cephalocereus royenii*), albarillo (*Exostema caribaeum*), guayacán (*Guaiacum officinale*) y la aroma acacia dulce (*Acacia farnesiana*) entre muchas más.

El Bosque Húmedo Subtropical es la mayor extensión boscosa del país. Se encuentra en los llanos costeros y las pendientes de la Cordillera Central (DRNA, 2005b). La precipitación varía de 1270 mm hasta 2159 mm anuales. Estos terrenos han sido alterados para la actividad agrícola durante siglos debido a su clima y la precipitación que reciben todo el año. Su vegetación suele alcanzar los 20 metros de altura con copas redondas. Algunas especies más comunes en estas zonas son: la palma real (*Roystonea borinquena*), roble blanco (*Tabebuia heterophylla*), laureles (*Nectandra*, *Ocotea*), flamboyán (*Delonix regia*), cedro hembra (*Cedrela odorata*) y el tulipán africano (*Spathodea campanulata*) entre otros.

El Bosque Muy Húmedo Subtropical ocupa la mayoría de las parte altas de las Cordilleras de Puerto Rico. Esta zona es de precipitación muy abundante y cuenta con un promedio entre 2032 mm y 4064 mm anuales. Es un bosque relativamente rico en especies y las tasas de crecimiento de algunos árboles es rápida. Contiene más de 150 especies y entre ellas se encuentran los helechos, las bromeliáceas, las orquídeas epífitas

y el cacao motillo (*Sloanea berteroniana*). La zona boscosa suele alcanzar los 20 metros de altura y crea una gran cubierta vegetal densa.

El Bosque Pluvial Subtropical es la zona más lluviosa de todo Puerto Rico. El límite inferior de precipitación es de 3810 mm anuales. Este tipo de bosque existe solamente en aquellas laderas expuestas directamente a los Vientos Alisios como las montañas de la Sierra de Luquillo o el Bosque Experimental de Luquillo. Se encuentran muchas especies identificadas y otras que aún no. En lo común abundan los helechos arbóreos y la palma de sierra.

El Bosque Muy Húmedo Montano Bajo se encuentra en las zonas más orientales y centrales de la isla extendiéndose hasta las cimas de las montañas llegando a alcanzar los 1000 metros de altitud (JP, 2006). En esta zona se han identificado 53 especies de árboles y dos asociaciones florísticas muy importantes: el Bosque Enano y el Bosque de Palma de Sierra. El Bosque Enano cuenta con árboles no más altos de 8 metros, de diámetro pequeño y crecimiento lento. El Bosque Palma de Sierra está dominado por una sola especie, la palma de sierra (*Prestoa montana*).

El Bosque Pluvial Montano Bajo es el de menor extensión territorial en la Isla. Se encuentra en las laderas de sotavento de la Sierra de Luquillo inmediatamente sobre el Bosque Pluvial Subtropical (DRNA, 2005b). La precipitación media anual es de 4445 mm anuales. La vegetación es muy similar al Bosque Muy Húmedo Montano Bajo; sin embargo las características que distinguen una zona de otra son la presencia y la mayor abundancia de plantas creciendo sobre las ramas de otros árboles (epifitas y epifilias) y la presencia de palma de sierra y los helechos arbóreos.

3.3.5 Usos de Suelo de Puerto Rico

En Puerto Rico los usos de suelo principales son los bosques, la agricultura, el desarrollo urbano y los recursos hídricos tales como, quebradas, ríos, embalses, humedales y estuarios (JP, 2006). Históricamente en la Isla el cambio de uso de suelo responde a factores socio-económicos como en muchos otros países. Desde el punto de vista demográfico, la Isla es un territorio mayoritariamente urbano (tabla 3), donde el suelo construido llega a un 13% del total de la isla y la porción urbana del suelo construido alcanza el 69% del total (JP, 2006). Las áreas naturales protegidas ocupan sólo el 10% del total del país y el 34% del total de las áreas naturales (JCA, 2005).

Tabla 3. Población Rural y Urbana de Puerto Rico. Fuente Villanueva Colón, 2002.

Año	% Pob. Rural	% Pob. Urbana
1940	69.7	30.3
1960	55.8	44.2
1980	33.2	66.8
2000	28.8	71.2

La actividad agrícola y la transición económica por la que pasó el país son factores determinantes en la distribución poblacional de la isla, y por consiguiente en los usos de suelo. La mayor parte de los bosques en la Isla fueron destruidos o alterados para la actividad agrícola en la época colonial. Los desarrollos urbanos se encontraban en

comunidades y pueblos en el interior de la isla cercanos a ríos, quebradas y cuerpos de agua para el abastecimiento público y agrícola. Este tipo de sector económico se mantuvo como la actividad principal de la isla hasta mediados del siglo XX, hasta la creación del Estado Libre Asociado en 1952. Ya en los años 60 con la llegada de la industria, la manufactura fue remplazando la actividad tradicional y creando nuevos núcleos de población en los llanos costeros de la Isla.

Los llanos costeros son la región con menor extensión territorial, no obstante es la que sustenta alrededor del 80% del desarrollo urbano en el país, con mayor densidad poblacional y actividades económicas. Cuentan con una gran diversidad ecológica, humedales, acuíferos aluviales y terrenos aptos para la agricultura industrial; además son las zonas más propensas a inundaciones.

Los llanos costeros del centro norte de la isla han sido utilizados durante mucho tiempo para la actividad agrícola, sobre todo en los municipios de Manatí y Arecibo. Sin embargo también albergaban zonas industriales (en especial farmacéuticas) y zonas residenciales. En la zona metropolitana de San Juan se encuentran las bancas, las industrias, las agencias de gobierno y gran parte de la actividad comercial de la Isla, al igual que en Mayagüez y Ponce, donde la isla cuenta con universidades, puertos, aeropuertos e industrias.

Los llanos costeros del sur también representan en la Isla una de las zonas más importantes para la actividad agrícola e industrial. Los suelos son fértiles para la actividad agrícola, aunque ésta no sería posible sin un sistema de riego artificial (Cruz Báez y Guilbe, 2002). La actividad industrial de esta zona se estableció en la década de los 60 entre el municipio de Ponce y Guánica, no obstante la mayoría de las industrias cesaron sus actividades a partir de 1980 (USGS, 1996).

Los llanos costeros del suroeste, son los llanos que se encuentran localizados al oeste del municipio de Ponce (JP, 2006). Estos llanos están compuestos por valles y suelos aluviales fértiles para la agricultura, posible gracias a sistemas de riego artificiales debido a la aridez de la zona. Debido a lo relativamente seco que es el clima en la zona, se hace posible la producción de sal en la costa (JP, 2006).

El desarrollo urbano en la zona oeste es de menor intensidad comparado con las costas del norte y del sur, sin embargo ha recibido un incremento de desarrollos turísticos y actividad de industria liviana en la última década. Como todos los llanos costeros de la isla, estos también poseen gran cantidad de suelos potencialmente agrícolas (JP, 2006). El uso de suelo en Puerto Rico se dividió en 8 categorías sugeridas por el Servicio Forestal de Estados Unidos (DRNA, 2005b):

- **Agrícola (incluidos los pastos para el ganado)**- Cuenta con algunos municipios ubicados en los cuatro llanos costeros y muy poco en el centro de la Isla. Esta área comprende de 517.9 km² aproximadamente.
- **Bosques, arboleda y matorrales (incluye manglares)**- Éste es el uso predominante en Puerto Rico. Los bosques constituyen un 41% de la extensión territorial, aproximadamente 3962 km².

- **Humedales emergentes con vegetación no leñosa-** Ubicados mayormente en los llanos costeros donde el suelo no permite un drenaje adecuado y el manto freático permanece cercano a la superficie. Cubren aproximadamente un área de 56 km² y representa un 0.9% de la extensión territorial.
- **Vegetación no leñosa de sucesión secundaria-** Son pastos o gramas (césped) y constituyen el segundo puesto en extensión territorial de la Isla. Cubren un área de 3289 km² representado un 36%.
- **Salinas y salitrales-** Su extensión territorial es mínima y apenas alcanza 33 km² en toda la isla.
- **Urbano y sin cubierta vegetal-** Se estima que éste representa un 16% de la extensión territorial de la Isla. Alcanzando los 1000 km² aproximadamente. Éstos se encuentran en las zonas metropolitanas de San Juan, Mayagüez, Ponce, Arecibo, Caguas y Aguadilla. Luego el suelo urbano cuenta con una nomenclatura y subclasificaciones utilizadas para los Planes de Uso de Terreno de Puerto Rico realizados por la Junta de Planificación. Entre ellos: suelo urbano, suelo urbanizable, suelo rústico y áreas de planificación especial.
- **Cuerpos de agua-** Todos los embalses, ríos, quebradas y lagunas.
- **Uso sin definir-** Estos usos representan un 3.3% de la extensión territorial. Son usos que no corresponden con la clasificación antes mencionada y alcanza unos 284 km² aproximadamente.

3.3.6 Recursos Hídricos de Puerto Rico

3.3.6a Recursos Hídricos Superficiales

La distribución de los sistemas fluviales en la isla está relacionada con su topografía. La red fluvial de Puerto Rico está compuesta por ríos, quebradas y riachuelos (Barreto, 2002). Muchas islas cuentan con problemas de abastecimiento de agua debido a su limitado tamaño que no les permite la construcción de embalses. Puerto Rico es un territorio insular, que no representa los mismos problemas ya que su tamaño es lo bastante grande como para abarcar los 36 embalses con los que cuenta al día de hoy (Fig. 14). Los embalses de Puerto Rico comenzaron su construcción a principios del siglo pasado (1913) para diversos usos: riego agrícola, energía, agua potable, control de inundaciones y recreación (DRNA, 2004a.)

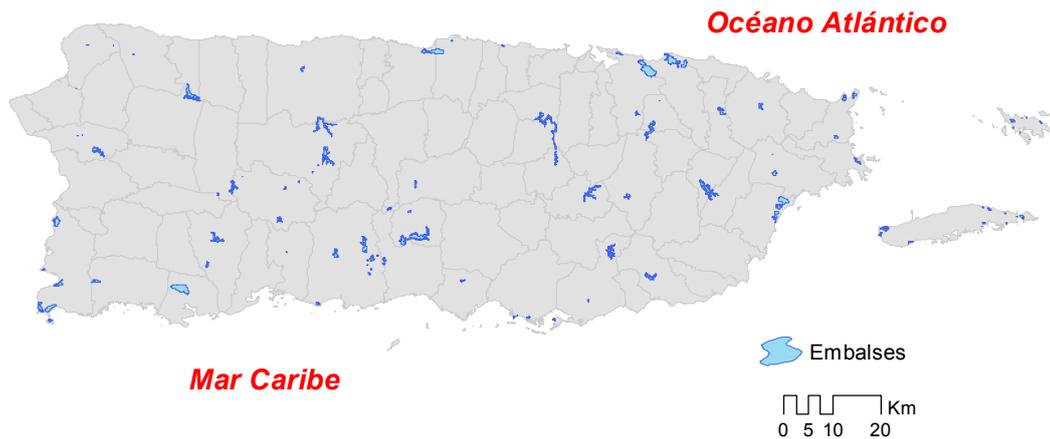


Figura 14. Embalses de Puerto Rico 2000. Fuente Junta de Planificacion 2004.

Es en la Cordillera Central donde nacen la mayor parte de los ríos de Puerto Rico y debido a su topografía escarpada forma cuatros vertientes principales (JP, 2006). La isla cuenta con 224 ríos (Fig. 15) y 553 quebradas catalogadas (todos ellos en la isla grande; los municipios de Vieques y Culebra no cuentan con ríos). Entre estos 224, sólo 55 ríos descargan al mar los demás cuentan como tributarios de ríos principales (DRNA, 2007). La isla no cuenta con lagos naturales, sin embargo para obtener cierto control y gestión de los recursos hídricos, se han construido 36 embalses de los cuales 21 se consideran obra mayor del Estado (DRNA, 2007). Además cuenta con lagunas naturales de agua dulce, las únicas dos que se mantienen hoy en día y que han permanecido, Laguna Tortuguero y Laguna Cartagena, las demás han sido drenadas para actividades agrícolas (DRNA, 2007).

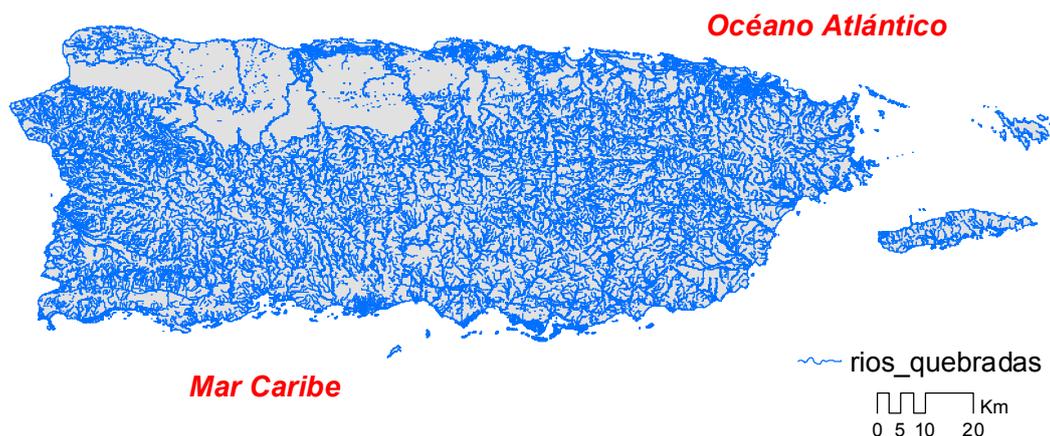


Figura 15 Ríos y Quebradas de Puerto Rico. Fuente Junta de Planificación 2004

Las cuencas hidrográficas integran todas las aguas superficiales de un sistema de drenaje natural y juegan un papel importante como fuente de alimento, abastecimiento de agua, energía y recreación. Estos flujos de agua son cruciales para la salud, productividad de estuarios y aguas costeras. Según el Censo de Población y Vivienda se

estima que un 36% (3218 km²) del área total de Puerto Rico está ocupada por algún cuerpo de agua (JP, 2006). Las cuencas en la isla representan una gran diversidad de formas, entre ellas las cuencas dendríticas, las radiales, las rectangulares y las ramificadas (Barreto, 2002).

Existen cuatro Regiones hidrográficas (Fig. 16), la Región del Carso Norteño o Cibuco-Guajataca, la Región de la Costa Este, Región de la Costa Sur y la Región de la Costa Oeste o Culebrinas-Guanajibo (JCA, 2005). Estas regiones hidrográficas a su vez se subdividen en cuencas hidrográficas. La isla cuenta aproximadamente con 134 cuencas individuales (DRNA, 2004a). Según otras administraciones y el sistema de segmentación cuenta con sólo 96, de las cuales 21 se consideran las principales según el nuevo sistema de segmentación (López Marrero y Villanueva Colon, 2006).



Figura 16. Regiones hidrográficas y cuencas principales de Puerto Rico. Fuente de Datos: JP, 2006.

De estas 96 cuencas, 62 de ellas cuentan con estuarios en los tramos bajos (desembocadura) y sólo 21 de ellas se consideran principales (JCA, 2005). De estas 21 cuencas principales 18 fueron clasificadas como cuerpos de agua de alta prioridad en 1998 bajo el documento “*Puerto Rico Unified Watershed Assessment and Restoration Activities*” creado por la Junta de Calidad Ambiental de Puerto Rico, el Servicio Federal de Conservación de Recursos Naturales y la Agencia Federal para la Protección Ambiental (USEPA por sus siglas en inglés).

No todas las regiones en el país reciben la misma cantidad de agua como se describió anteriormente. En la vertiente norte o Vertiente Atlántica todos los ríos son largos, de aguas tranquilas, de gran caudal y desembocan en el Atlántico. Es la Cordillera Central la que hace de principal línea divisoria en la isla. Todos los ríos principales se originan en las partes más altas de la Cordillera Central y la Sierra de Luquillo. Esta región norte es una de las más importantes para el país por la abundancia de precipitación que recibe

debido al factor de lluvia orográfica. Está compuesta por 14 cuencas de las cuales sólo cinco de ellas son las principales. La constituyen decenas de ríos de primer orden, segundo orden y tercero (Barreto, 2002). El paisaje de esta vertiente está caracterizado por zonas de humedales tales como lagunas, ciénagas y pantanos debido a que existen áreas donde la elevación del terreno es negativa en relación con el nivel del mar (USGS, 2002a).

La vertiente sur cuenta con ríos de cauces cortos debido a la proximidad de la Cordillera Central y todos ellos desembocan en el Mar Caribe. Cuenta con 19 cuencas, y a diferencia de los ríos del norte que contienen gran variedad de afluyentes, éstos carecen de muchos tributarios, y la mayoría de sus ríos y quebradas son intermitentes (Barreto, 2002). Mantienen sus flujos de agua sólo en temporada de lluvia o cuando ocurren fenómenos atmosféricos anormales que resultan en lluvias intensas en la época de sequía (JCA, 2005). Esto provoca que ocurran inundaciones repentinas. No obstante los ríos del sur más próximos al este de la isla no presentan estas mismas características.

La región del este, está constituida por ríos cortos debido a su proximidad con la sierra de Luquillo, son de pronunciada pendiente y estrechos, mayormente nacen en esta misma sierra y desembocan en aguas del Atlántico. Su paisaje natural es el resultado de lo que han cortado los ríos en su topografía montañosa. Esta vertiente cuenta con 7 cuencas hidrográficas de menor tamaño y pocas ramificaciones (Barreto, 2002).

La vertiente oeste se caracteriza por un régimen lluvioso con sus picos más altos en los meses de mayo a noviembre y está constituida por 6 cuencas hidrográficas aproximadamente (JCA, 2005). Estos cauces se mantienen con flujos de agua durante todo al año y son relativamente largos comparados con los ríos del este y el sur de la isla, sin embargo estos flujos sí disminuyen considerablemente en los meses de sequía, de diciembre a abril.

3.3.6b Recursos Hídricos Subterráneos

La isla cuenta con numerosos acuíferos a través de todo su territorio, de suma importancia para el país. En la isla grande de Puerto Rico, el sistema de aguas subterráneas está constituido por cinco provincias hidrológicas (Fig. 17) o depósitos de aguas subterráneas (USGS, 1996). Cuenta también con unas formaciones geológicas que funcionan como acuíferos y están agrupadas en tres formaciones fundamentales: depósitos aluviales, roca caliza (cárstica) y roca ígnea (DRNA, 2007). En ellas se encuentran: El Carso Norteño, la Costa Este, la Costa Sur, la Costa Oeste y el Interior Montañoso (USGS, 1996).

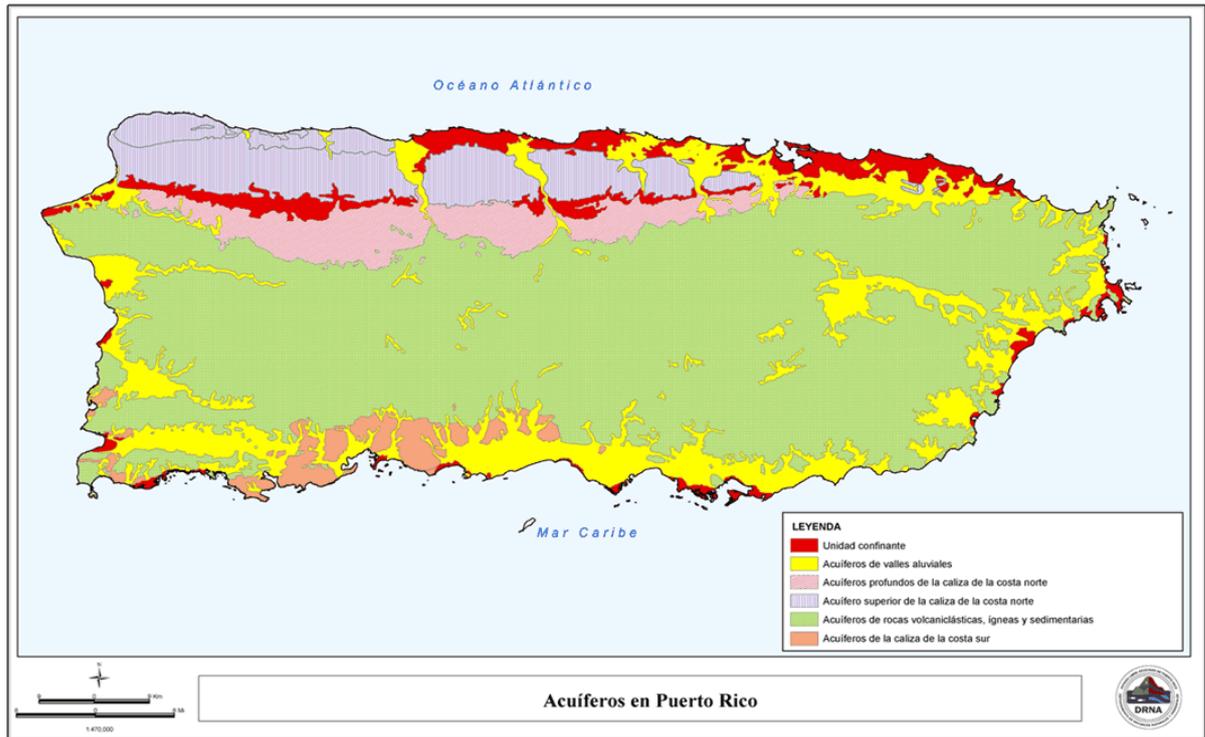


Figura 17. Acuíferos de Puerto Rico. Fuente. Departamento de Recursos Naturales de Puerto Rico

- Acuíferos de la Costa Norte o Provincia del Carso Norteño

Es en esta provincia donde se encuentran los acuíferos principales y más extensos de toda la isla grande, conocidos como El Gran Acuífero del Norte (USGS, 1978). Está compuesto por acuíferos calizos, cubren un área equivalente 1554 km² con un espesor del terreno de 1707 m (USGS, 1996). Esta región es un acuífero complejo en su estructura y funcionamiento. Consiste en dos acuíferos de roca caliza, uno por encima del otro, separados por una formación de baja permeabilidad (DRNA, 2004b). Especialmente existen dos sistemas principales en esta zona: el Acuífero Superior (Acuífero Llano o Freático) y el Acuífero Inferior (Acuífero Profundo o Artesiano), sin embargo el Servicio Geológico de los Estados Unidos, divide esta zona en cuatro regiones (USGS, 1996). De oeste a este, Aguadilla-Hatillo, Arecibo-Manatí, Vega Baja-Toa Baja y Bayamón-Loíza. La explotación para uso doméstico de este recurso en la región es sumamente limitada. El uso doméstico proviene del embalse de Guajataca, no obstante estos acuíferos se utilizan para la producción agrícola e industrial, especialmente las farmacéuticas (Barreto, 2002).

Los acuíferos calizos reciben recarga mediante la percolación de lluvia a través del suelo, por la descarga de escorrentía superficial hacia los sumideros y mediante infiltración por el fondo de los ríos. Ambos descargan hacia el fondo del mar, aunque el Acuífero Superior también descarga en las lagunas costeras, manantiales y humedales (JP, 2006).

El Acuífero Superior está compuesto por rocas calizas con niveles altos o moderados de permeabilidad, formado por capas de aluvión sobre rocas calizas en forma de abanicos

en los valle costeros. Primordialmente se le denominan Aymamón, Cibao, Camuy y Aguada y son los más productivos, con mayor capacidad de almacenaje de agua y se extiende desde Luquillo hacia el oeste (DRNA, 2004b). Las capas de aluvión de este acuífero varían entre 0 y 499 metros y es fuente de abasto de agua para consumo, uso industrial y actividad agrícola (JP, 2006). Se estima que en el año 2002 se utilizaban 196 mil m³ diarios (DRNA, 2007).

El Acuífero Inferior (Profundo o Artesiano) está constituido por rocas calizas de las formaciones de San Sebastián, Lares y Montebello confinadas por estratos de barros y cienos de la formación del Cibao (DRNA, 2007). El acuífero se extiende desde la zona metropolitana de San Juan hasta Aguadilla, aunque las zonas con mayor productividad de agua se encuentran entre los municipios de Manatí y Arecibo (JP, 2006). El agua extraída de este acuífero también se utilizaba para distintos propósitos (consumo doméstico, agrícola e industrial farmacéutico) y se estima que en el 2002 se consumían 26 mil m³ diarios (DRNA, 2007).

- Acuíferos Aluviales

Estos acuíferos se encuentran principalmente en las planicies inundables de la Costa Sur y algunos valles interiores, sin embargo también existen en la Costa Norte (USGS, 1996). Aunque la Costa Sur es conocida como “El Gran Acuífero del Sur”, ésta es una concepción equivocada ya que no existe un acuífero continuo. La zona está compuesta por una serie de acuíferos aluviales separados por ríos en segmentos principales y comprende un área de 596 km² (JP, 2006). El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales divide los acuíferos en varios sectores; municipio de Patillas a Salinas, Coamo (Santa Isabel-Coamo), Juana Díaz a Ponce, (Tallaboa) Peñuelas, Guayanilla, Yauco, Guánica y el Valle de Lajas (USGS, 2002). Estos acuíferos son formaciones no consolidadas de arenas y gravas permeables depositadas por los ríos antiguos (DRNA, 2007). Las áreas de mayor permeabilidad corresponden a las zonas de arena y grava de los cauces ancestrales (DRNA, 2003). Sin embargo, estos acuíferos son menos productivos que los de la costa norte ya que contienen mucha más arcillas en sus sedimentos y las arcillas son muy poco permeables (DRNA, 2003). La fuente de recarga más importante para estos acuíferos son los excedentes de agua que se utilizan para el riego de la diferentes actividades agrícolas (USGS, 1996). También influyen en menor medida la percolación de lluvia en los suelos y la infiltración por los fondos de los ríos (USGS, 1996). Estos acuíferos descargan sus aguas en el fondo del mar, los fondos de los ríos y humedales (DRNA, 2007).

Estos acuíferos de la costa sur representan el 31% del agua utilizada en esta región y proporcionaron unos 190 mil m³ diarios. De ellos, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) extrae 96 mil m³, las fincas agrícolas 87 mil m³ y las industrias 7 mil m³ (USGS, 2002).

- La Provincia de la Costa Este

En esta provincia se encuentran cuatro acuíferos aluviales costaneros: Río Espíritu Santo al Río Demajagua, Río Humacao al Río Naguabo y del Río Yabucoa al Río Maunabo (USGS, 1996). Los mismos están formados por depósitos aluviales de espesor

limitado en valles relativamente estrechos, es decir que son acuíferos pequeños. Debido a esto, no se consideran recursos hídricos de gran importancia y son poco significativos para la región (JP, 2006). Al igual que muchos de los otros acuíferos de la isla su fuente de recarga son las lluvias, las escorrentías y la percolación de los ríos y las quebradas.

- La Provincia de la Costa Oeste

Esta provincia también incluye una serie de acuíferos que son pequeños y de capacidad muy limitada, por lo cual al igual que la costa este se consideran acuíferos de poca importancia y muy poco significativos. Hasta ahora hay sólo cuatro acuíferos identificados y también son depósitos aluviales de espesor limitado en valles estrechos: Río Guanajibo, Río Yaguez, el Río Grande Añasco y el Río Culebrinas (JP, 2006).

- La Provincia del Interior Montañoso o los Acuíferos de los Valles Interiores

Ésta es la provincia de mayor extensión en Puerto Rico y cubre un área de 5159 km² (JP, 2006). Estos acuíferos del interior generalmente consisten de rocas volcánicas fracturadas con interconexión hidráulica con el aluvión y depósitos aluviales (DRNA, 2007). Los de mayor caudal son los que consisten en depósitos de aluvión en los valles de Caguas a Juncos y de Cayey a Cidra (DRNA, 2004). Los acuíferos que se ubican en las fracturas de roca volcánica son de menor importancia que los aluviales debido a las características que lo definen (DRNA, 2005b). Estos recursos no tienen conexión hidráulica con el mar por lo cual no están sujetos a la intrusión salina que los acuíferos costeros pueden sufrir. Sin embargo sí tienen presencia de minerales como el manganeso y el hierro que pueden causar problemas de calidad en algunas áreas (DRNA, 2007).

4. MATERIALES Y MÉTODOS



Embalse Dos Bocas, PUERTO RICO

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales

Para realizar este análisis se utilizaron 36 estaciones pluviométricas (Fig. 18), 16 estaciones termométricas y 4 estaciones hidrológicas (una en cada cuenca). Las estaciones meteorológicas seleccionadas pertenecen al Servicio Nacional de Meteorología de la agencia federal estadounidense NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), *the Southeast Regional Climate Center*. Los datos se obtuvieron del *Historical Climate Summaries for Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands*.

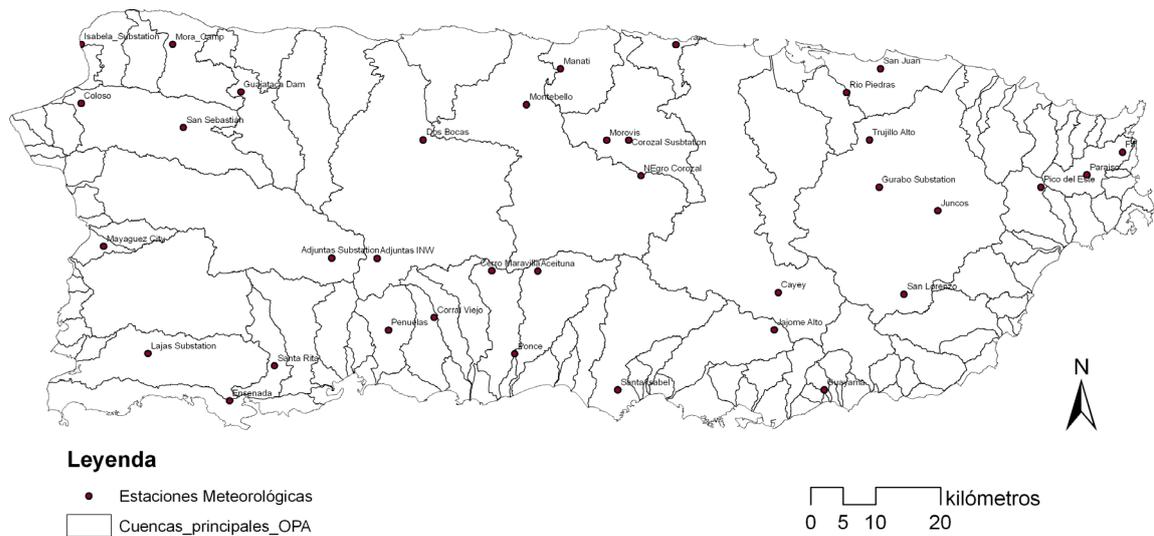


Figura 18. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas y cuencas principales de Puerto Rico.

Para las estaciones pluviométricas se utilizaron datos totales mensuales y para la temperatura se utilizaron datos medios mensuales. No obstante, para el análisis hidrológico se utilizaron datos diarios. Se seleccionaron todas aquellas estaciones meteorológicas e hidrológicas que superaran los 31 años de datos disponibles donde la serie fuera lo más reciente posible (NOAA, 2002). Como se observa en la tabla 4, no todas las estaciones cuentan con el mismo periodo de estudio. Al momento de seleccionar las estaciones, lo primero que se tuvo en cuenta fue la calidad de los datos disponible para cada estación. Las estaciones donde existían grandes lagunas y donde faltaban gran cantidad de datos fueron descartadas, en las que faltaran más de tres años para cada serie y donde faltaran más de tres meses por cada año (González Hidalgo et al. 2002a; NOAA, 2002).

Tabla 4. Estaciones meteorológicas utilizadas en la isla. Altitud en metros sobre el nivel medio del mar. Fuente NOAA.

ESTACIONES (años)	Periodo	Código	Elevación (m)	Coordenadas	% de observaciones para el periodo de años
Adjuntas 1NW (52)	1955-2006	660053	457.2	18 10 N 66 44 W	92.8%
Adjuntas Substation (37)	1970-2006	660061	557.8	18 10 N 66 48 W	98.9%
Aceituna (51)	1955-2005	660040	652.3	18 09 N 66 30 W	97.5%
Cayey (45)	1956-2000	661901	417.6	18 07 N 66 09 W	98.4%
Coloso (60)	1948-2007	662801	12.2	18 23 N 67 10 W	97.7%
Corral Viejo (37)	1971-2007	663023	175.0	18 05 N 66 39 W	98.0%
Cerro Maravilla (37)	1970-2006	662336	1219.8	18 09 N 66 34 W	94.7%
Corozal Substation (52)	1955-2006	662934	198.1	18 20 N 66 22 W	92.4%
Dorado 2WNW (58)	1948-2005	663409	1.5	18 28 N 66 18 W	93.0%
Dos Bocas (58)	1948-2006	663431	61.0	18 20 N 66 40 W	96.3%
Ensenada 1NW(53)	1955-2007	663532	64.9	17 58 N 66 57 W	96.6%
Fajardo (48)	1948-1995	663657	7.0	18 19 N 65 39 W	97.1%
Guajataca Dam (52)	1955-2006	663904	202.1	18 24 N 66 56 W	96.8%
Guayama 2E (60)	1948-2007	664193	22.0	17 59 N 66 05 W	92.8%
Gurabo Substation (51)	1957-2007	664276	48.8	18 16 N 66 00 W	99.0%
Isabela Substation (58)	1949-2006	664702	128.0	18 28 N 67 10 W	96.5%
Jajome Alto (53)	1955-2007	664867	727.0	18 04 N 66 09 W	98.7%
Juncos 1SE (60)	1948-2007	665064	64.9	18 14 N 65 55 W	95.6%
Lajas Substation (60)	1948-2007	665097	27.4	18 02 N 67 04 W	96.6%
Manatí (50)	1956-2005	665807	76.2	18 26 N 66 28 W	94.5%
Mayaguez City (59)	1948-2006	666073	22.6	18 11 N 67 08 W	92.7%
Montebello (32)	1970-2001	666270	195.1	18 23 N 66 31 W	97.7%
Mora Camp (53)	1955-2007	666361	125.0	18 28 N 67 02 W	99.1%
Morovis 1N (49)	1957-2005	666390	182.9	18 20 N 66 24 W	98.8%
Negro Corozal (32)	1976-2007	666514	521.2	18 17 N 66 21 W	97.6%
Paraíso (52)	1956-2007	666805	1005.8	18 17 N 65 42 W	96.8%
Peñuelas (32)	1972-2003	666983	97.5	18 04 N 66 43 W	99.5%
Pico del Este (35)	1970-2004	666992	1051.1	18 16 N 65 46 W	96.5%
Ponce (53)	1955-2007	667292	21.3	18 02 N 66 32 W	95.8%
Río Piedras (45)	1959-2003	668306	28.0	18 24 N 66 03 W	94.3%
San Juan WSFO (52)	1956-2007	668812	2.7	18 26 N 66 00 W	99.8%
San Lorenzo (39)	1969-2007	668815	164.5	18 07 N 65 58 W	93.2%
San Sebastián (41)	1956-1996	668881	51.8	18 21 N 67 01 W	98.7%
Santa Isabel (53)	1955-2007	668940	21.3	17 59 N 66 23 W	94.9%
Santa Rita (53)	1955-2007	668955	24.4	18 01 N 66 53 W	91.1%
Trujillo Alto (38)	1970-2007	669521	35.1	18 20 N 66 01 W	94.5%

Las estaciones hidrológicas (tabla 5) pertenecen al *Water Resources Center of the United States*, de la agencia federal estadounidense USGS (*United States Geological Survey*). Los datos para la isla fueron obtenidos del USGS *Surface-Water data for Puerto Rico* encontrados en el *National Water Information System: Web Interface* (NWIS).

Respecto a las estaciones hidrológicas, se utilizó el año hidrológico, de octubre a septiembre, como lo define el USGS. Se tuvo en cuenta, además, que las cinco estaciones escogidas no se encontraran aguas abajo de ningún tipo de embalse o derivación, ya que esto podría alterar los resultados obtenidos en el análisis. Se insistió en que la estación se ubicara en un área donde la escorrentía tuviera lo más parecido a un régimen natural.

Tabla 5. Estaciones hidrológicas utilizadas. Altitud en metros sobre el nivel medio del mar.
Fuente USGS.

Estación	Código USGS	Lat.	Long.	Altitud (m)	Unidad Hidrológica	Periodo (años)
Río Tanamá NR Utuado	50028000	18°18'02"	66°46'58"	285.9	21010002	1960/2004
Río Grande de Manatí en Ciales	50035000	18°19'26"	66°27'36"	42.6	21010002	1960/2004
Río Culebrinas	50147800	18°21'42"	67°05'33"	13.7	21010003	1967/2007
Río Fajardo	50071000	18°17'56"	65°41'42"	41.9	21010005	1961/2007

4.2 Métodos

4.2.1 Análisis Climatológico

El primer paso de este estudio fue convertir las medidas encontradas en las agencias federales con el sistema de medición imperial al sistema métrico internacional ya que los datos de temperatura son ofrecidos en grados Fahrenheit y la precipitación en pulgadas.

Para analizar la distribución de las series de datos, se aplicó la prueba no paramétrica de Thom (1969), conocida como la prueba de rachas. Ésta es una de homogeneidad absoluta para datos con distribuciones no conocidas o normales. Esta prueba permite comprobar si la sucesión de datos ocurre de manera aleatoria, y se basa en el número de rachas que presenta una muestra (WMO, 1983; 2003; Quereda et al. 2004). Consiste en contabilizar el número de rachas o tramos de la serie que quedan por encima y por debajo de la mediana. A partir del número de rachas simbolizado por R , se calcula el cociente o el estadístico Z :

$$Z = \frac{R - (n + 2) / 2}{\sqrt{n(n - 2) / 4(n - 1)}} \quad (1)$$

Siendo n el número de casos de la serie. Si $|Z| > 1.96$ la serie puede considerarse aleatoria y por tanto, homogénea a un nivel de significancia estadística de 0.05 (Martín-Vide et al. 2006).

Como algunas estaciones presentaban pérdida de datos, ha sido necesario reconstruir algunas lagunas para no obtener los resultados del análisis alterado. Se dio paso a la reconstrucción de lagunas y datos ausentes. Existen varios criterios para rellenar datos ausentes. Entre ellos está la distancia entre los observatorios vecinos o estaciones, y el coeficiente de correlación r_s calculado entre las mismas (González Hidalgo et al. 2002a; Ramos Calzado et al. 2007). Estas estaciones fueron reconstruidas mediante observatorios vecinos donde existía una correlación entre ellos no menor de $r_s = 0.7$ y un valor $p < 0.05$ recomendado por varios autores (González Hidalgo et al. 2002a). El número de vecinos a utilizar recomendado varía entre diferentes estudios, sin embargo un solo observatorio es bien aceptado siempre y cuando sea de calidad ($r_s > 0.8$) (González Hidalgo et al. 2002a). Esta correlación se debe realizar con los datos brutos de las estaciones a utilizar para rellenar las lagunas (González Hidalgo et al. 2002b).

Se trabajó con datos mensuales pluviométricos y termométricos. Se realizaron análisis de estadística descriptiva con datos anuales y mensuales para todas las estaciones de cada cuenca. Para el cálculo de la precipitación media en las cuencas, se obtuvo la media aritmética y se utilizaron los Polígonos de Thiessen (1911) o Diagramas de Voronoi (Thiessen, 1911; Bayraktar et al. 2005; Buytaert, 2006; Dong, 2008) para obtener la media ponderada. El hecho de que la cantidad de lluvia varíe considerablemente sobre el territorio, nos lleva a hacer uso de los Polígonos de Thiessen. El área de influencia de cada estación considerada está comprendida exclusivamente dentro de la cuenca (tabla 6). En las figuras 19, 20, 21 y 22 se podrá observar en cartografía el área de influencia de cada estación en su cuenca.

Tabla 6. Área de influencia de cada estación, determinada mediante polígonos de Thiessen en cada cuenca.

Estación	Precipitación (mm)	Área del Polígono (km ²)	(%)
Cuenca Río Fajardo			
Fajardo	1591.4	18.9	28.0
Pico del Este	4340.0	11.6	17.0
Paraíso	2495.9	37.3	55.0
Cuenca Río Grade Arecibo			
Montebello	1558.9	22.3	3.0
Dos Bocas	1937.3	336.3	50.0
Adjuntas Substation	1909.6	33.4	5.0
Adjuntas 1NW	2006.8	158.2	24.0
Peñuelas	1398.4	0.9	0.1
Corral Viejo	1507.3	0.7	1.0
Cerro Maravilla	2420.3	112.9	16.9
Aceituna	1956.1	0.1	0.01
Cuenca Río Grade Manatí			
Manatí	1512.5	34.7	6.0
Montebello	1558.9	177.9	29.0
Dos Bocas	1937.3	33.1	5.0
Cerro Maravilla	2420.3	11.9	2.0
Aceituna	1956.1	119.8	20.0
Negro-Corozal	1821.9	158.6	26.0
Morovis	1803.4	72.1	12.0
Cuenca Río Cuelbrinas			
Mora Camp	1510.3	0.4	1.0
Guajataca Dam	1878.1	25.2	9.0
San Sebastián	2335.6	158.4	59.0
Coloso	1994.1	82.7	31.0

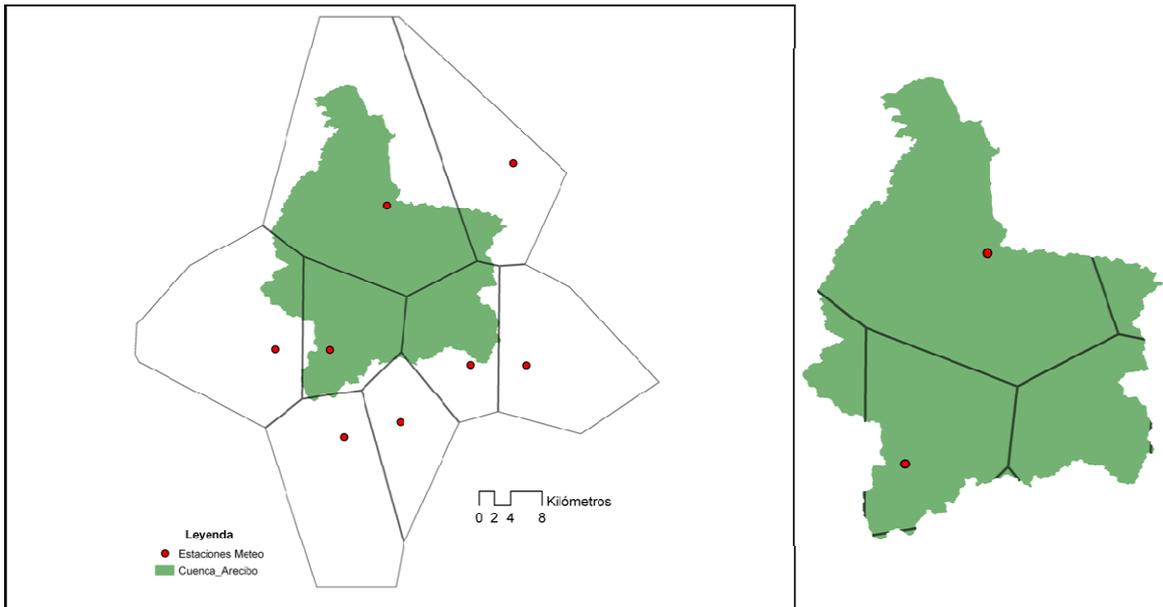


Figura 19. Polígonos de Thiessen. Cuenca Río Grande de Arecibo

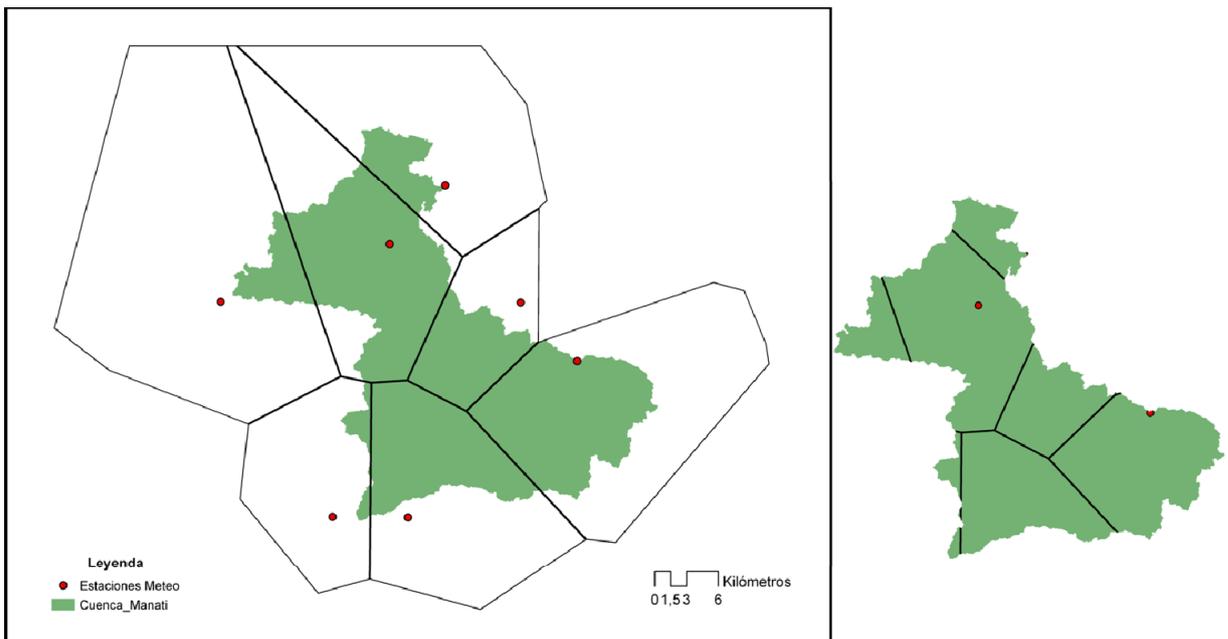


Figura 20. Polígonos de Thiessen. Cuenca Río Grande de Manatí.

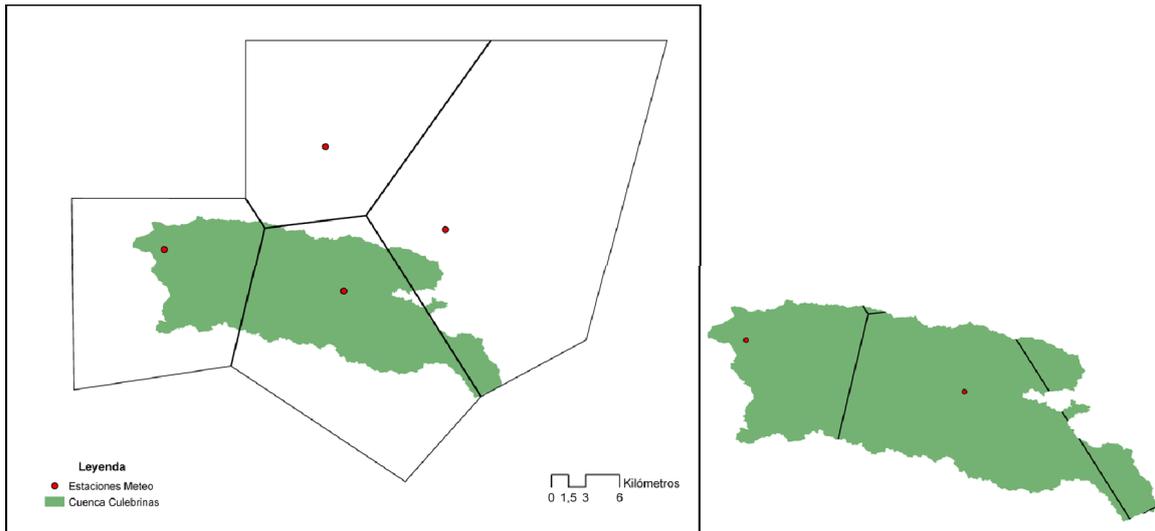


Figura 21. Polígonos de Thiessen. Cuenca Río Culebrinas

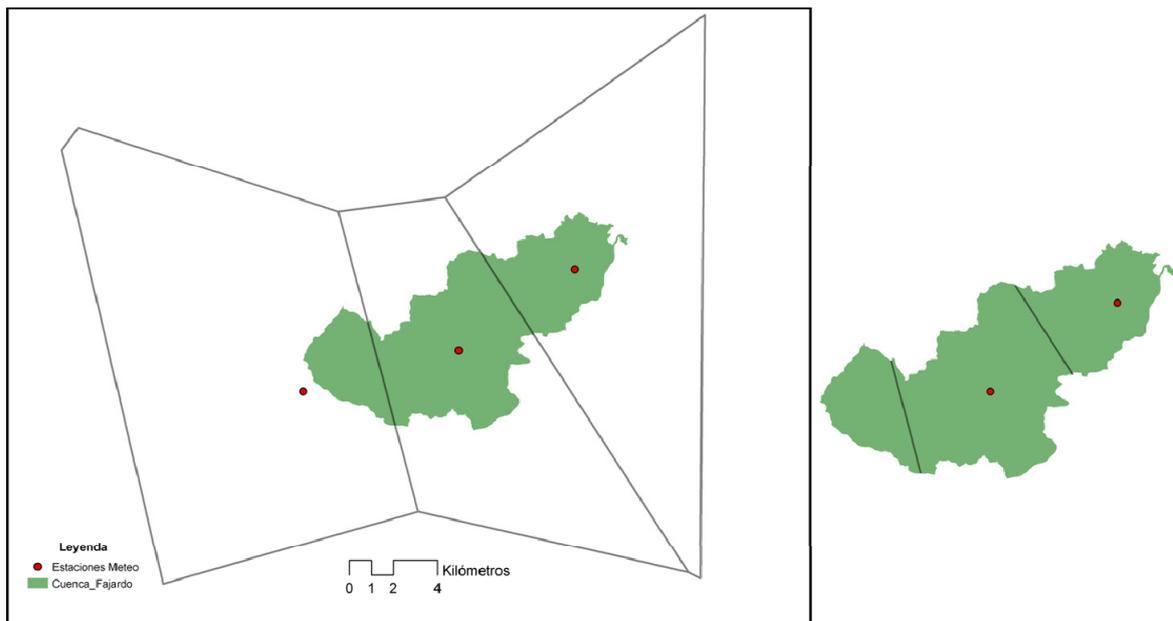


Figura 22. Polígonos Thiessen. Cuenca Río Fajardo.

Se obtuvieron también los valores de la media, valores máximos, valores mínimos, la desviación estándar y la variabilidad anual y mensual. Además, con estos datos se realizaron análisis de tendencias. También se calculó, para cada cuenca, la Evapotranspiración Potencial (ETP) mensual y anual.

Para calcular la Evapotranspiración Potencial (ETP) se utilizó el método Thornthwaite EEUU-1948 (Domingo et al. 2002). Aunque existen otros métodos más complejos para calcular la ETP, entre ellos Penman-Monteith-1965, Priestley-Taylor-1972 o Blaney-Cridley-1977, se ha utilizado el método Thornthwaite (ecuación 2, 3, 4 y 5) debido a la

disponibilidad de los datos existentes. Este método se basa, fundamentalmente, en la temperatura media de la zona de estudio (Domingo et al. 2002).

$$ETP = 1.6 \left(\frac{l_1}{12} \right) \left(\frac{N}{30} \right) \left(\frac{10T_a}{I} \right)^{a_1} \quad (2)$$

Donde l_1 es el número de horas reales de sol al día, N es el número de días del mes, T_a es la temperatura media mensual en grados Celsius y a_1 se define como:

$$a_1 = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49 \quad (3)$$

$$I = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (4)$$

I es el índice de calor derivado de la suma de los 12 valores mensuales i , donde i es la función de la temperatura media normal mensual.

$$I = i_{\text{enero}} + i_{\text{febrero}} + i_{\text{marzo}} + \dots + i_{\text{diciembre}} \quad (5)$$

Para el análisis de tendencias se utilizó el estadístico Rho de Spearman (ecuación 6) y el análisis de tendencias Mann-Kendall (MK) (Yue et al. 2001). Rho de Spearman es una prueba no paramétrica que implica la relación entre dos variables y mide la interdependencia entre éstas (Cruz Báez, 2006). Esta prueba varía entre -1 y 1, donde 1 es correlación positiva perfecta y -1 es correlación negativa perfecta. Cero significa la ausencia de correlación. Mientras más alto sea el resultado de r_s mayor relación existe entre ambas variables y mientras más cercano a cero, mayor es la ausencia de tendencia.

$$r_s = 1 - \left\{ \frac{6 \times \sum d^2}{N^3 - N} \right\} \quad (6)$$

Donde r_s es el rango de Spearman, d es la desviación y N es el número de casos (Cruz Báez, 2006).

Se acepta como estadísticamente significativa toda aquella prueba donde muestre un nivel de significación estadístico de 0.05 o menor. Este concepto de significación estadística no es sinónimo de taxativo, sino, más bien, se refiere a algo posiblemente cierto. Esto es, que si repetimos el análisis varias veces obtendremos resultados significativos en el 95% de los casos o que el resultado tiene un 0.05% de no ser cierto (Llobell et al. 2000; Sarria Castro y Silva Ayçaguer, 2004).

El análisis estadístico de Mann-Kendall (MK) también es una prueba no paramétrica muy robusta para detectar tendencias (EPA, 2006). Esta prueba ha sido altamente

recomendada por diferentes autores, así como por distintas administraciones ambientales para los estudios de tendencias con datos hidroclimáticos (USGS, 1997; Aesawy y Hasanean, 1998; Yue et al. 2001; EPA, 2006; Carlón Allende y Mendoza, 2007; Hamed, 2007; Luo et al. 2007; McBean y Hootie, 2008). Se trata de un procedimiento lineal conveniente para los datos con distribución no normal, para los que contienen valores extremos y tendencias no lineales (Carlón Allende y Mendoza, 2007; Baggaley et al. 2009). Mann-Kendall indicará si existe alguna tendencia negativa o positiva en cuanto a las precipitaciones, temperaturas y caudales.

La prueba se mide con el valor S (ecuación 7 y 8). Este valor se obtiene de la diferencia de un valor con respecto a los demás. Este análisis se define como:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x_j - x_k) &= +1 \text{ si } x_j - x_k > 0 \\ &0 \text{ si } x_j - x_k = 0 \\ &-1 \text{ si } x_j - x_k < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Donde n es el número de los datos observados en la serie. La hipótesis alternativa es que la distribución de x_j y x_k , los valores en periodos, no son idénticas para todos los $k, j \leq k$ con $k = j$ (Carlón Allende y Mendoza, 2007).

Este estadístico analiza el signo de la diferencia entre el dato posterior medido y el dato más reciente. Cada uno de los datos posteriores es comparado con cada uno de los datos anteriores. Se identifica una tendencia positiva si el dato posterior tiende a ser mayor que el dato previo y viceversa. Se identifica una tendencia negativa si el dato posterior tiende a ser menor que el dato más reciente (EPA, 2006). Si S muestra un valor altamente positivo entonces muestra claramente una tendencia positiva. Si S , por el contrario, muestra un valor altamente negativo entonces muestra una tendencia claramente negativa.

Para una serie de datos $n > 10$, se utiliza el estadístico Z . La hipótesis nula en este estadístico se basa en que no existe tendencia (ecuación 9 y 10). Valores obtenidos $|Z| > 1.645$, a un nivel de significación de 0.05, indican que se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

$$\begin{aligned} &\text{signo}(s): \\ &1 \text{ si } S > 0 \\ Z &= \frac{S - \text{signo}(s)}{\sqrt{V(S)}} \quad (9) \\ &0 \text{ si } S = 0 \\ &-1 \text{ si } S < 0 \end{aligned}$$

Donde $S = (\text{Total de diferencias positivas}) - (\text{Total de diferencias negativas})$ (EPA, 2006). Considerando que puede haber nodos en la serie (ecuación 10):

$$E(S) = 0 \text{ y,}$$

$$V(S) = \left[n(n-2n+5) - \sum_t t(t_j-1)(2t_j+5) \right] \div 18 \quad (10)$$

Donde t es la longitud de una cola y \sum_t denota a la sumatoria sobre todos los nodos con longitud t .

También se analiza la significación estadística de MK con el valor p . Este valor no cuantifica la probabilidad de que una hipótesis determinada sea cierta a la luz de los datos, sino que, la probabilidad de haber obtenido ciertos datos en el supuesto de que sea cierta determinada hipótesis como se ha comentado (Sarria Castro y Silva Ayçaguer, 2004). Esta prueba no transmite información sobre la magnitud del efecto.

Además se realizaron análisis de regresión para cuantificar las anomalías de las variables y la normalización (a través de la media y la desviación estándar) para la obtención de estadísticos comparables entre las estaciones y las cuencas.

Para establecer el comienzo y el fin de las tendencias detectadas se utilizó la versión secuencial del estadístico Mann-Kendall o el Mann-Kendall Secuencial, MKS (Luo et al. 2007; Ezber et al. 2007; Li et al. 2007). Esta prueba, al igual que la versión anterior, considera los valores relativos de todos los periodos en una serie de años. Esta prueba se define de la siguiente manera (Gerstengarbe and Werner, 1999):

$$a = \sum_{i=2}^m R_i \quad (11)$$

Donde R_i es para cada elemento x_i el número de elementos precedentes x_j ($i > j$) que sean menores que x_i ($x_i > x_j$) con $i = 2, \dots, m$ (tamaño de la muestra) y $j = 1, \dots, i-1$.

Diferente a MK, que calcula la tendencia para toda la muestra, la versión secuencial, MKS, es separada en $m-1$ sub-series, de manera que la primera sub-serie está compuesta de los valores de x_1, x_2 ; la segunda sub-serie se compone de x_1, x_2, x_3 , etc., y la variable a_k es determinada para cada una de las sub-series, k . De tal forma que $m-1$ se da de la siguiente manera:

$$a_k = \sum_{i=1}^k R_i \quad (12)$$

Donde R_i es para cada elemento x_i de la sub-serie k , el número de elementos x_j ($i > j$) de tal manera que $x_i > x_j$, con $i = 2, \dots, k$ y $j = 1, \dots, i-1$.

Para cada $m - 1$, una variable reducida debe ser calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$u(ak) = \frac{a_k - Ea_k}{\sqrt{\sigma_{ak}^2}} \quad (13)$$

Donde Ea_k es el valor esperado de la sub-serie respectiva con:

$$Ea_k = \frac{l_k(l_k - 1)}{4} \quad (14)$$

y σ_{ak}^2 es la respectiva varianza dado por:

$$\sigma_{ak}^2 = \frac{l_k(l_k - 1)(2l_k - 5)}{72} \quad (15)$$

Para $l_k \rightarrow \infty$ (l_k = longitud de la sub-serie k), a_k es aproximadamente de tipo Gaussiano con $u(a_k)$.

Para explicar la versión secuencial del Mann-Kendall, si $uak > 0$ la tendencia es positiva, por el contrario si $uak < 0$ la tendencia es negativa a un nivel de significancia estadística del 95% (± 1.96). La intersección entre la línea uak (serie temporal en sentido normal) y $uak(*)$ (serie temporal en sentido inverso) indica el punto de comienzo de la tendencia establecida.

4.2.2 Análisis Hidrológico

Para las 4 estaciones hidrológicas se utilizó una base de datos diarios. Al seleccionar las estaciones, el primer paso a realizar fue convertir nuevamente del sistema de medida imperial al sistema de medidas internacional, puesto que los datos hidrológicos brutos ofrecidos se encuentran en pies³/s, la aportación se encuentra en acres-pies/año y millones de galones diarios.

Una vez convertidos en el sistema métrico internacional (tabla 7), se realizaron análisis de estadística descriptiva para los datos de aportación y caudales. Para ello se calculó la media, la mediana, los valores máximos, valores mínimos, desviación estándar, y la variabilidad anual y mensual para las dos estaciones. También se obtuvieron los percentiles (25, 50, 75), el caudal medio, la aportación media, los caudales específicos y los relativos. Los datos diarios de los caudales se utilizaron para el análisis de frecuencias y observar así cuantas veces fue sobrepasado el caudal medio.

Tabla 7. Representación de Variables y Unidades utilizadas para el análisis hidrológico.

Variable	Unidad
Aportación	hm ³
Caudal medio	m ³ /s
Caudal específico	l/s/km ²

Para el análisis evolutivo de los caudales y la aportación, se utilizaron datos medios mensuales y anuales. Los análisis de tendencias fueron realizados aplicando las mismas pruebas estadísticas que en el caso de los datos climatológicos. Se aplicaron las pruebas no paramétricas del estadístico Rho de Spearman, la prueba de Mann-Kendall, la versión secuencial de éste último y también se practicaron análisis de regresión.

4.2.3 Transformación del Paisaje y usos de suelo

Son varias las disciplinas en las que la fotografía aérea resulta de gran utilidad para analizar las transformaciones espaciales. En estudios del medio (natural o urbano), el uso de las fotografías aéreas surge como una herramienta para analizar la dinámica paisajística (Prabhakara Rao et al. 1982; Ishe, 1995; Strand et al. 2002; Büttler y Schlaepfer, 2004; Rocchini y Di Rita, 2005; Proisy, 2007; Niang, et al. 2008; Lipowezky, 2008; Skaloš y Engstová, 2010). Dada a su naturaleza y el nacimiento de esta tecnología relativamente reciente y que la mayor parte de los procesos del medio físico tienen unos periodos de desarrollo que exceden el lapso que existe entre el nacimiento de la fotografía aérea y la actualidad, el uso de las imágenes se limita a aquellos sucesos de ciclo corto, cuya evolución puede ser claramente apreciable en las fotos (Ishe, 1995). De esta manera, nos permiten seguir la evolución de los paisajes y usos de suelo de un área determinada y comprobar cuál ha sido la magnitud de los cambios ocurridos.

Para realizar esta tarea se utilizaron como instrumentos fotos aéreas (Fig. 23, 24, 25 y 26) tomadas por distintas agencias federales de los Estados Unidos y agencias estatales de Puerto Rico con una serie de años determinados (2007, 1994, 1971 y 1951). Sin importar el año, al momento de obtener las fotos las mismas ya estaban en formato digital y la mayoría de ellas geo-referenciadas, con excepción de 1951 (tabla 8).

Tabla 8. Información de las fotos aéreas utilizadas.

	Fecha	Formato	Escala	Color	Agencia
1951	Mar-1951	jpeg	1:15000	greyscale	USGS
1971	Dic-1971	tiff	1:20000	greyscale	
1994	--		--	greyscale	USGS
2007	Oct-2007	8 bit	1:2000	rgb	OGP y COE

USGS: United States Geological Survey
 OGP: Oficina de Gerencia y Presupuesto
 COE: Cuerpo de Ingenieros



Figura 23. Fotos aéreas de Arcibo 1951



Figura 24. Fotos aéreas de Arcibo 1971



Figura 25. Fotos aéreas de Arecibo 1994.



Figura 26. Fotos aéreas de Arecibo 2007

Además del descubrimiento de las fotos aéreas, los Sistemas de Información Geográfica (GIS por sus siglas en inglés), se han convertido en componentes esenciales de investigación para muchas disciplinas que trabajan con el paisaje y los análisis espaciales del terreno (Steiniger y Hay, 2009; Wade et al. 2009, Yeh y Huang, 2009). Hoy en día, son muchos y accesibles los programas que existen de Sistemas de Información Geográficas (algunos libres y otros a través de licencias) para el manejo e interpretación de fotos aéreas (Steiniger y Hay, 2009).

Utilizando el programa cartográfico de ESRI, ArcGIS 9.3 para el análisis del territorio, se calculó y se delimitó el área dentro de cada cuenca que ocupaba un determinado uso de suelo para cada año en específico. Se utilizaron cuatro categorías básicas, urbano, forestal, pastos y arbustos y agrícola.

La categoría forestal incluye superficie con distintos tipos de bosques, arbolada con vegetación densa y muy densa (secundario/joven). Los pastos y arbustos incluyen vegetación herbácea y gramínea. La superficie agrícola contiene frutos menores, heno, caña de azúcar, maíz, tubérculos (papas, ñame, batata, yuca, yautía, entre otros) y la superficie urbana está compuesta por carreteras, aéreas residenciales, comerciales e industriales. La metodología utilizada en el trabajo se ha basado en el análisis de fotografías aéreas y cartografía existente.

Con el programa cartográfico de ArcGIS 9.3, se pueden realizar dos tipos de clasificaciones, una supervisada (*supervised classification*) y otra conocida como sin-supervisar (*unsupervised classification*). Dada la naturaleza de estos estudios y su complejidad, ambas técnicas fueron utilizadas. Para la clasificación sin-supervisar, se utilizó la herramienta *ISO Cluster* que viene con el *Spatial Analyst Tool*. El *Spatial Analyst* provee capacidad para procesar datos en formato raster. Esta función rompe cada imagen en categorías o clases basado en la similitud de colores y donde la cantidad de categorías es asignada por el individuo (basado en los valores máximos y mínimos de la luminosidad que brindaban los píxeles de cada objeto en la foto). Esto otorga un resumen estadístico de cada clase que derivan de la imagen original. Estos datos indican cuantos píxel (Fig. 27) se encuentran en una misma imagen con valores similares.

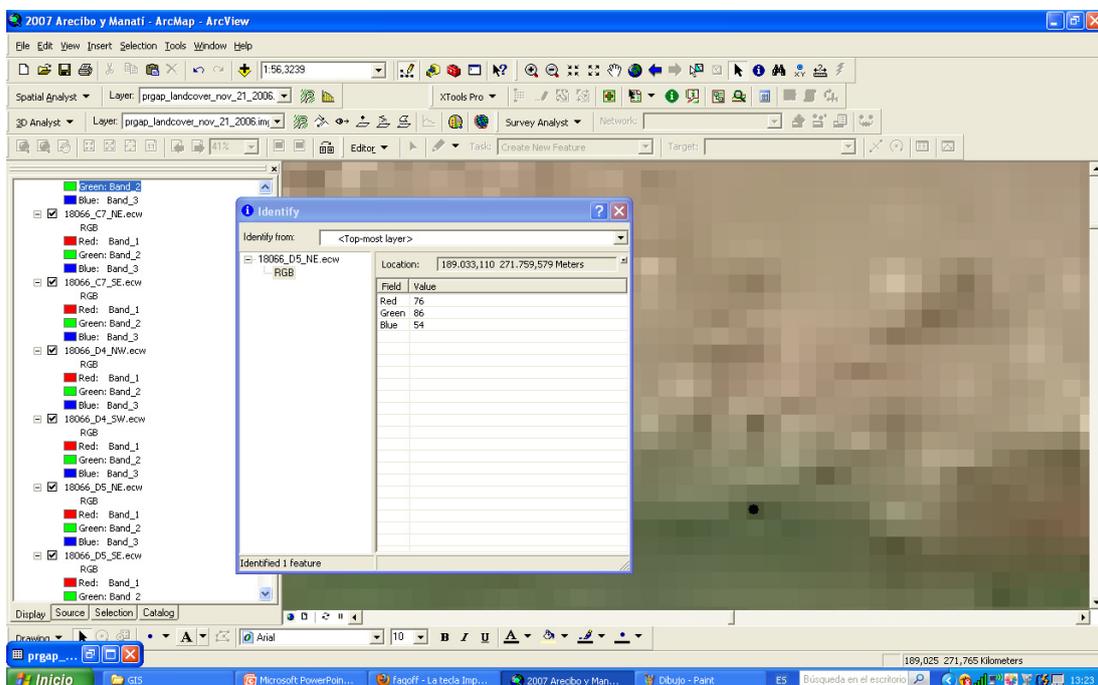


Figura 27. Valores de cada píxel en una imagen.

Utilizando la herramienta *Maximum Likelihood Classification* (Jia y Richards, 1994) se interpretan estos datos y se produce una nueva imagen (Fig. 28 y 29). No obstante, esta clasificación sin-supervisar deja varios asuntos pendientes. Tratándose de fotos aéreas, debemos tomar en consideración la hora del día en que fue tomada la foto, época del año y la meteorología debido a que todos estos factores crean sombra sobre la imagen entorpeciendo o enmascarando el valor real del píxel en cada objeto. De esta manera, realizamos una reclasificación manual para las categorías obtenidas con el *ISO Cluster*, de tal forma corregimos los valores que quedan enmascarados.

Una vez obtenido el *Maximum Likelihood Classification* y realizada la reclasificación de los valores, el siguiente paso fue convertir estos formatos raster (píxel) a formato vectorial (más específicamente polígonos) para poder delimitar área y perímetro. Esta tarea se realizó con el *Conversion Tools* de ArcGIS, la cual permite obtener la misma imagen en formato vectorial. Una vez convertida la interpretación de las fotos aéreas a formato de polígono, utilizando la extensión *Tools for Graphics and Shapes* específicamente la función de *Calcualte Geometry*, creada por Jeff Jenness en 2008, permitió conocer el área exacta que cubría cada uso de suelo. Este mismo proceso se realizó en todas las fotos de los cuatro años distintos.

Para corroborar estos resultados, se hizo uso de información histórica de la Junta de Planificación de Puerto Rico y el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, sobre mapas y datos de los usos de suelos en la isla e información cartográfica con los índices de vegetación para todo el territorio en el año 2006 proveniente de la agencia federal *US Forest Service*. A su vez, se utilizaron también varios censos agrícolas de EEUU con el objetivo de ratificar las tendencias establecidas con las fotos aéreas. Estos censos se realizan en la isla con un intervalo de 10 años y aunque son datos que llevan levantándose desde 1840 en EEUU, el primero realizado por los norteamericanos en Puerto Rico fue en el 1959. Los resultados obtenidos fueron comparados entre los distintos años de análisis con el fin de establecer tendencias en la transformación del paisaje y los usos de suelo de cada cuenca en específico.

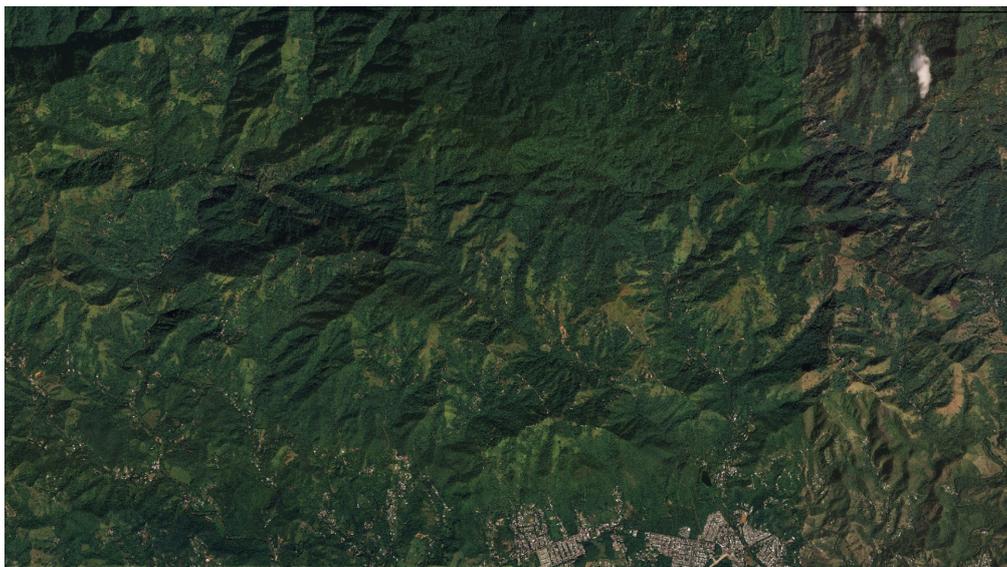


Figura 28. Aplicación de Clasificación No-Supervisada con el *ISO Cluster* y *Maximum Likelihood Classification*. Foto sin clasificar, Cuenca Río Grande de Arecibo. Fotografía Aérea 2007.

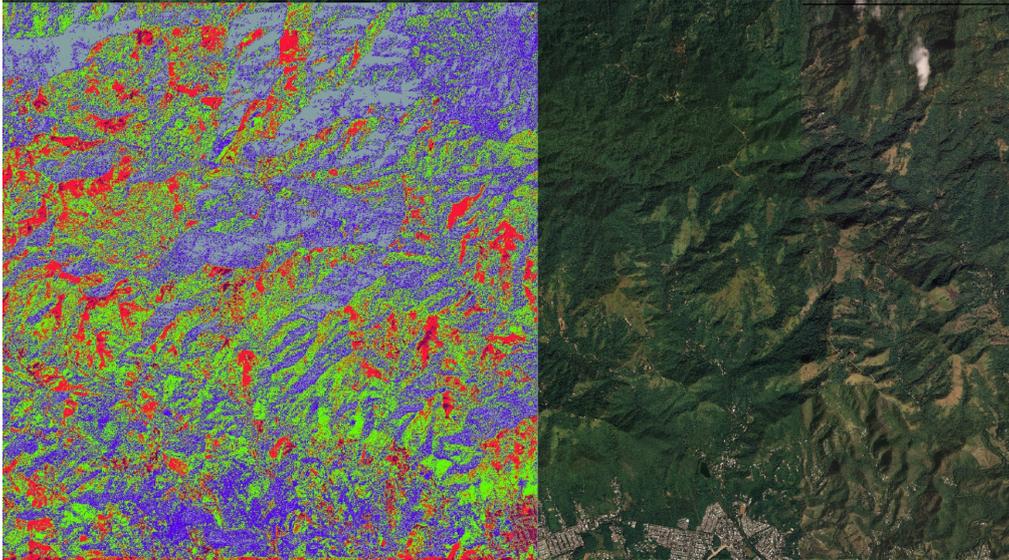


Figura 29. Aplicación de Clasificación No-Supervisada con el *ISO Cluster* y *Maximun Likelihood Classification*. Foto clasificada. Cuenca Río Grande de Arecibo. Fotografía Aérea 2007.

5. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO



Bosque Pluvial Tropical, El Yunque. PUERTO RICO

5. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área geográfica de este estudio comprende cuencas ubicadas en distintas regiones hidrográficas de la isla de Puerto Rico. Entre ellas, dos de las principales cuencas hidrográficas del país, ubicadas ambas en la región hidrográfica Cibuco-Guajataca, descrita anteriormente. El estudio se basa en la cuenca del Río Grande de Manatí, la cuenca del Río Grande de Arecibo (Región Cibuco-Guajataca), la cuenca del Río Fajardo en la Región Este y la Cuenca del Río Culebrinas en la Región Culebrinas-Guanajibo (Fig. 30). Dentro de cada cuenca se ha seleccionado un río, el Río Tanamá en la cuenca del Río Grande de Arecibo, el Río Grande de Manatí, el Río Fajardo y el Río Culebrinas, todos representativos del ámbito geográfico puertorriqueño.

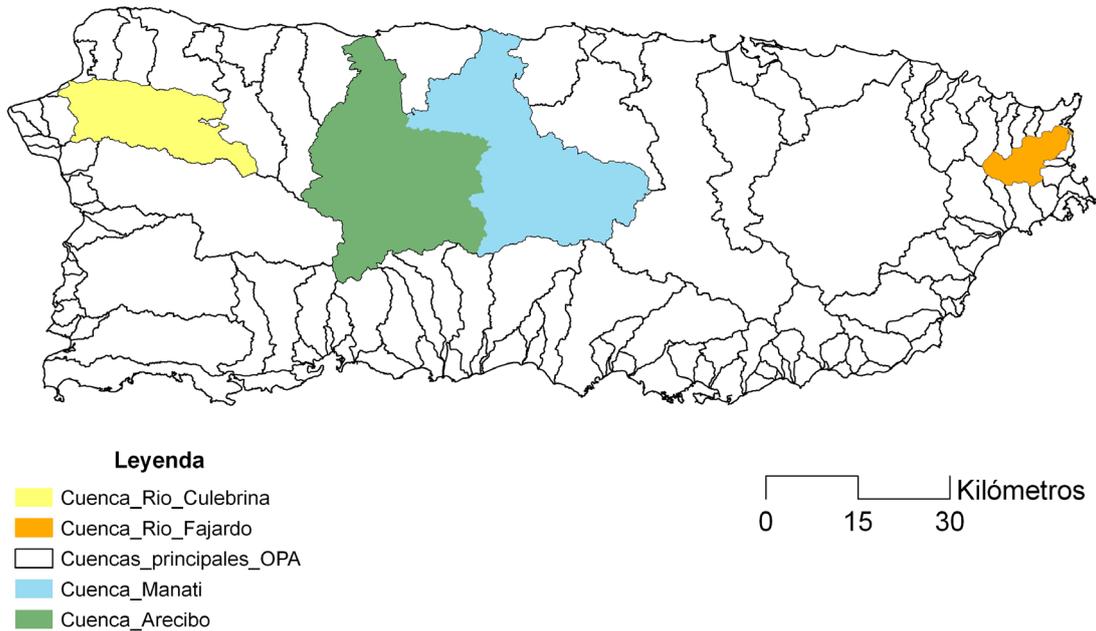


Figura 30. Ubicación del Área de Estudio. Fuente: Junta de Planificación de Puerto Rico 2004

5.1 Características de la Cuenca del Río Grande de Arecibo

5.1.1 Relieve y Topografía

Esta cuenca, es una de las más importantes y de mayor extensión para toda la isla de Puerto Rico. Por su ubicación, entre el Interior Montañoso (Cordillera Central) y los Valles Costeros del Norte (Región del Carso Norteño), cumple con las características descritas en el apartado 3.3.

Se encuentra ubicada en la Región Hidrográfica Cibuco-Guajataca (Fig. 31) al norte de la isla y tiene un área aproximadamente de 665 km² (DRNA, 2005b). Cuenta con varios montes y picos de mayor elevación en toda la Isla, entre ellos Cerro Punta. Éste alcanza una elevación de 1338 metros sobre el nivel del mar, el Monte Jayuya con 1310 metros, Cerro Rosa 1267 metros y Tres Picachos con 1204 metros. Además algunas pendientes llegan a exhibir inclinación de hasta 140 metros por cada kilómetro.

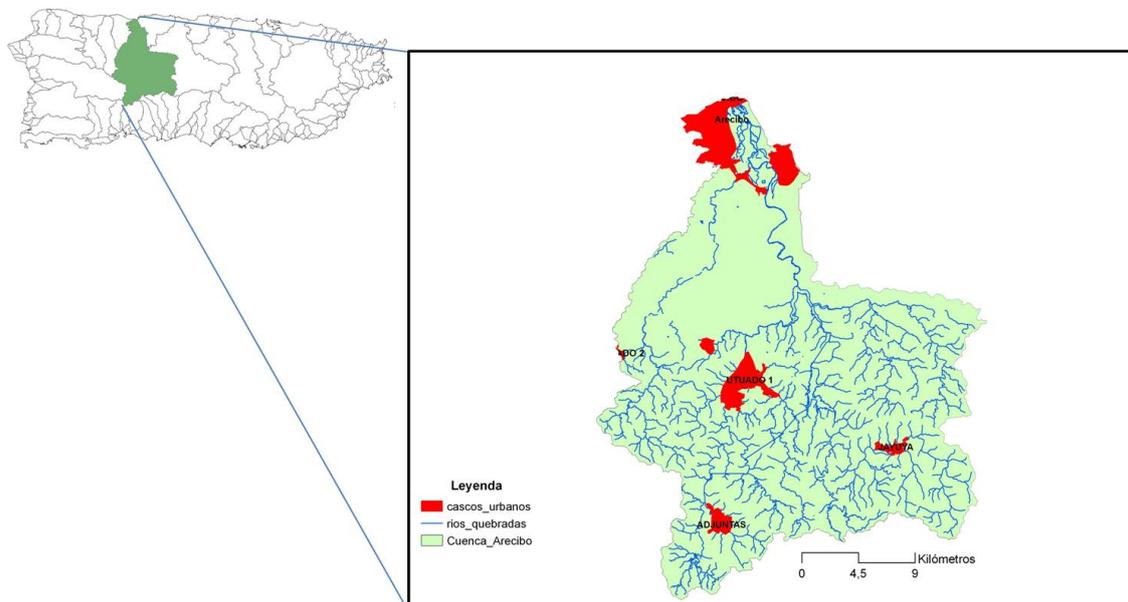


Figura 31. Límites de la Cuenca Hidrográfica del Río Grande de Arecibo.

5.1.2 Geología y Geomorfología

La estructura geológica superficial de la cuenca comprende rocas de origen volcánico, intrusivas y sedimentarias (USGS, 1978; 1996). La parte alta de la cuenca cercana a la Cordillera Central (Región Interior Montañoso) es de origen volcánico impermeable con pendientes inclinadas y cubiertas parcialmente de bosques (USGS, 1996). Cercano al municipio de Utuado se encuentran rocas intrusivas que forman el Batolito de Utuado. Éste cubre varios kilómetros cuadrados de residuos volcánicos intrusivos, especialmente granodiorita.

Aproximadamente, de los 665 km² que comprende el área total de la cuenca, 497 km² de la superficie ocurren en la zona de rocas volcánicas y sólo 212 km² de ellos son rocas calizas de la Región del Carso Norteño (Fig. 32). Al este de la Cuenca, los ríos Caonillas y el río Jayuya drenan un área formada por rocas volcánicas especialmente

impermeables, con residuos aluviales en los valles de los cauces (Mioceno-presente). Las grandes pendientes de los ríos establecen altas velocidades de flujo en los cauces y crean así altas tasa de erosión y transporte de sedimentos (DRNA, 2005b). Aguas abajo del embalse Dos Bocas, el río fluye a través de la Región del Carso erosionando las rocas calizas. Así se ha creado un cañón semiprofundo que se extiende desde la represa de Dos Bocas hasta la vecindad del Barrio Tanamá, donde comienza el valle (DRNA, 2005b). Muestra formaciones calizas del Terciario, entre ellas *Aymamon Limestone*, *Camuy Limestone* y *Aguada Limestone* (Briggs, 1968). Aymamon (Mioceno) se caracteriza por un grano fino a muy fino, color blanco a gris pálido con algunas manchas naranjas, amarillas y rosa. Camuy (Mioceno medio) es un grano mediano a fino, color naranja bien pálido, naranja grisáceo, gris amarillento y marrón claro. Mientras que Aguada (Mioceno) se define por un grano mediano a fino, muy fino localmente, color gris muy pálido y un naranja amarillento también pálido.

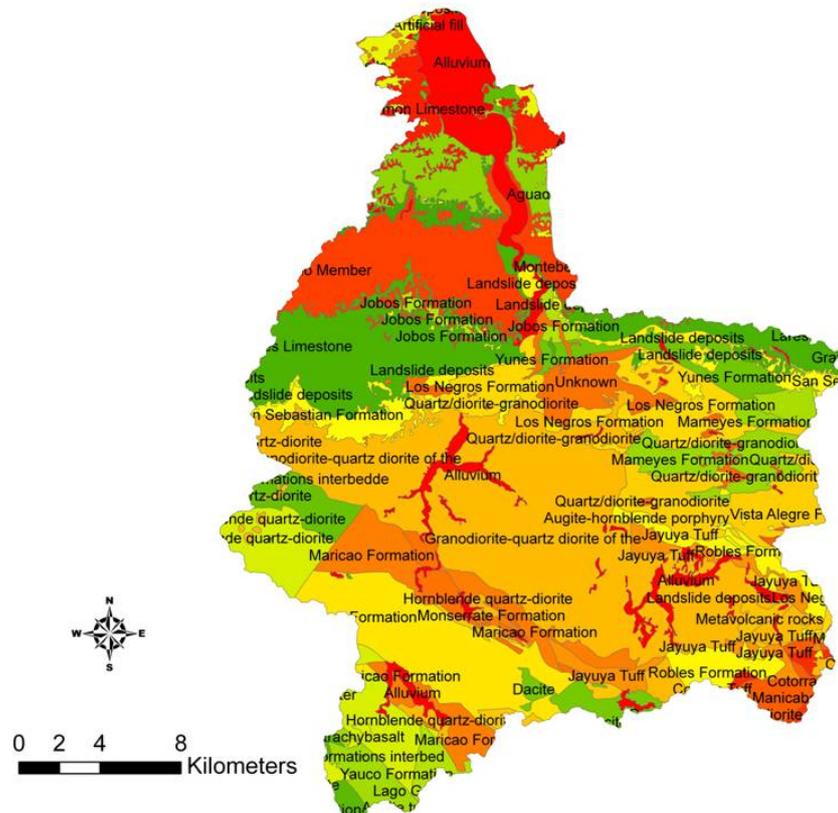


Figura 32. Geología de la Cuenca del Río Grande de Arecibo. Briggs, 1968

5.1.3 Clima

La cuenca tiene un clima subtropical muy húmedo. En la zona montañosa de la cuenca, los municipios de Adjuntas, Jayuya y Utuado, donde se elevan montañas que alcanzan los 1338 metros (Cerro Punta), la temperatura media es de 23°C. Sin embargo, en los valles costeros, cerca del municipio de Arecibo la temperatura media puede alcanzar los 29°C.

La precipitación es variada durante todo el año (Fig. 33). Como se puede observar, cuenta con un periodo de sequía desde enero hasta abril con precipitaciones intensas durante mayo y junio. A continuación se da otro periodo seco desde junio hasta agosto y un periodo de lluvias abundantes de septiembre hasta diciembre.

En esta cuenca 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 la cuenca de acuerdo al análisis de las estaciones utilizadas. La precipitación promedio anual es de 1879 mm. Sin embargo, en las estaciones de montaña la media anual alcanza los 2286 mm mientras que en la zona costera de la cuenca apenas llega a 1397 mm.

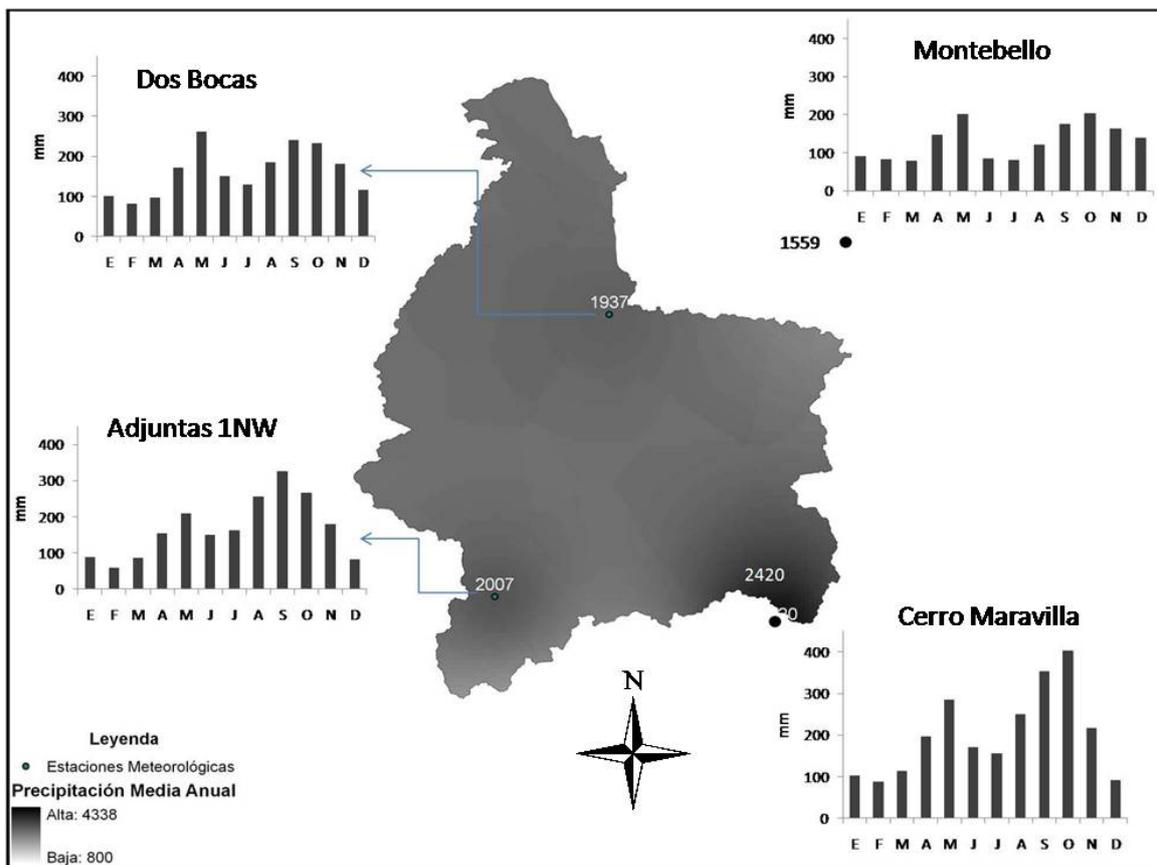


Figura 33. Distribución de la precipitación (mm) anual con algunas estaciones en la Cuenca del Río Grande de Arecibo.

Se utilizaron ocho estaciones en esta cuenca. De esta manera, si se aplica la representatividad de cada estación utilizando los Polígonos de Thyssen, la precipitación media anual alcanza los 2018 mm. Este aumento en la media anual se debe a que las tres estaciones que más precipitación registraron, Dos Bocas, Cerro Maravilla y Adjuntas 1NW, son las más significativas en la cuenca.

5.1.4 Hidrología

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. Contribuye con sus flujos al estuario de Arecibo y supe de agua para consumo doméstico a esta ciudad. Este tributario es 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).

El Río Tanamá cuenta con un caudal medio de 1.38 m³/s. Dentro de los límites de la cuenca del Río Grande de Arecibo existen siete embalses. De los siete, tres de ellos son los principales, el Dos Bocas, el Caonillas y el Garza (JP, 2006). Varios de estos embalses están interconectados vía túneles para la repartición del agua a distintas cuencas de la isla. Entre ellos suplen un total de 0.38 hm³ diario para la costa norte de Puerto Rico (DRNA, 2004a). 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)

5.1.5 Biogeografía

La cuenca tiene suelos muy profundos derivados de roca ígnea volcánica de grano fino con altas cantidades de arcilla, poca arena, limo y altas cantidades de hierro y aluminio pero poca sílice (USDA, 1982). Los suelos superficiales y el subsuelo son ácidos, sin embargo el suelo es muy poco permeable mientras el subsuelo sí lo es.

Las series de suelo predominantes en la zona más elevada de la cuenca incluyen las de Pellejas y Humatas; suelos arcillosos y arenosos, profundos, que exhiben variaciones en la pendiente, desde una inclinación moderada a una bien escarpada (USGS, 1996). Las series Soller, San Sebastián, son suelos que van de superficiales a profundos, porosos, y arcillosos donde afloran numerosos peñascos (USGS, 1978). También depósitos marinos mezclados dominan la zona central y costera de la cuenca (USGS, 1996).

El área de estudio cuenta con varios bosques de consideración. Los bosques y pastos representan un 52% (bosques estatales de Toro Negro, Guilarte y Tres Picachos). El Bosque de Toro Negro, está dividido en dos zonas de biogeográficas: subtropical muy húmeda (31%) y el bosque muy húmedo montaña abajo (69%). Su topografía es muy escarpada, cuenta con farallones y 9 ríos. En él se han reportado 160 especies arbóreas divididas en 53 familias donde las más grandes son: *melastomaceae* (16 especies), *lauraceae* (11 especies) y *myrtaceae* (10 especies). El Bosque de Guilarte cuenta con un pico que alcanza los 1203 metros de elevación. Está clasificado como bosque húmedo subtropical y en él conviven unas 172 especies de árboles divididas en dos zonas de

vida bioclimáticas. El Bosque Palma de Sierra (*Prestoea montana*) es una región bioclimática del Bosque de Guilarte. La otra región se caracteriza por una vegetación de poca altura, *Tabebuia schumanniana* y *Ocotea spatulata* y se encuentra en los picos altos y los valles expuestos. Su clima encuentra su homólogo con El Bosque de Toro Negro. Además en el municipio costero de Arecibo cuenta con manglares.

5.1.6 Usos de suelo y Población

Los usos de suelo predominantes en la cuenca son los bosques y los pastos. Éstos representan un 52% seguido de la agricultura con un 42% que se caracteriza por el cultivo de café y otros frutos menores (DRNA, 2005b). Los humedales son frecuentes también en áreas cercanas a la costa. Aunque los municipios que se encuentran en la cuenca han ido creciendo en población, la expansión urbana representa sólo un 4% del territorio en la cuenca (USGS, 1996). Éste crecimiento es más acentuado en los municipios costeros.

Con la llegada de las empresas y las fábricas farmacéuticas (1960) a la isla, en especial a los municipios de Arecibo y Manatí en la costa norte centro, se dio una migración desde el campo a las ciudades. Surge un flujo de población hacia los municipios costeros como se había mencionado anteriormente. El municipio que cuenta con más población es Arecibo (municipio costero) triplicando el número de habitantes en comparación con los otros municipios. La cuenca alberga una población que alcanza los 100 mil habitantes incluyendo las zonas urbanas de distintos municipios que se encuentran dentro de la misma (Fig. 34): Adjuntas, Jayuya, algunos sectores de Utuado y Arecibo (USGS, 1996). La población de la cuenca ha ido en aumento progresivamente. Además, la población total, contando las áreas limítrofes a la cuenca, alcanza 172 mil habitantes.

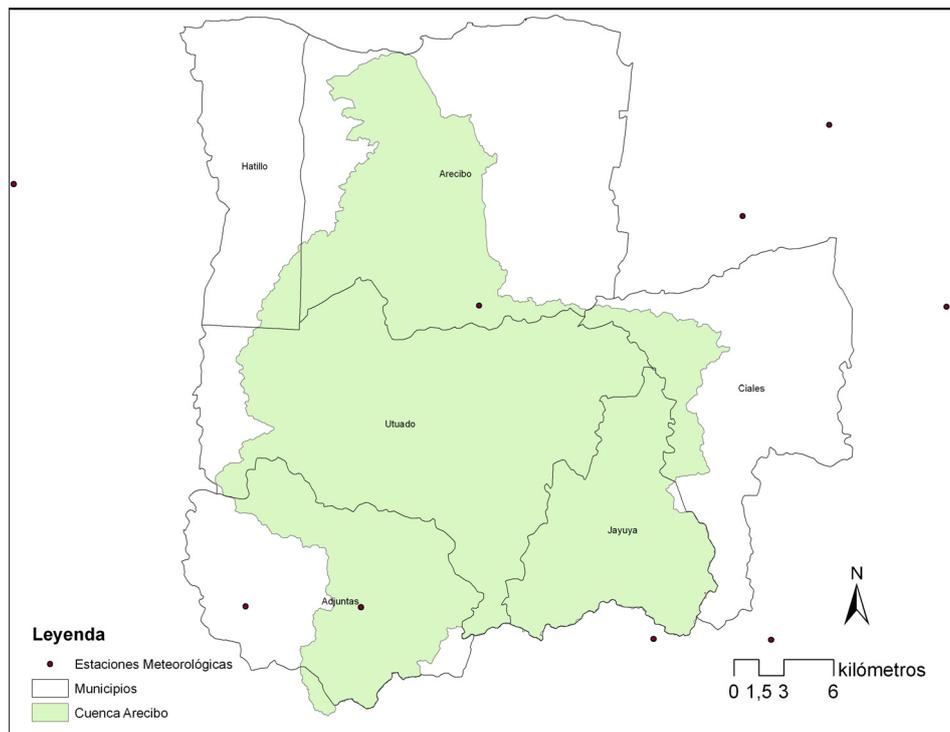


Figura 34. Cuenca Río Grande de Arecibo y municipios limítrofes.

5.2 Características de la Cuenca del Río Grande de Manatí.

5.2.1 Relieve y Topografía

Esta cuenca está ubicada en la Región Hidrográfica Cibuco-Guajataca al norte de la isla (Fig. 35). La Cuenca del Río Grande de Manatí es la cuarta cuenca más grande del país. Cuenta con un área de 608 km² (DRNA, 2005b). En esta cuenca el pico más alto se encuentra en la Cordillera Central a unos 1338 m de elevación sobre el nivel del mar. Al igual que la cuenca del Río Grande de Arecibo, por su ubicación geográfica, se ubica entre dos Regiones Geomorfológicas descritas en el apartado 3.2.5a; el Interior Montañoso (La Cordillera Central) y los Valles Costeros del Norte (la Región del Carso Norteño).

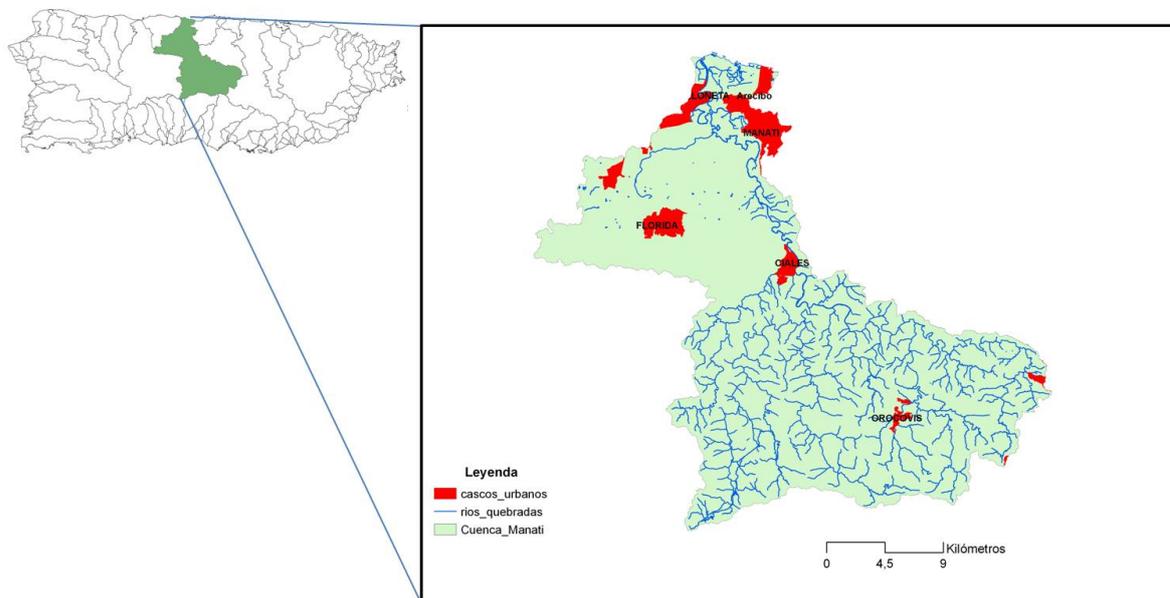


Figura 35. Límites de la Cuenca Hidrográfica del Río Grande de Manatí.

5.2.2 Geología y Geomorfología

Ambas cuencas comparten ciertas formaciones geológicas. Esta cuenca hace frontera con la del Río Grande de Arecibo, cercano a la Cordillera Central y en sus laderas se encuentran rocas de origen volcánico. Éstas suelen ser muy poco porosas, con capacidad de almacenaje de agua limitada. Tiene la característica de almacenar este recurso principalmente en sus fracturas. En los llanos costeros o la Provincia del Carso (Fig. 36) predominan rocas sedimentarias calizas, y depósitos aluviales y marinos que descansan sobre las rocas calizas de los valles (USGS, 1978). Entre ellas *Ayamón Limestone*, *Aguada Limestone* descritos en la cuenca anterior. *Montebello Member*, de la asociación *Cibao Formation*, es caracterizada por una vasta caliza blanca-amarilla pálida y arcilla calcárea (Tobisch and Turner, 1971).

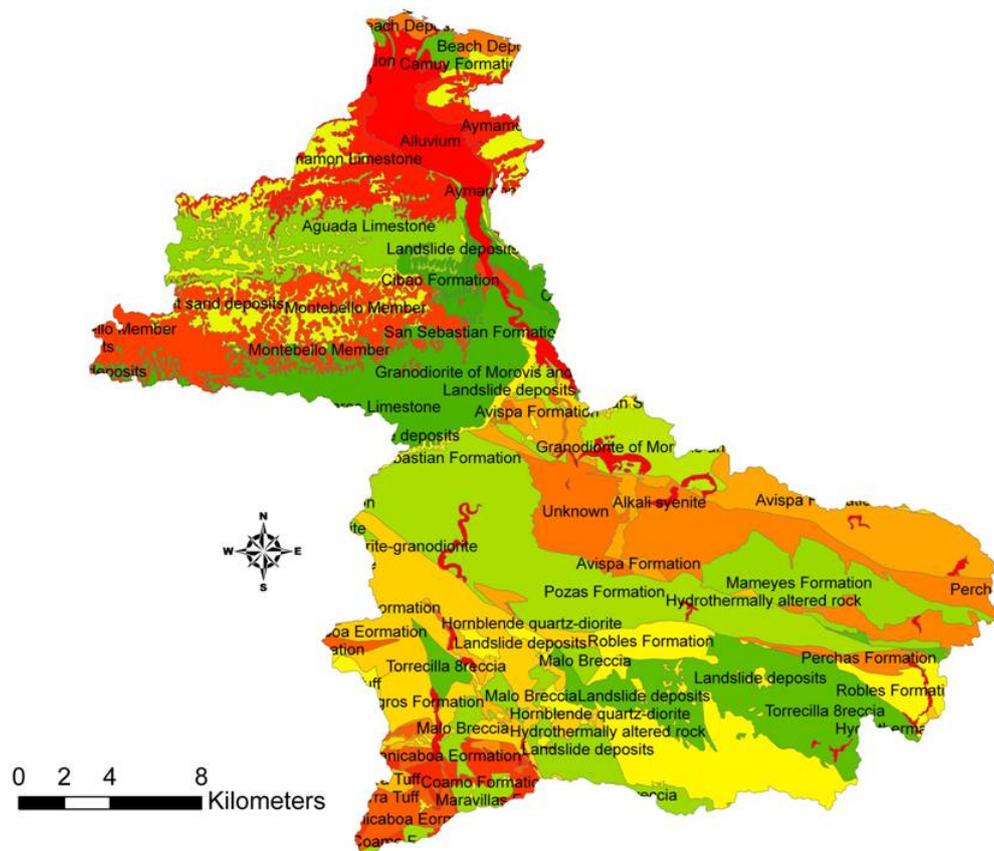


Figura 36. Geología Cuenca Río Grande de Manatí.

5.2.3 Clima

Su clima es muy parecido a muchas de las otras cuencas del norte de la isla. Cuenta con un clima principalmente subtropical húmedo, con una importante área de clima subtropical muy húmedo en el Bosque Estatal de Toro Negro, al igual que en la cuenca del Río Grande de Arecibo. La precipitación anual del bosque puede alcanzar los 2573 mm. La temperatura media anual en el Bosque Estatal es de 18.5°C, el promedio máximo mensual es de 19.8°C en julio y agosto y la media mínima es de 16.7°C en enero.

Ocurren precipitaciones con variaciones anuales de lluvias típicas de la región norte de la isla. Esto incluye el periodo de estiaje a comienzos del año y la época de lluvias abundante desde septiembre a diciembre. La temperatura media de la cuenca es de 25°C. Como muchos territorios del norte de la isla, cuenta con un periodo de sequía desde enero hasta abril con precipitaciones intensas durante mayo. A continuación se da otro periodo seco desde junio hasta agosto y un periodo de lluvias abundantes desde septiembre hasta diciembre.

Al igual que en la cuenca de Arecibo, existe una gran diferencia entre la lluvia que precipita en las zonas cercanas a la costa y la lluvia que precipita cerca de la Cordillera Central. Esto se debe a los procesos orográficos creados por los vientos y las pendientes de las montañas. La media (aritmética) anual de lluvia en toda la cuenca es de 1905 mm,

aunque en años de sequía apenas alcanza los 1346 mm. En estaciones ubicadas en los llanos costeros puede alcanzar 1397 mm de lluvia anual mientras que cerca de la Cordillera Central sobrepasan los 2540 mm (Fig. 37). La precipitación media calculada con los polígonos de Thiessen alcanza 1769 mm anuales.

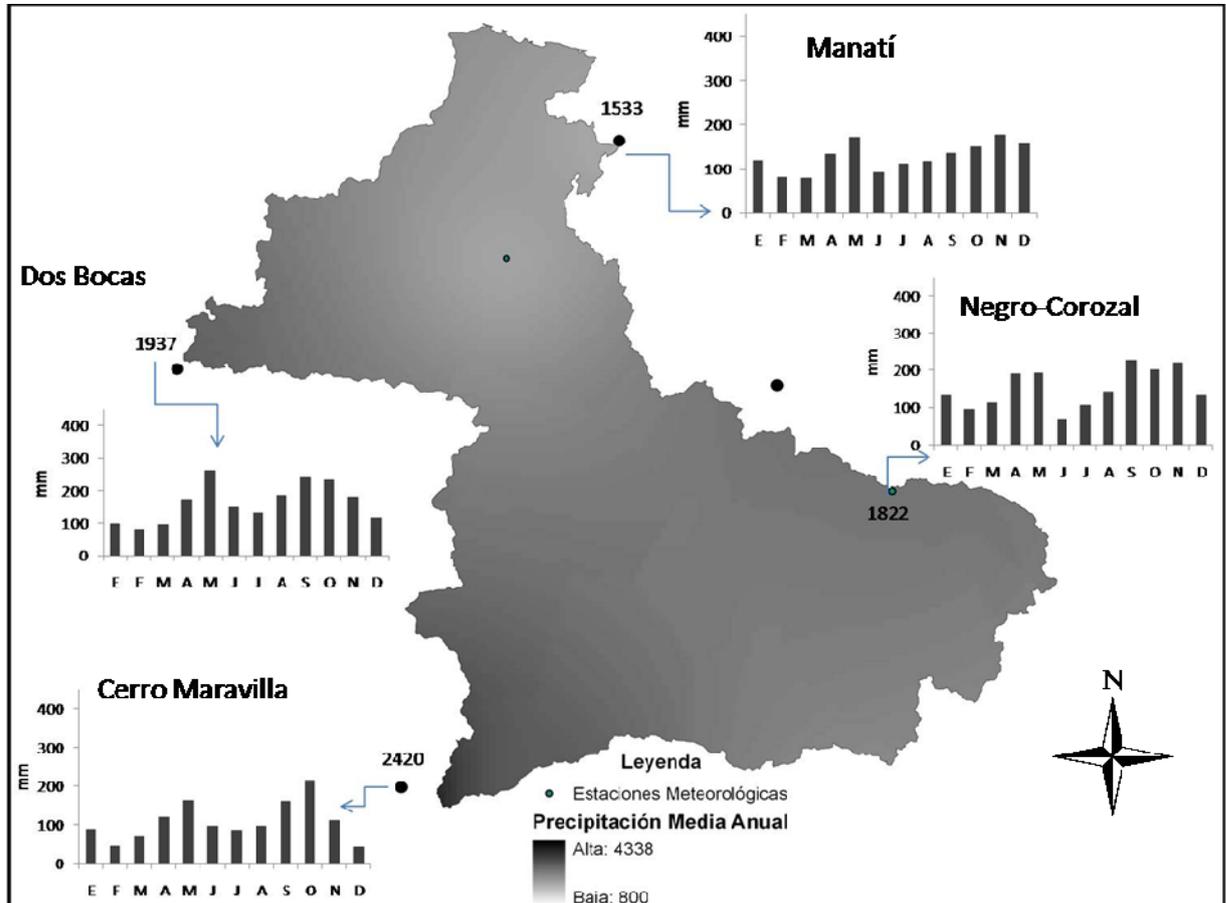


Figura 37. Distribución de la precipitación (mm) anual con algunas estaciones en la Cuenca del Río Grande de Manatí.

5.2.4 Hidrología

Los recursos de agua en esta cuenca son abundantes. Sin embargo, su explotación es mínima en comparación con otras cuencas de tamaño similar. Cuenta con un cauce principal, el Río Grande de Manatí y otros que incluyen los ríos, Bauta, Toro Negro, Botija, Cañabón, Orocovis, Sanamuerto, Matrullas, Cialitos y muchas quebradas y riachuelos. Todos estos ríos nacen por encima de los 780 metros sobre el nivel del mar, en la Cordillera Central y corren hacia el norte hasta la Región del Carso.

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). En el valle aluvial se manifiestan zonas del Acuífero Superior y el Acuífero Inferior o Artesiano (ambos descritos en el apartado 3.3). 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.

Al igual que la cuenca del Río Grande de Arecibo, cuenta con varios embalses de gran importancia. Desde 1931 cuenta con embalses y túneles (para abastecer la región sur) construidos para la generación de energía y abastecimiento a distintas zonas de la Isla, no sólo la región norte sino que también a la Región Hidrográfica de la Costa Sur.

5.2.5 Biogeografía

Según el USDA (1982), los suelos más comunes en el norte de la cuenca son la serie *Rock outcrop*, en el centro las serie Morado y Múcara (suelo formados en material residual meteorizado de rocas volcánicas, la capa superficial color pardo oscuro y de textura arcillosa) y en el sur la serie Maricao (arcillas lateríticas). El área de estudio también cuenta con zonas de bosques reserva natural así como el Bosque Estatal de Toro Negro compartido también con la cuenca del Río Grande de Arecibo.

El bosque de Toro Negro cuenta con dos zonas bioclimáticas. Una de ellas tiene un clima subtropical muy húmedo (31%) y el bosque muy húmedo montaña abajo (69%). Alberga unas 160 especies arbóreas en 53 familias donde las más grandes son: *melastomaceae* (16 especies), *lauraceae* (11 especies) y *myrtaceae* (10 especies). También cuenta con manglares en las zonas costeras de los municipios de Barceloneta y Manatí.

5.2.6 Usos de suelo y Población

Los usos del suelo son diversos pero principalmente abundan los pastos con 74% de ocupación. Las zonas agrícolas representan un 19% del uso del suelo. Las zonas urbanas suponen un 5% de terreno ocupado. Al igual que la cuenca del Río Grande de Arecibo, ésta cuenta con áreas industriales.

El mismo patrón de distribución poblacional que ocurrió en toda la isla se vio reflejado en ambas cuencas. Con la entrada de las fábricas norteamericanas, se abandonaron las tierras de cultivo. Sucedió un flujo migratorio del campo a la ciudad y en este caso de los municipios ubicados más cerca de la Cordillera Central a los municipios costeros, donde se ubican los mayores centros industriales, en especial hacia el municipio de Manatí. El municipio costero de Manatí es el que alberga un mayor número de habitantes. Florida fue declarada municipio en 1970 entre barrios anteriormente pertenecientes a Barceloneta y Arecibo.

La cuenca del Río Grande de Manatí cuenta con más población que la Cuenca del Río Grande de Arecibo y contiene 9 municipios en su territorio (Fig. 38). Albergaba una población aproximada de 127800 habitantes para el 2004. No obstante, con toda la población limítrofe de la cuenca, alcanzan 236000 habitantes.

El sector de manufactura se concentró en los municipios costeros de Barceloneta y Manatí generando cerca del 60% y el 37% del empleo respectivamente en el 2002 al igual que el sector servicio (JP, 2006). También se pudo observar en la tabla anterior que la gran mayoría de la población de los municipios costeros en esta cuenca, Manatí, Barceloneta y Florida, habita en zonas urbanas. Con excepción de Florida, los

municipios del interior como Orocovis, Morovis, Ciales, Barranquitas y Corozal son los que presentan más dependencia de la administración pública y con menos manufactura.

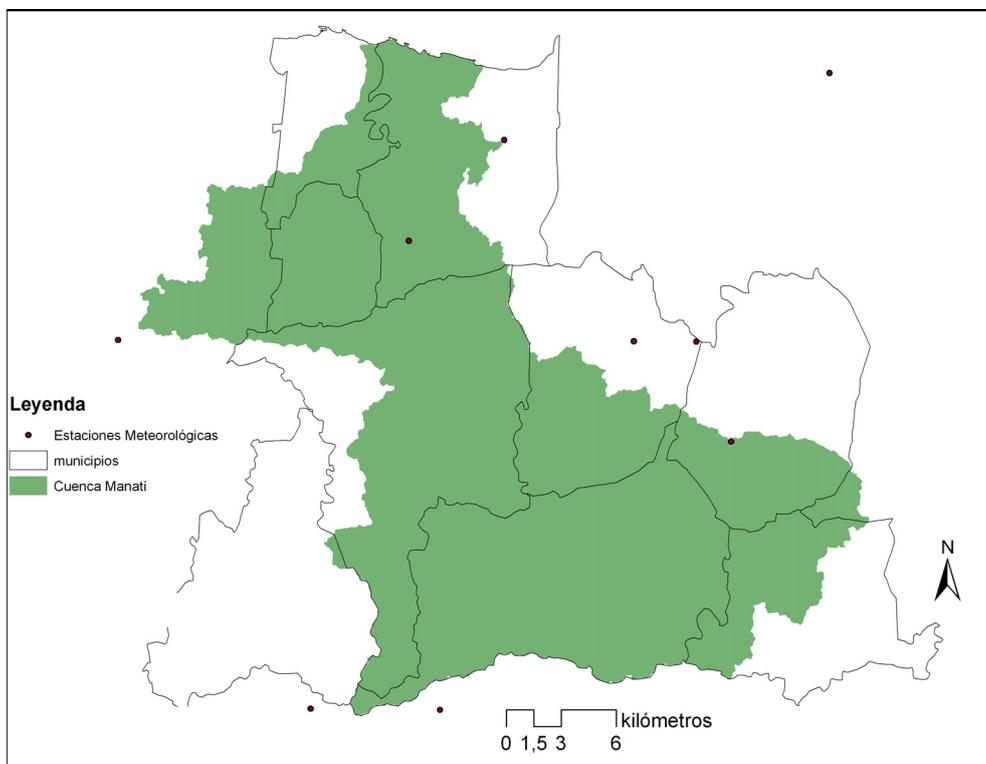


Figura 38. Cuenca Río Grande de Manatí y municipios limítrofes.

5.3 Características de la Cuenca del Río Fajardo

5.3.1 Relieve y Topografía

La cuenca del Río Fajardo se ubica en la región hidrográfica del este. Esta cuenca relativamente pequeña, tiene un área de 67.9 km² (DRNA, 2005b). Se ubica entre dos regiones geomorfológicas, el Interior Montañoso (en especial la Sierra de Luquillo) y los valles costeros del este descritos en el apartado 3 (Fig. 39). Su altura máxima alcanza los 1050 metros de elevación sobre el nivel del mar (en la parte más occidental de la cuenca), en la sierra.

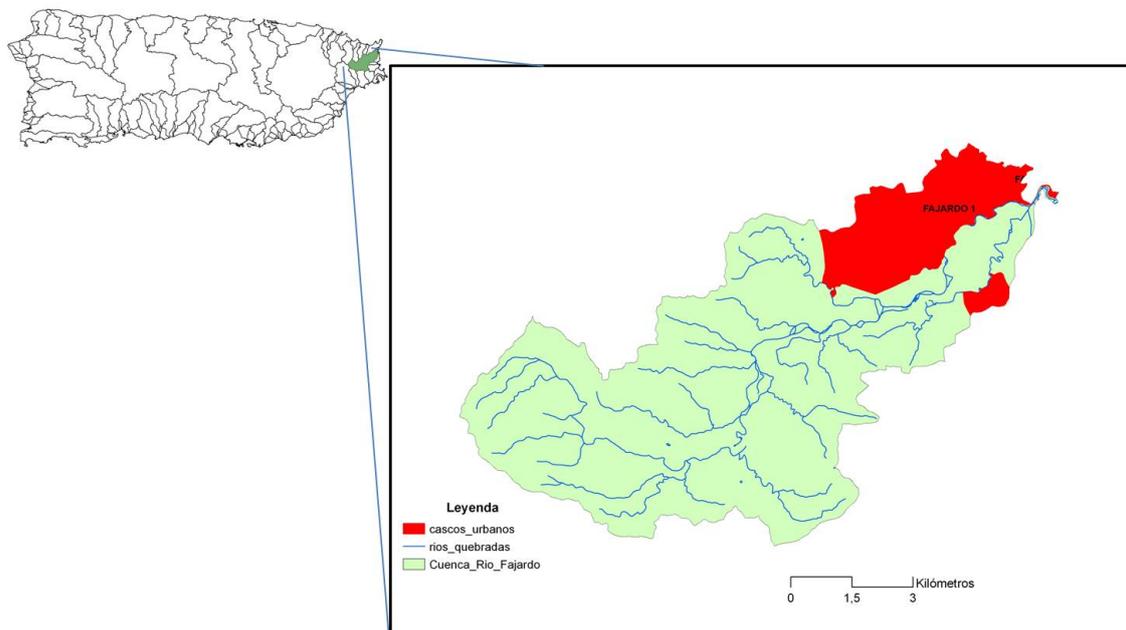


Figura 39. Límites de la Cuenca Hidrográfica del Río Fajardo.

5.3.2 Geología y Geomorfología

La estructura superficial de la cuenca comprende rocas de origen volcánico en su mayoría, de alta densidad y baja porosidad originarias de la Sierra de Luquillo (DRNA, 2005b). Estas formaciones geológicas volcánicas son intrusivas y extrusivas resultado del Cretáceo y el Terciario (USGS, 1996).

Hacia la parte baja de la cuenca se encuentran los llanos costeros aluviales (Fig. 40). Estos son depósitos no consolidados, en su mayoría de grava, arena y arcilla que bien se pueden encontrar a lo largo del valle del Río Fajardo (USGS, 1996). Más próximo a la costa, predominan depósitos de origen marino mezclados con aluvión descansando sobre las rocas volcánicas (DRNA, 2005b).

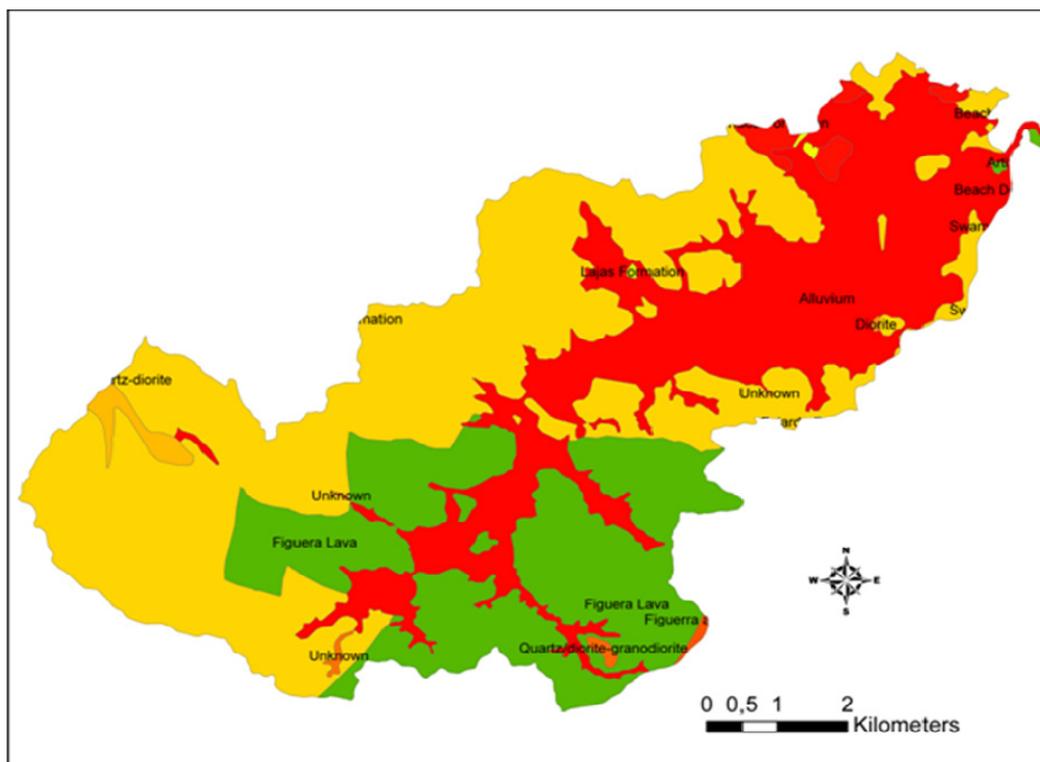


Figura 40. Geología Cuenca del Río Fajardo.

5.3.3 Clima

El clima de esta cuenca abarca seis zonas de vida natural existentes en Puerto Rico (DRNA, 2005b). La mayor parte de la cuenca muestra un clima sub-tropical húmedo y sub-tropical muy húmedo con una precipitación media de 2800 mm (Fig. 41).

La cuenca, muestra diferencias climáticas, originadas por la presencia de la Sierra de Luquillo (al oeste de dicha cuenca), donde se ubica la estación Pico del Este con 4340 mm de lluvia al año. Esta sierra recibe los vientos alisios cargados de humedad, que al remontar la pendiente, causan abundantísimas precipitaciones. Hacia el este, se ubica una zona con mucho menos precipitación (estación Fajardo con 1591 mm por año) y temperaturas promedio más elevadas, como se observó en la figura 41. Ambas estaciones muestran un comportamiento similar, siendo el mes de febrero el más seco en todo el año y el más húmedo es octubre en la estación de Fajardo y noviembre en la estación Pico del Este.

No en todas las cuencas hidrográficas de este trabajo se cuenta con dos estaciones que registren la temperatura debido a la baja calidad de los datos, sin embargo, en la cuenca del Río Fajardo sí. La temperatura media en esta cuenca varía desde la costa hacia la montaña (como en muchas otras cuencas de la isla), exponiendo en la estación Pico del Este 18.6°C y 26.6°C en la estación de Fajardo. También ocurre una marcada diferencia en la ETP, donde alcanza valores de 1211 mm en la estación de Fajardo mientras que en Pico del Este se obtuvieron valores de 787 mm.

Utilizando polígonos de Thiessen, se observa que la estación de mayor influencia en la cuenca es Paraíso con un 55% del total de la superficie. Calculando la precipitación media con este método, la cuenca muestra una lluvia media anual de 2556 mm.

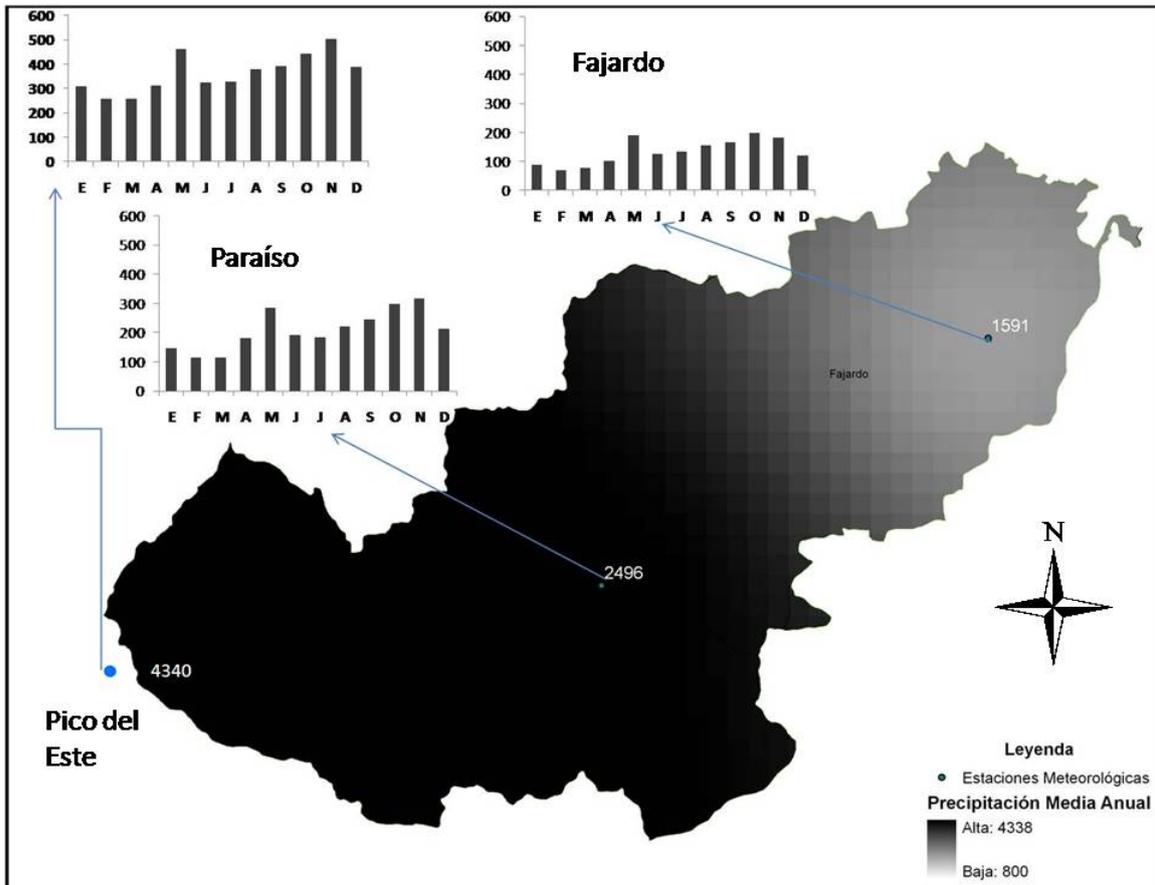


Figura 41. Distribución de la precipitación (mm) anual por estaciones en la Cuenca del Río Fajardo.

5.3.4 Hidrología

Son varios los cauces de agua en esta cuenca como se pudo observar en la figura 39. Su cauce principal, el Río Fajardo, nace a una altura de 800 metros sobre el nivel del mar y es alimentado por varias quebradas, entre ellas Sonadora, Juan Diego, Rincón, Aguas Buenas, Florencio y Redonda (DRNA, 2005b).

El río de Fajardo, cuenta con un caudal medio de 1.86 m³/s y una aportación anual de 58.5 hm³, siendo además, la principal fuente de abastecimiento de agua para la región. La infiltración es muy poco representativa en esta zona debido a las formaciones geológicas.

5.3.5 Biogeografía

Predominan en la cuenca las series de suelo Coloso-Toa-Bajura, Caguabo-Mucara-Narajinto y Los Guineo-Humatas-Lirios (USDA, 1977). Las series Coloso y Toa consisten de suelos profundos y caracterizados por un color marrón oscuro, de textura fina y orígenes mezclados (Coloso), y de textura fina y media fina proveniente de sedimentos aluviales y mixtos (Toa). Suelen encontrarse en las llanuras de inundación del río. Coloso destaca por ser de pobre drenaje, sin embargo la serie Toa suele drenar con mayor facilidad que el Coloso ya que consta de partículas más grandes. La serie

Bajura consta de sedimentos finos de origen mixto, color marrón grisáceo muy oscuro, de pobre drenaje.

Las series Caguabo-Mucara-Narajinto, son residuos de origen volcánico, de color marrón grisáceo oscuro, Caguabo y Mucara, y marrón muy oscuro Naranjito. Los tres se caracterizan por una permeabilidad moderada y buen drenaje. Las series Los Guineo-Humatas-Lirios, exponen todas unas texturas finas, Los Guineos y Humatas residuos de origen volcánico, mientras que la serie Lirios residuos de granito. Las tres series de color marrón oscuro, de buen drenaje y permeabilidad moderada.

En cuanto a vegetación, en la parte más occidental de la cuenca se encuentra la Reserva Forestal Federal El Yunque (Bosque Nacional) que cuenta con una elevación máxima de 1076 metros, con un área de 5012 hectáreas. Dicho bosque ha sido protegido desde finales del siglo XIX (1870), aún bajo el gobierno español. Cuenta con varias zonas de vida entre ellas, bosque húmedo subtropical, bosque pluvial subtropical, bosque húmedo montano bajo, bosque pluvial montano bajo (USDA, 2002). A medida que se desciende de El Yunque, los bosques disminuyen debido a construcciones urbanas (DRNA, 2005b).

5.3.6 Usos de Suelo y Población

La población de la cuenca se estimó para el 2004 en 21858 habitantes incluyendo los dos municipios (Fig. 42), Fajardo y Ceiba (DRNA, 2005b). En 30 años (1970-2000) la población de cada municipio ha crecido casi el doble. Los bosques y los pastos cubren por encima del 70%, seguido por las zonas agrícolas que alcanzan un 15% y las aéreas urbanas cercas del 10% (JP, 2006). Los llanos aluviales de la cuenca y, en especial, allí donde predominan las series mezcladas Coloso-Toa-Bajura, fueron cultivados durante muchos años para la producción de la caña de azúcar. Hoy en día estos terrenos se utilizan para el ganado, producción avícola, farináceos en el municipio de Ceiba y café en el municipio de Fajardo (JP, 2006).

En la cuenca del Río Fajardo predomina el sector económico de la administración pública (23.25%) seguido por la economía de servicios (22.74%). Aunque no se dispone de datos del porcientno que refleja el sector agrícola, se sabe que 16.5 km² de terreno son utilizados por dicho sector en el municipio de Fajardo para el 2007, mientras, en el municipio de Ceiba son cultivados 11.2 km² para el mismo año (USDA, 2007).

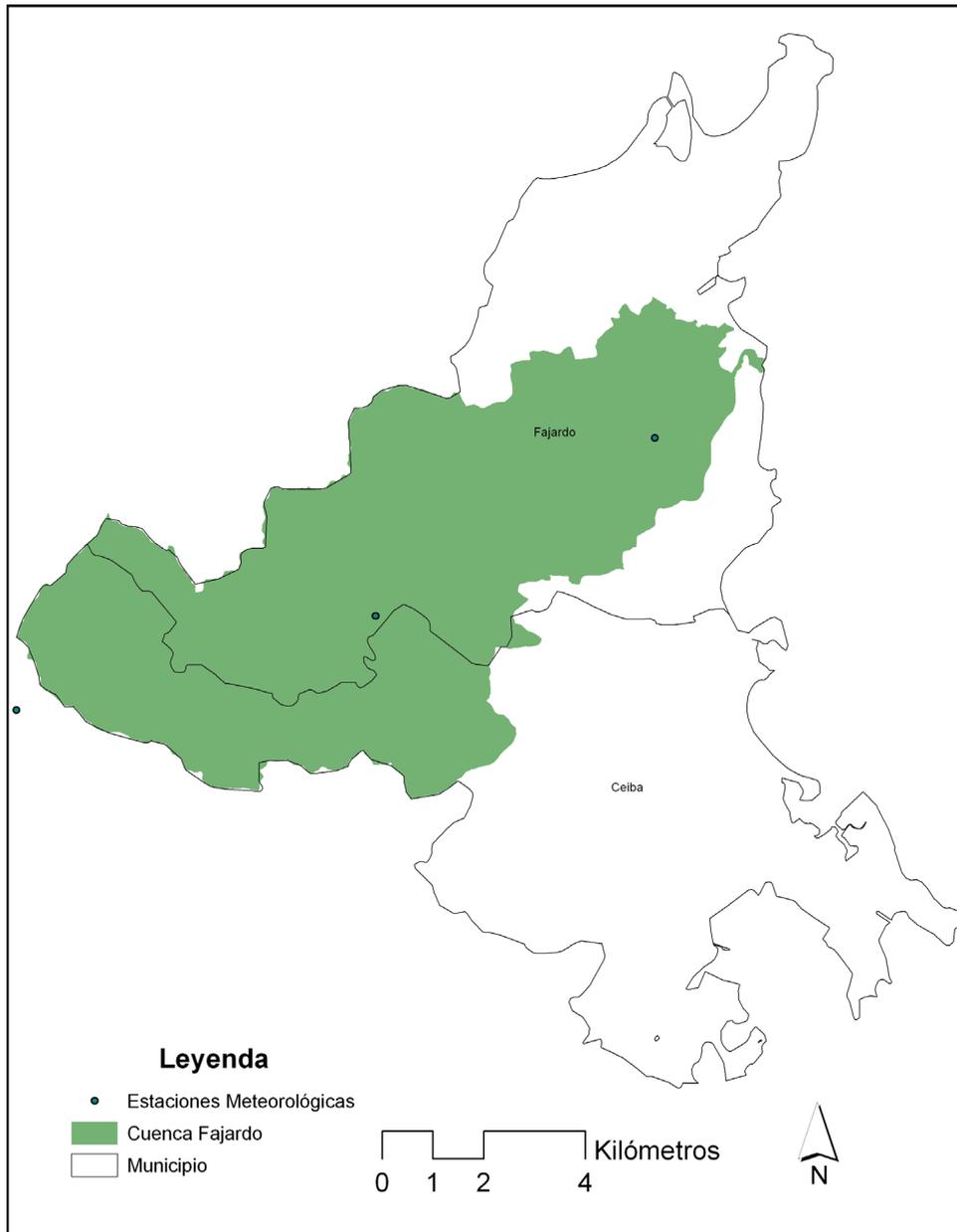


Figura 42. Cuenca Río Fajardo y municipios limítrofes.

5.4 Características de la Cuenca del Río Culebrinas

5.4.1 Relieve y Topografía

La cuenca del Río Culebrinas abarca un área de 266.7 km² (Fig. 43). Se ubica en la región geomorfológica del Interior Montañoso Central, de formación volcánica y la Zona Cárstica del norte, roca caliza. Cerca al municipio de Lares (el más oriental de la cuenca) la altura del relieve puede alcanzar los 480 metros sobre el nivel del mar. En dicha zona muestra colinas escarpadas formadas de roca caliza.

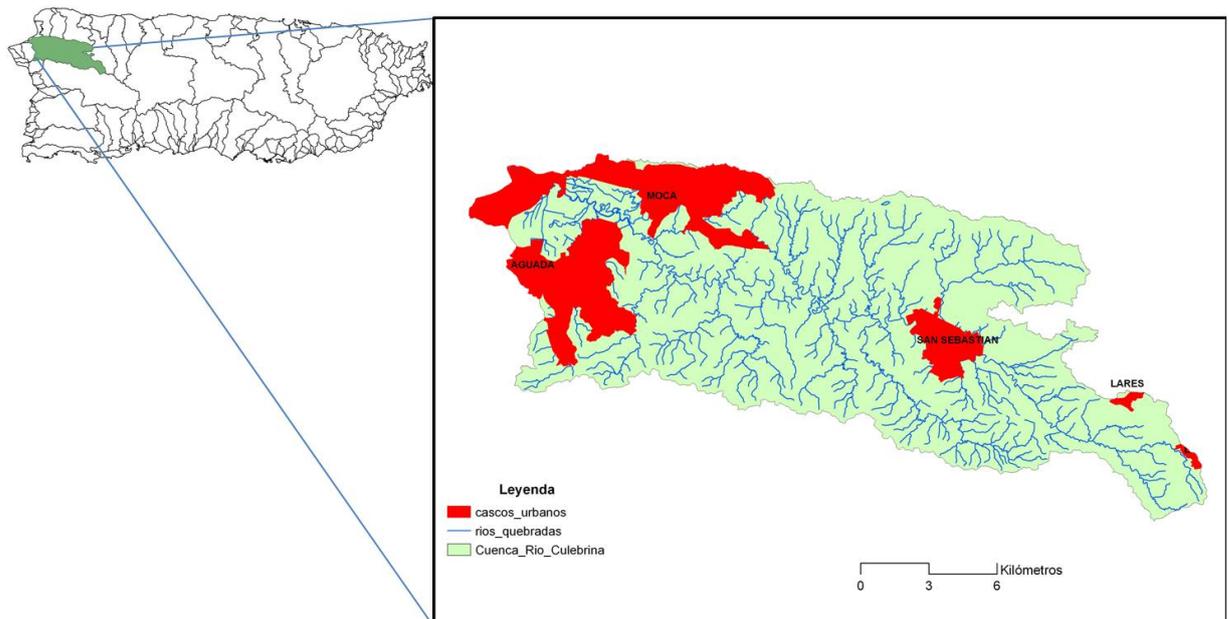


Figura 43. Límites de la Cuenca Hidrográfica del Río Culebrinas

5.4.2 Geología y Geomorfología

Incluye rocas de origen volcánico en su cercanía a la Cordillera Central (parte oriental de la cuenca) y al sur del cauce del río Culebrinas. Depósitos sedimentarios calizos y marinos se observan en el área más occidental de la misma. Las rocas calizas provenientes de la Formación San Sebastián y volcánicas predominan en la parte norte de la cuenca como se observa en la figura 44. La Formación San Sebastián, es caracterizada principalmente por conglomerados pobres a bien consolidados de areniscas, calcáreos y depósitos de arcillas (Tobisch and Turner, 1971). Por otro lado, la parte baja de la cuenca muestra residuos aluviales (*Alluvium*), gravas, arenas, arcillas y limo (Monroe, 1969). El área norte próxima al cauce muestra depósitos no consolidados, resultantes de desprendimientos de arcilla y bloques de roca caliza.

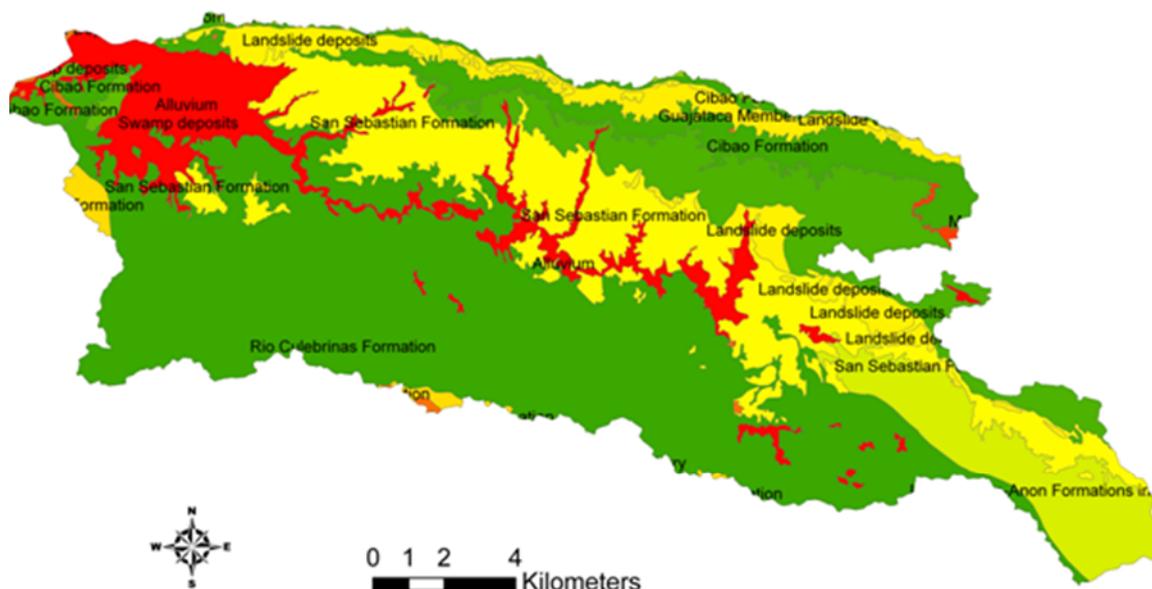


Figura 44. Geología Cuenca Río Culebrinas

5.4.3 Clima

La cuenca del río Culebrinas cuenta con un clima subtropical húmedo a muy húmedo. La precipitación media ronda los 1959 mm anuales y la temperatura media es de 25.2°C en la estación de Coloso. Aunque muestra un patrón de precipitación típico de la región del Caribe, debido a su escarpado relieve ocurren también lluvias orográficas y es el causante de las diferencias en comportamiento entre las estaciones.

Aún así, se puede caracterizar en la cuenca un periodo de estiaje en los meses de invierno (Fig. 45), aumentando progresivamente en los meses de marzo, abril y mayo (mes de mayo pico máximo en la estación de San Sebastián). Acto seguido, disminuye la precipitación en junio y julio, acrecentándose en agosto (pico máximo en la estación de Coloso). En relación a la temperatura, es típica de latitudes tropicales, sin grandes variaciones térmicas estacionales. La misma varía entre los 23°C en febrero y los 26°C en agosto. Con el método de los polígonos de Thiessen la precipitación media en Culebrinas es de 2180 mm anuales.

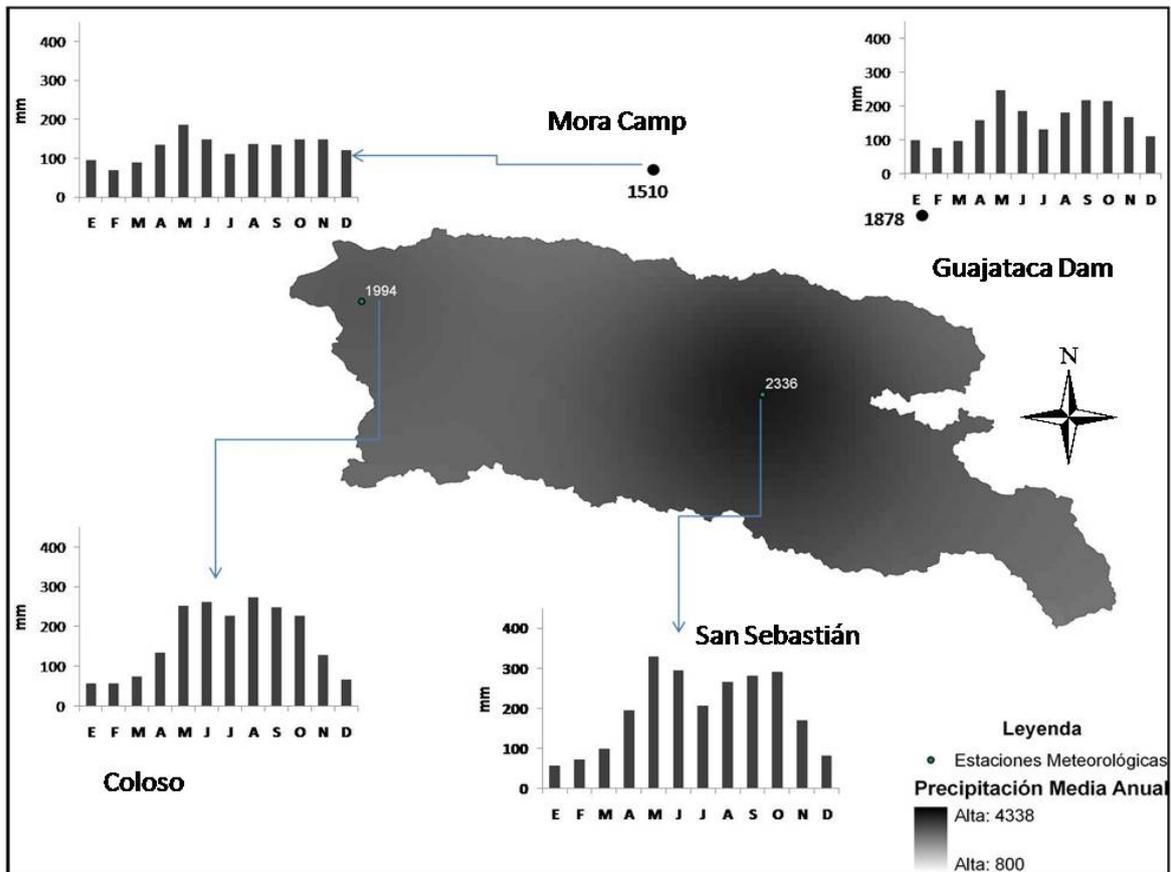


Figura 45. Distribución de la precipitación (mm) anual con algunas estaciones en la Cuenca del Río Culebrinas.

5.4.4 Hidrología

El nacimiento del río Culebrinas ocurre cercano a las zonas urbanas del municipio de Lares a 482 metros de altura (DRNA, 2004). Fluye dirección oeste atravesando las zonas urbanas del municipio de San Sebastián desembocando cercano al municipio de Aguada. Cuenta con cuatro afluentes principales que forman parte de la red hidrográfica de dicha cuenca (ríos Juncal, Guatemala, Sonador y Cañas) y sobre ocho quebradas que también alimentan el cauce principal (DRNA, 2004). El río discurre paralelo al contacto entre las rocas calizas y las de origen volcánico (USGS, 1996; DRNA, 2004). Tiene un caudal medio de 8.47 m³/s y una aportación media anual de 267 hm³. Dentro de la cuenca no existe ningún embalse ni derivación y el agua subterránea no es un recurso significativo en la cuenca debido a la geología de la zona (USGS, 1996).

5.4.5 Biogeografía y Suelos

Contiene tres series de suelos distintas, Colinas, Voladora y Consumo (DRNA, 2005b). Colinas consiste de suelos calcáreos, de buen drenaje y permeabilidad moderada. La capa superficial de color pardo oscuro, de textura arcillosa franca, con algunos fragmentos de roca caliza (USDA, 1975). La serie Consumo son suelos de buen drenaje caracterizados por ser ácidos, de permeabilidad moderada y son residuos meteorizados de rocas volcánicas tufáceas, generalmente de color pardo rojizo y de textura arcillosa.

Mientras, la serie Voladora consiste de suelos moderadamente profundos, de buen desagüe, extremadamente ácidos y permeabilidad moderada. Son materiales residuales meteorizados de un conglomerado que consiste en guijarros, grava y arena. De color pardo rojizo oscuro, de textura arcillosa y extremadamente ácidos también.

En cuanto a la vegetación, cercano a la parte noreste de la cuenca, se encuentra el Bosque Estatal de Guajataca (bosque húmedo subtropical) ubicado en el municipio de Isabela aunque se extiende hasta San Sebastián. En dicho bosque, se identificó 156 especies de árboles entre ellos, la maga (*Thespesia grandiflora*), ceboruquillo (*Thouinia striata*), cedro (*Hyronima clusioides*), úcar (*Bucida buceras*) y almácigo (*Bursera simaruba*). En la costa del municipio de Aguada se encuentran bosques de manglares.

5.4.5 Usos de Suelo y Población

El área de la cuenca contaba con 98723 habitantes en 2004 (DRNA, 2005b). Aunque en el mapa se presentan cinco municipios que colindan con la cuenca, la realidad es que el municipio de Aguadilla (al norte) su porción de terreno apenas es significativa, siendo el municipio de mayor población entre los cinco (Fig. 46). Con excepción de Lares, por encima de un 85% de la población vive en áreas urbanas. De igual forma se ha observado una tendencia paulatina al crecimiento demográfico en todos los municipios de la cuenca.

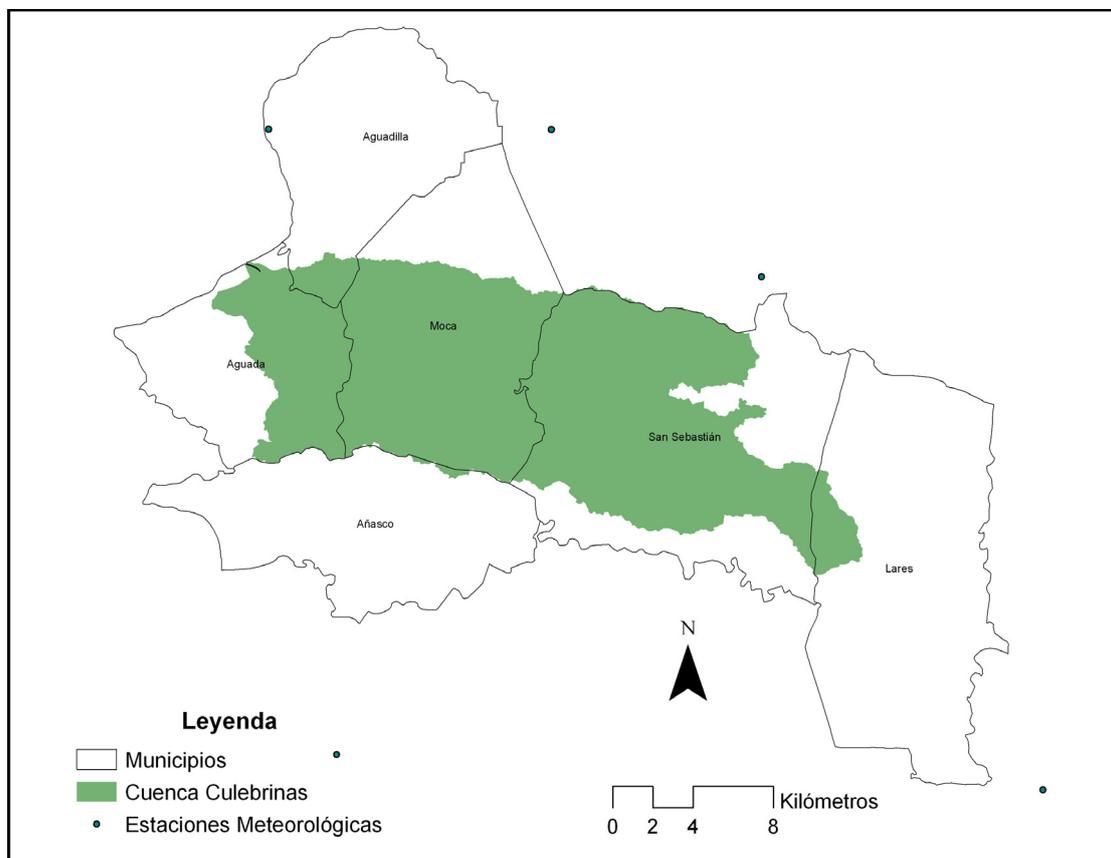


Figura 46. Cuenca Río Culebrinas y municipios limítrofes.

6. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS EN PUERTO RICO



Bosque Pluvial Tropical, El Yunque. PUERTO RICO

6. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE PUERTO RICO

6. 1 Precipitación de Puerto Rico

La isla de Puerto Rico cuenta con una precipitación media anual que varía espacialmente desde los 4000 mm hasta los 800 mm (Fig. 47), mostrando una media para todo el territorio de 1752 mm de lluvia y una variabilidad que fluctúa entre 15 y 40% anual. La lluvia aumenta desde las costas hacia el interior, siendo mayor la precipitación en las zonas más elevadas, al norte y en la Sierra de Luquillo (al este de la isla).

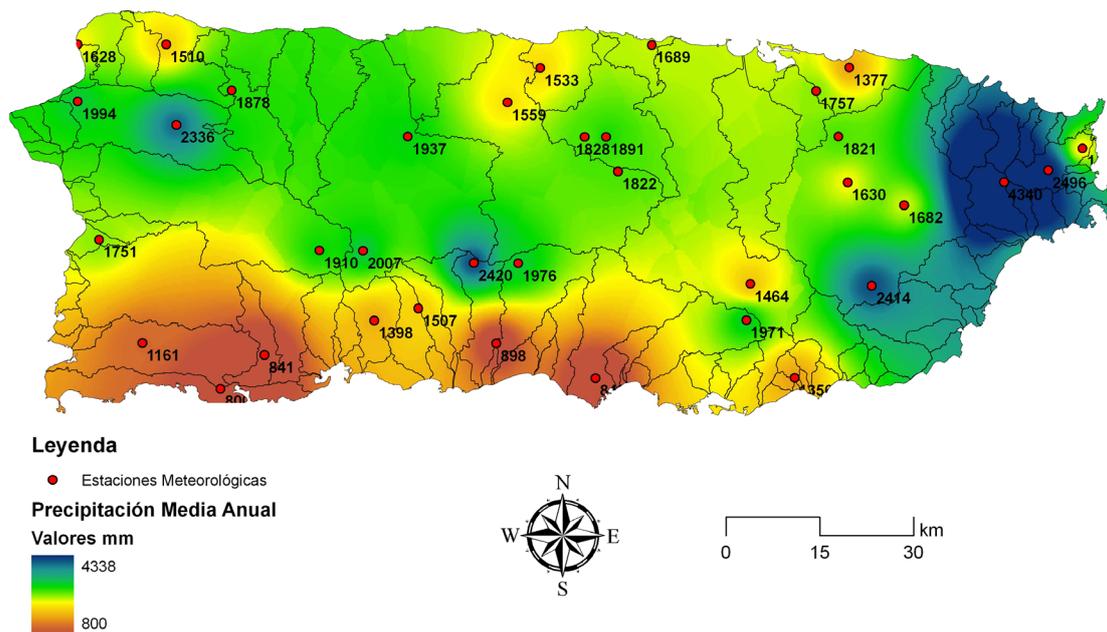


Figura 47. Distribución Espacial de la precipitación media anual.

Sin importar la ubicación de las estaciones, todas muestran un comportamiento pluviométrico anual similar (Fig. 48). El periodo seco es perfectamente identificable con un comienzo en la disminución de lluvia en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, aunque por lo general tendiendo a un ligero aumento en marzo. Un 69% (25) de las estaciones muestran el mes de febrero como el más seco en todo el año, un 22% (8 estaciones) muestran el mes de marzo y solo 3 estaciones (8%) muestran el mes de enero.

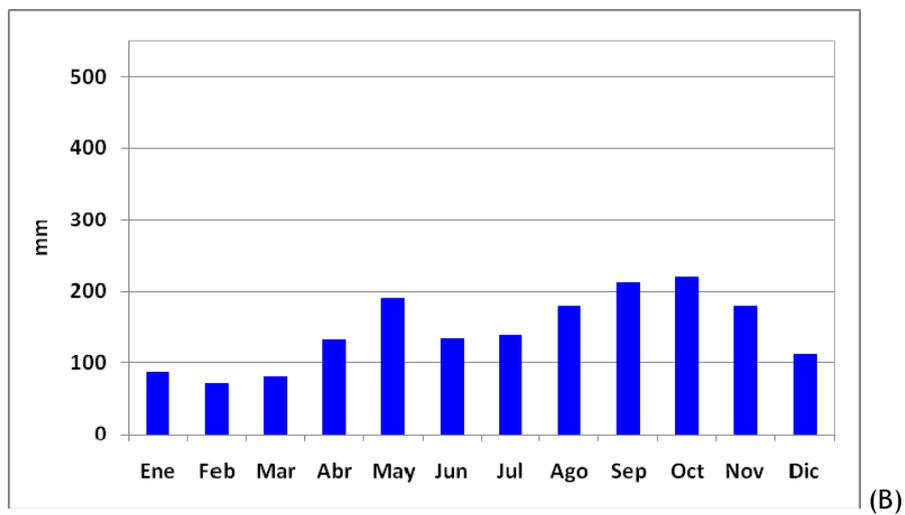
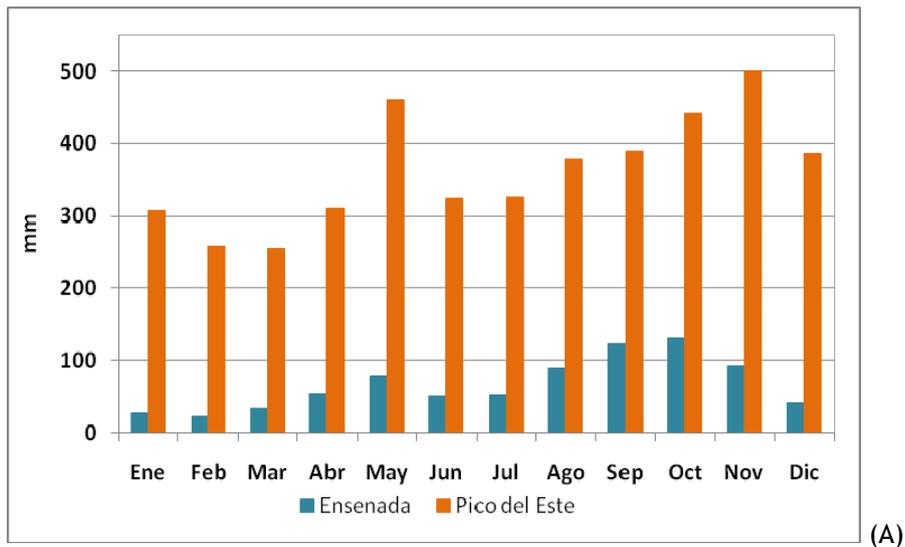


Figura 48. Precipitación media mensual en las estaciones Pico del Este y Ensenada (A) y media de Puerto Rico (B).

Después de mayo, en todas las estaciones ocurre una marcada disminución de la precipitación en los meses de junio y julio, y un moderado ascenso en los meses de agosto a noviembre, alcanzando el pico máximo en los meses de octubre o noviembre (tabla 9). En 13 estaciones se observa el mes de octubre como el más lluvioso, seguido por septiembre con 8 estaciones, noviembre y mayo con 7, y agosto con 1 estación. Curiosamente las 7 estaciones que muestran el mes de mayo como el mes más lluvioso, se encuentran en una misma región hidrográfica, Cibuco-Guajataca.

Tabla 9. Precipitación media mensual y anual (mm) para todas las estaciones.

ESTACIONES	Ene.	Feb.	Mar	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Adjuntas INW	88.1	57.3	84.6	153.0	208.1	147.9	161.6	255.8	324.8	265.6	178.8	81.2	2006.8
Adjuntas Substation	67.0	64.5	93.7	167.9	215.6	124.5	156.1	201.8	310.7	284.0	153.6	70.7	1909.9
Aceituna	64.1	60.0	71.5	175.1	210.2	138.4	122.3	206.1	298.9	346.4	189.6	73.5	1956.1
Cayey	81.2	65.4	61.5	88.5	139.6	112.1	134.6	175.9	190.8	175.3	148.0	91.2	1464.0
Coloso	56.5	56.2	73.0	133.9	250.2	260.2	226.8	272.2	246.4	225.1	127.3	66.4	1994.1
Corral Viejo	52.8	47.1	69.9	113.7	156.5	85.8	103.5	159.9	231.0	258.1	167.4	61.3	1507.3
Cerro Maravilla	102.6	86.7	113.3	196.6	284.0	170.3	155.0	250.0	353.0	402.0	215.4	91.4	2420.3
Corozal	122.8	97.4	109.6	173.3	213.7	86.0	125.6	168.2	208.5	209.5	201.9	160.0	1891.4
Dorado	129.5	91.6	66.5	123.2	163.7	116.7	173.2	174.2	140.7	148.6	191.6	170.5	1689.9
Dos Bocas	99.1	79.7	95.6	171.4	261.0	148.7	129.4	184.3	239.6	231.8	180.9	115.9	1937.3
Ensenada	28.4	22.7	34.0	54.9	78.8	50.5	51.9	89.6	122.7	131.7	92.8	41.6	799.5
Fajardo	85.9	68.4	75.9	99.5	188.5	125.6	131.3	154.8	165.4	195.6	181.4	119.0	1591.4
Guajataca Dam	98.6	76.8	97.1	157.2	247.0	184.9	129.8	179.4	216.1	215.2	167.3	108.8	1878.1
Guayama	50.1	44.7	42.6	55.4	123.8	127.3	133.5	159.5	192.3	215.3	141.5	70.1	1356.2
Gurabo	89.3	62.3	73.0	100.6	154.4	129.9	137.2	197.0	197.7	181.5	179.6	127.7	1630.3
Isabela Substation	91.3	76.5	86.8	137.2	187.5	172.1	122.9	152.3	157.0	172.8	157.4	114.1	1627.9
Jajome Alto	118.4	89.9	93.2	117.8	181.3	169.8	177.1	208.6	212.1	249.7	212.8	140.4	1971.3
Juncos	72.3	64.4	61.9	102.4	175.2	149.9	157.8	193.6	204.3	205.6	179.6	115.5	1682.2
Lajas Substation	56.0	44.8	51.1	85.6	107.3	66.4	86.6	141.6	167.0	157.8	129.7	66.7	1160.5
Manatí	117.7	80.5	77.2	132.1	170.4	90.3	111.1	116.1	134.2	148.2	177.2	157.5	1512.5
Mayaguez City	39.1	48.9	70.5	123.4	180.5	172.4	224.4	233.8	258.2	215.8	127.6	54.4	1750.9
Montebello	89.3	81.9	78.2	145.6	200.6	85.0	80.0	80.2	119.4	174.4	202.4	163.1	1558.9
Mora Camp	93.4	69.3	89.0	134.0	184.2	147.8	109.8	135.1	132.8	147.8	147.3	119.8	1510.3
Morovis	112.0	79.7	98.3	173.5	223.2	86.6	115.5	152.7	203.7	207.1	205.2	145.9	1803.4
Negro Corozal	131.5	94.6	113.0	189.7	193.3	70.0	105.4	143.4	226.9	201.7	219.8	132.7	1821.9
Paraíso	145.4	113.0	114.4	179.4	284.7	189.2	181.6	219.4	243.2	296.2	316.7	212.6	2495.9
Peñuelas	54.8	50.9	64.8	106.9	134.2	70.0	75.7	133.6	228.6	244.4	168.6	65.5	1398.4
Pico del Este	307.5	257.6	255.8	310.5	460.9	324.4	326.1	377.8	389.8	442.8	500.6	386.3	4340.0
Ponce	23.8	24.6	37.2	57.1	98.1	63.8	63.5	106.9	135.9	155.6	96.0	35.2	897.7
Río Piedras	107.5	79.8	79.3	134.9	174.1	128.1	154.6	185.5	185.8	182.4	196.5	147.9	1756.5
San Juan WSFO	82.3	56.2	55.1	106.0	145.0	109.4	122.3	139.5	142.2	143.3	153.2	122.2	1376.8
San Lorenzo	123.6	101.7	110.8	130.6	250.0	226.0	244.7	247.4	279.7	277.6	251.7	170.2	2414.0
San Sebastián	56.7	71.2	98.8	194.6	328.2	293.8	205.8	266.1	280.1	290.4	168.5	81.3	2335.6
Santa Isabel	21.5	20.9	23.6	45.1	81.3	68.4	61.2	99.2	133.7	166.5	89.0	38.9	849.1
Santa Rita	26.9	28.7	30.8	67.1	89.3	56.7	48.2	91.7	137.6	125.6	109.9	34.0	841.4
Trujillo Alto	107.6	80.8	81.2	158.7	173.1	125.6	142.5	197.3	190.9	208.0	198.2	157.0	1821.0

Las estaciones que mayor cantidad de lluvia anual registraron se encuentran en el interior de la isla así como, Pico del Este (4340 mm), Paraíso (2495 mm), Cerro Maravilla (2420 mm) y San Lorenzo (2414 mm). Además, estas mismas estaciones mostraron una precipitación máxima anual que supera los 3500 mm de lluvia, aunque no en el mismo año, 5457 mm (1987), 3955 mm (1979), 3723 mm (1970) y 3510 mm (1979) respectivamente (tabla 10). Con excepción de San Lorenzo, las otras tres estaciones se encuentran por encima de los 1000 metros de altitud en las áreas montañosas de la isla, cerca de La Cordillera Central y la Sierra de Luquillo. La estación de Pico del Este, además de ser la que mayor precipitación anual recibe, también muestra un coeficiente de variación por debajo del 14%, siendo el valor más bajo obtenido de todas las estaciones en este análisis.

Tabla 10. Precipitación (mm) Media, Máxima, Mínima y coeficiente de variación (CV) anual (%) para cada estación.

ESTACIONES	Media (mm)	Máxima (año)	Mínima (año)	Coefficiente Variación (%)
Adjuntas INW	2006.8	3020.1 (2000)	1106.4 (1994)	19.8
Adjuntas Substation	1909.9	2873.8 (1998)	1127.0 (1994)	19.0
Aceituna	1976.4	3071.9 (1960)	1149.5 (1994)	23.9
Cayey	1464.0	2675.1 (1970)	784.1 (1994)	27.0
Coloso	1994.1	2772.2 (1959)	1398.8 (1997)	14.1
Corral Viejo	1507.3	2550.7 (2003)	701.5 (1991)	26.8
Cerro Maravilla	2420.3	3723.1 (1970)	1653.9 (1994)	20.4
Corozal	1891.4	2722.1 (1981)	1049.0 (1994)	22.0
Dorado	1689.9	2899.7 (1956)	1065.9 (1992)	20.5
Dos Bocas	1937.3	3053.6 (1981)	1100.8 (1994)	17.1
Ensenada	799.5	1513.1 (2003)	362.7 (1967)	38.4
Fajardo	1591.4	2469.7 (1970)	824.2 (1967)	25.0
Guajataba Dam	1878.1	2590.3 (1965)	1214.6 (1976)	16.2
Guayama	1356.2	2004.6 (2003)	657.9 (1967)	23.2
Gurabo	1630.3	3007.4 (1970)	841.0 (1967)	24.3
Isabela Substation	1627.9	2251.1 (2005)	1066.8 (1964)	16.4
Jajome Alto	1971.3	3292.3 (1966)	1217.2 (1976)	26.3
Juncos	1682.2	2644.9 (1970)	1113.6 (1955)	21.8
Lajas Substation	1160.5	1689.1 (2003)	639.3 (1973)	22.6
Manatí	1532.9	2302.0 (1965)	860.6 (1994)	25.1
Mayaguez City	1750.9	2437.9 (1981)	426.0 (1999)	23.0
Montebello	1558.9	2600.2 (1981)	936.3 (1994)	27.9
Mora Camp	1510.3	2039.1 (1981)	956.1 (1956)	19.3
Morovis	1828.2	2697.7 (2005)	1112.5 (1994)	23.6
Negro Corozal	1821.9	2940.8 (2005)	1053.5 (1994)	27.5
Paraíso	2495.9	3954.5 (1979)	1539.7 (1967)	22.7
Peñuelas	1398.4	2171.7 (2003)	795.5 (1973)	26.8
Pico del Este	4340.0	5457.4 (1987)	3480.2 (1994)	14.0
Ponce	897.7	1607.6 (1970)	409.2 (1967)	34.3
Río Piedras	1756.5	3016.5 (1979)	1087.6 (1967)	19.9
San Juan WSFO	1376.8	1962.9 (2005)	902.4 (1991)	21.7
San Lorenzo	2414.0	3509.5 (1979)	1817.6 (2002)	18.7
San Sebastián	2335.6	3263.9 (1960)	1464.3 (1958)	15.6
Santa Isabel	849.1	1593.6 (1960)	397.8 (1980)	39.1
Santa Rita	841.4	1362.7 (1979)	365.3 (1997)	31.3
Trujillo Alto	1821.0	3091.7 (1970)	1205.5 (1994)	23.3

Los años de 1994 (en 13 estaciones) y 1967 (en 7 estaciones) son los que más se repiten como los años más secos, como se observa el registro de la precipitación mínima anual en la tabla 10. Mientras, que para la precipitación máxima anual destacan los años 1970 (7 estaciones), 1981 y 2003 (5 estaciones cada año), 1960 y 2005 (3 estaciones cada año).

Los valores mínimos de precipitación media anual se observaron en estaciones costeras al suroeste del territorio (Región Hidrográfica del Sur), entre ellas, Ensenada (800 mm), Santa Rita (841 mm) y Santa Isabel (849 mm). Todas ellas muy cercanas al Bosque Seco de Guánica. La precipitación anual mínima registrada en cada una de estas estaciones no alcanza valores de 400 mm. En Ensenada la precipitación anual mínima que se registró fue de 367 mm (1967), en Santa Rita 365 mm (1997) y en Santa Isabel 398 mm (1980). De esta forma, se establece claramente un gran contraste con las estaciones del noreste (Pico del Este 3480 mm en 1994) donde la precipitación mínima anual suele registrar valores de 3000 mm por encima de lo que se registra en el suroeste. Cabe destacar que fue común observar en el sur de la isla una variabilidad anual por encima del 30%, obteniendo así los valores más altos en toda la isla. De este mismo

modo, las estaciones que menos variabilidad anual han registrado ($< 17\%$) se encuentran ubicadas en la esquina noroeste de la isla, con excepción de Pico del Este (Fig. 49).

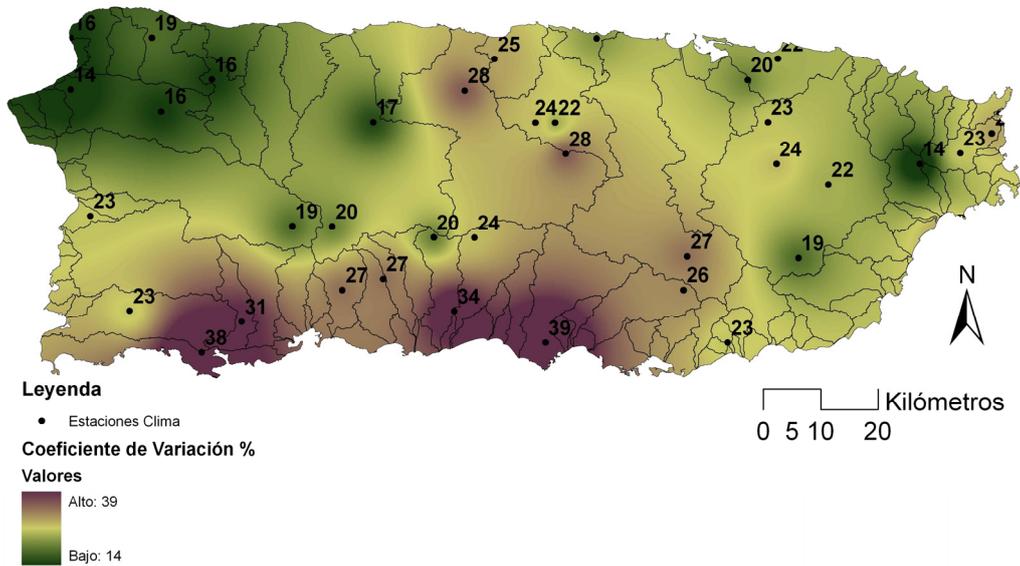


Figura 49. Coeficiente de variación (%) para toda la isla.

6.1.1 Precipitación: Cuenca Río Grande de Arecibo

La Cuenca del Río Grande de Arecibo (Fig. 50), para el periodo analizado, cuenta con una precipitación media de 1964 mm al año y una variabilidad de tipo medio (17%). Las estaciones más cercanas a la costa registran menos precipitación que las de montañas en el sur de la cuenca (tabla 11). La variabilidad más alta de la cuenca se encuentra en la estación de Montebello, con 28% y la más baja se presenta en la estación de Dos Bocas con 17%.

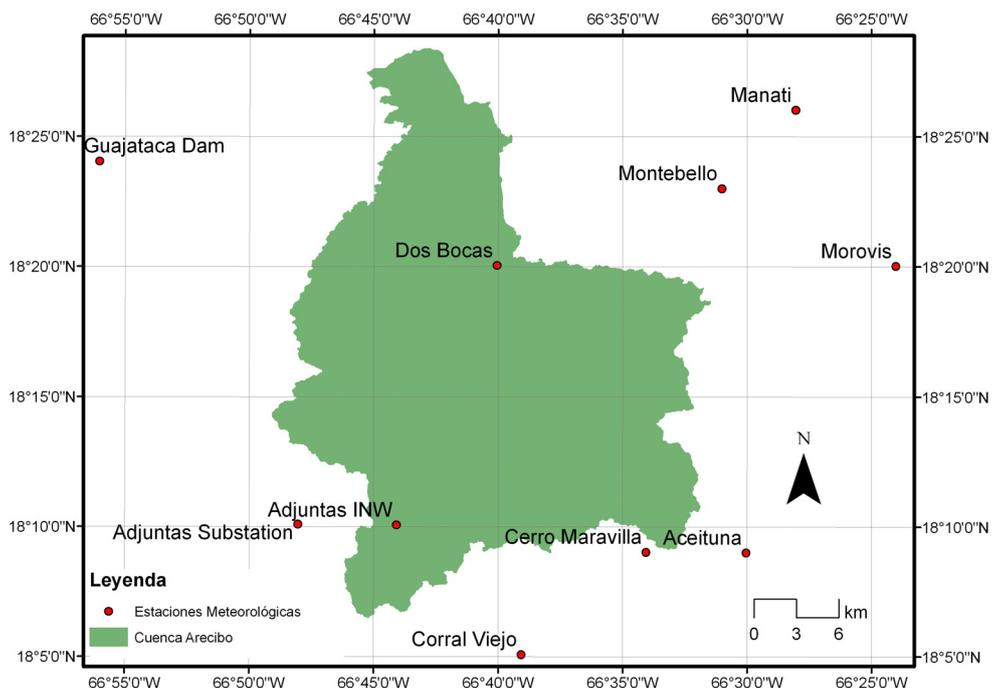


Figura 50. Ubicación de estaciones climáticas en la cuenca del Río Grande de Arecibo.

Tabla 11. Precipitación (mm) Media mensual por estación, media anual y coeficiente de variación anual (CV, %). Cuenca Río Grande de Arecibo

	Dos Bocas	Adjuntas Substation	Adjuntas 1NW	Montebello	Cerro Maravilla	Peñuelas	Corral Viejo	Aceituna
CV anual (%)	17.1	19.0	19.8	27.9	20.4	26.8	26.8	25.0
Año	1937.3	1909.9	2006.8	1558.9	2420.3	1398.4	1507.0	1956.1
Enero	99.1	67.0	88.1	89.3	102.6	54.8	52.8	64.1
Febrero	79.7	64.5	57.3	81.9	86.7	50.9	47.1	60.0
Marzo	95.6	93.7	84.6	78.2	113.3	64.78	69.9	71.5
Abril	171.4	167.9	153.0	145.6	196.6	106.9	113.7	175.1
Mayo	261.0	215.6	208.1	200.6	284.0	134.6	156.5	210.2
Junio	148.7	124.5	147.9	85.0	170.3	69.9	85.8	138.4
Julio	129.4	156.1	161.6	80.0	155.0	75.7	103.5	122.3
Agosto	184.3	201.8	255.8	80.2	250.0	133.6	159.9	206.1
Septiembre	239.6	310.7	324.8	119.4	353.0	228.6	230.9	298.9
Octubre	231.8	284.0	265.6	174.4	402.0	244.4	258.1	346.4
Noviembre	180.9	153.6	178.8	202.4	215.4	168.6	167.4	189.6
Diciembre	115.9	70.7	81.2	163.1	91.4	65.56	61.3	73.5

Los valores máximos de precipitación anual en la cuenca se registran en la estación de Cerro Maravilla en 1970 llegando a alcanzar 3723 mm de lluvia, 52% por encima de la media de la cuenca. También en la estación de Dos Bocas en el año 1981 se han registrado valores considerables con 3053 mm de lluvia. Los valores mínimos de precipitación anual se registraron en la estación Montebello (tabla 12) para el año 1994 con 936 mm, 53% por debajo de la media de la cuenca seguida por la estación Dos Bocas con 1100 mm, también registrados en el 1994.

Tabla 12. Precipitación Media, Máxima y Mínima anual de las estaciones en la Cuenca Río Grande de Arecibo.

Estación	Media (mm)	Máxima (mm)	Mínima (mm)
Cuenca	1964.0	2669.0 (1998)	1190.3 (1994)
Dos Bocas	1937.3	3053.6 (1981)	1100.8 (1994)
Adjuntas 1NW	2006.8	3020.1 (2000)	1106.4 (1994)
Adjuntas Substation	1909.9	2873.8 (1998)	1127.0 (1994)
Cerro Maravilla	2420.3	3723.1 (1970)	1653.9 (1994)
Montebello	1558.9	2600.2 (1981)	936.3 (1994)
Peñuelas	1398.4	2171.7 (2003)	795.5 (1973)
Corral Viejo	1507.3	2550.7 (2003)	701.5 (1991)
Aceituna	1976.4	3071.9 (1960)	1149.5 (1994)

Aunque las estaciones muestran un coeficiente de variación anual relativamente bajo, la variabilidad que resultó de cada mes es elevada. Todas las estaciones muestran la variabilidad más elevada en los meses de diciembre y enero, por encima del 70%, mientras que los meses que menos coeficiente de variación revelan son los meses de agosto y septiembre, por debajo del 56% (tabla 13).

Tabla 13. Coeficiente de variación (CV, %) anual y mensual. Cuenca Río Grande de Arecibo

	Dos Bocas	Adjuntas Substation	Adjuntas 1NW	Montebello	Cerro Maravilla	Peñuelas	Corral Viejo	Aceituna
Año	17.1	19.0	19.8	27.9	20.4	26.8	26.8	25.0
Enero	70.5	71.8	164.4	60.3	85.6	92.8	115.3	102.2
Febrero	72.1	69.2	63.5	65.2	50.1	82.1	80.8	81.9
Marzo	70.9	69.9	72.6	68.6	62.7	73.7	72.3	68.1
Abril	61.9	54.4	61.0	72.2	61.1	75.2	75.9	65.7
Mayo	44.3	56.9	62.9	59.6	57.7	77.2	71.8	57.1
Junio	53.9	61.5	47.7	79.4	56.7	95.0	76.5	56.1
Julio	42.3	45.7	58.1	56.9	54.9	69.6	67.9	66.3
Agosto	32.9	32.9	39.4	56.6	38.5	56.3	54.3	42.3
Septiembre	52.9	48.0	46.2	47.9	45.7	56.9	60.2	49.4
Octubre	41.8	45.1	47.7	64.7	53.6	67.3	65.3	56.0
Noviembre	58.1	54.5	58.4	57.1	51.7	73.5	93.9	67.2
Diciembre	83.5	56.1	67.7	86.8	46.6	80.2	81.0	77.6

-Adjuntas 1NW y Adjuntas Substation

La temporada de lluvia, como en todas las estaciones, comienza a finales de marzo principios de abril con una leve disminución de las precipitaciones en los meses de junio y julio (Figs. 51 y 52). Posteriormente aparece otro ascenso de las lluvias teniendo su pico máximo en el mes de septiembre con 325 mm de lluvia para Adjuntas 1NW y con 311 mm para Adjuntas Substation. El mes más seco es febrero con valores de 57 mm de lluvia media mensual para Adjuntas 1NW y 65 mm para Adjuntas Substation.

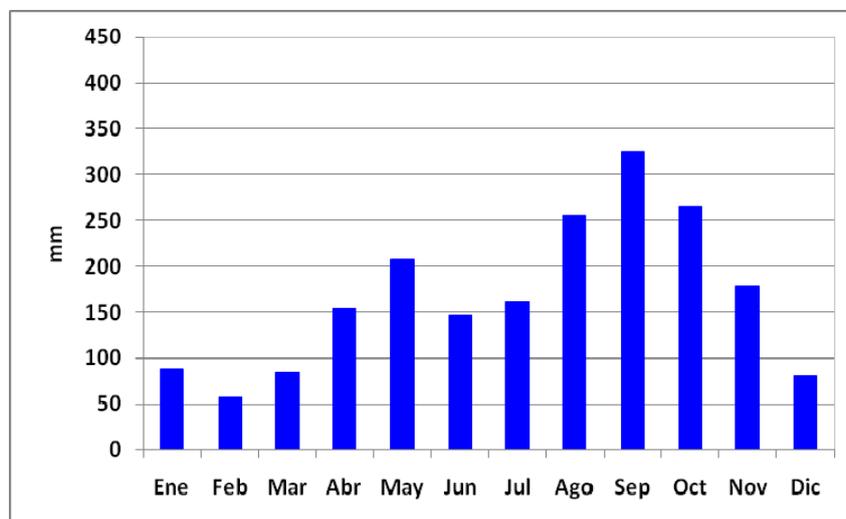


Figura 51. Precipitación Media Mensual en la estación de Adjuntas 1NW, 1955-2006. Cuenca Río Grande de Arecibo

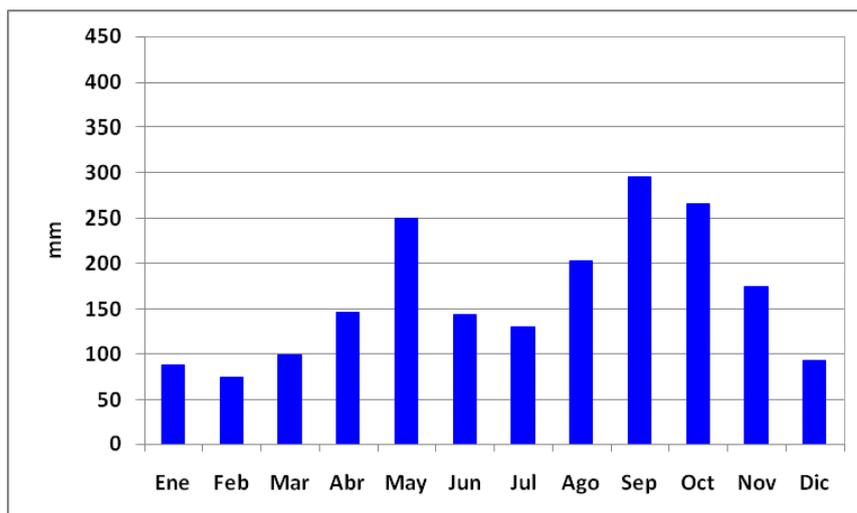


Figura 52. Precipitación Media Mensual en la estación de Adjuntas Substation, 1970-2006. Cuenca Río Grande de Arecibo

-Dos Bocas y Montebello

Las estaciones de Dos Bocas y Montebello (Figs. 53 y 54) muestran un comportamiento anual parecido a las estaciones anteriores, típico de la región hidrográfica donde están ubicadas las estaciones. Se observa el periodo seco muy claro e identificable en los meses de enero y febrero. La precipitación media mínima mensual en Dos Bocas es de 80 mm de lluvia en febrero, mientras que en Montebello se registra para el mes de marzo con 78 mm. A diferencia de otras estaciones el mes que más precipitaciones registra para el periodo de estudio en la estación de Dos Bocas (1948-2006) es el mes de mayo con 261 mm de lluvia media (Fig. 53). Seguido de una marcada disminución en los meses de junio y julio y un moderado ascenso en los meses de septiembre y octubre. Mientras que en la estación de Montebello, es el mes de octubre con 202 mm. Le sigue el mes de mayo con una media de 201 mm de lluvia y una clara disminución en los meses de junio y julio también.

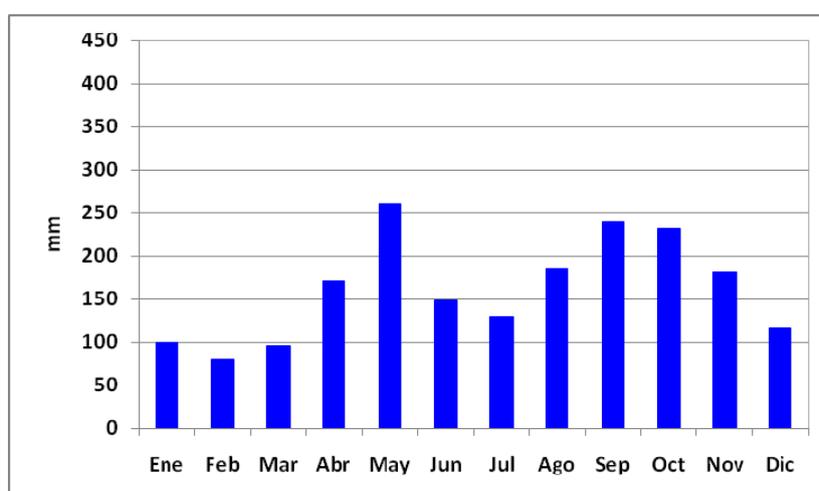


Figura 53. Precipitación Media Mensual en la estación de Dos Bocas, 1948-2006. Cuenca Río Grande de Arecibo

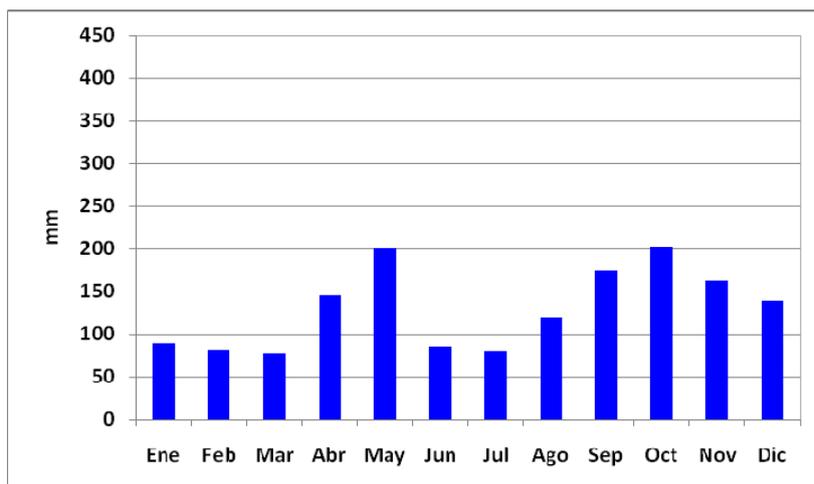


Figura 54. Precipitación Media Mensual en la estación de Montebello, 1970-2001. Cuenca Río Grande de Arecibo

-Cerro Maravilla y Peñuelas

La estación de Cerro Maravilla muestra un comportamiento anual muy similar a las anteriores estaciones antes descritas. Los meses más secos van de diciembre (91 mm) a febrero (87 mm) con un leve aumento en las precipitaciones de enero (103 mm). Ocurre un aumento de las precipitaciones a finales de marzo y principios de abril, siguiendo una tendencia progresiva hasta mayo (Figs. 55). En junio y julio se da una disminución de las precipitaciones pronunciada y comienza el aumento de las mismas nuevamente en agosto. Su pico máximo ocurre en octubre y luego comienza a descender la cantidad de lluvia mensual precipitada. El mes de octubre cuenta con una media de 402 mm de lluvia.

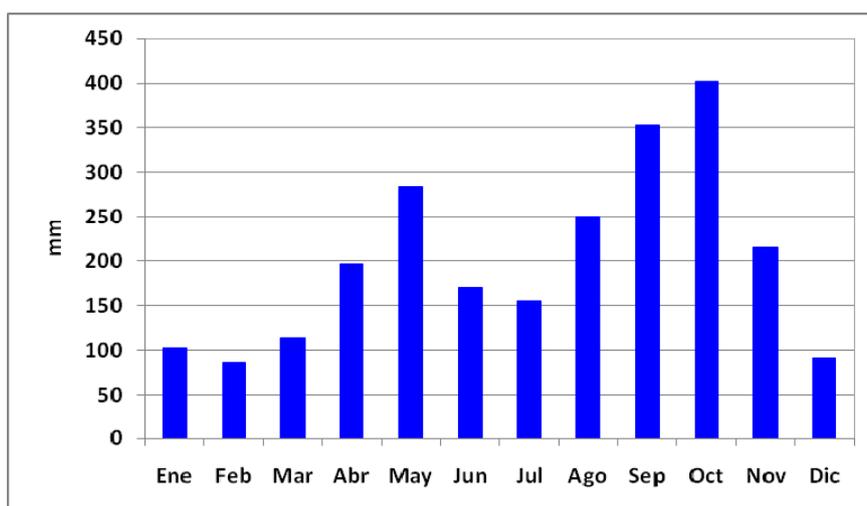


Figura 55. Precipitación Media Mensual en la estación de Cerro Maravilla, 1970-2006. Cuenca Río Grande de Arecibo

La estación de Peñuelas, con una precipitación media de 1398 mm anuales, muestra una variabilidad anual cercana al 28%. Sin embargo, cuando analizamos los meses se

observa una variabilidad que se mantiene por encima del 50%. El mes de enero, uno de los que menos lluvia recibe, muestra un coeficiente de variación del 92%.

Esta estación, en el año 2003 registró su precipitación máxima anual con 2172 mm mientras que en 1973 registró su mínimo anual con 796 mm. Aunque muestra mucha diferencia en cuanto a la cantidad de agua que recibe dicha estación, el comportamiento anual de la lluvia sigue el mismo patrón. Los meses de mayor precipitación se observan a comienzos de septiembre, alcanza su pico máximo en octubre mostrando un descenso de las precipitaciones a partir de noviembre (Fig. 56). La época del año entre los meses de diciembre, enero, febrero y marzo (invierno) es relativamente seca hasta mostrar un ligero aumento en las precipitaciones a comienzos de abril y el mes de mayo con un pequeño descenso nuevamente entrado el verano (junio y julio).

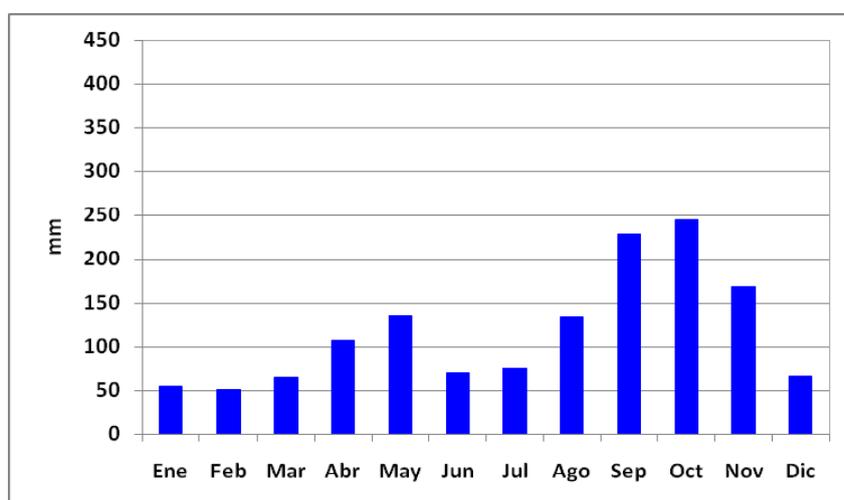


Figura 56. Precipitación Media Mensual en la estación de Peñuelas, 1972-2003. Cuenca Río Grande de Arecibo

-Corral Viejo y Aceituna

Corral Viejo es, junto con la estación de Peñuelas, una de las estaciones que menos lluvia registra anualmente. Cuenta con una precipitación media anual de 1507 mm y una variabilidad que alcanza el 26%. Mientras, el coeficiente de variación de los meses se mantiene por encima del 55% siendo enero el mes que más variabilidad muestra con 115%.

La precipitación máxima anual coincide con la estación de Peñuelas cuando en 2003 recibió 2551 mm de lluvia en un año. Muestra su mes más seco en pleno invierno (febrero) con apenas 47 mm de precipitación media (Fig. 57). Mientras, la precipitación máxima mensual se observa a comienzos del año hidrológico en el mes de octubre.

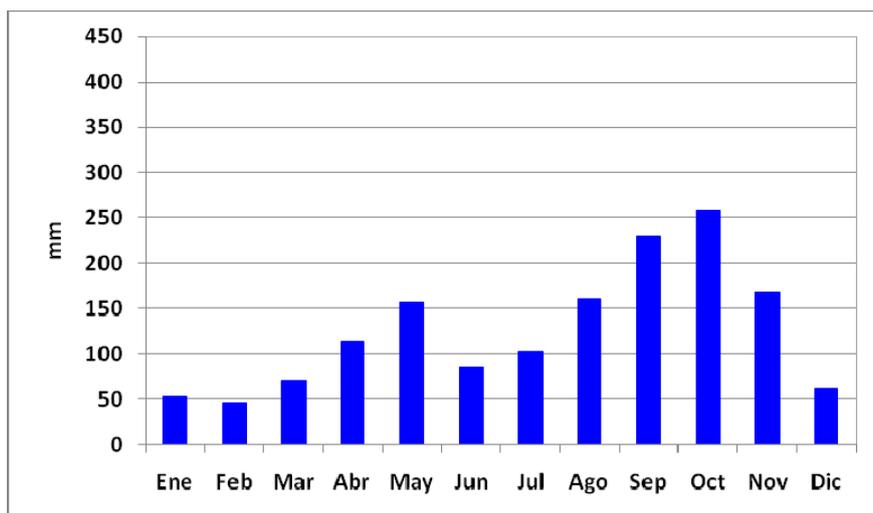


Figura 57. Precipitación Media Mensual en la estación de Corral Viejo, 1971-2007. Cuenca Río Grande de Arecibo

La estación de Aceituna cuenta con una precipitación media anual de 1976 mm y un coeficiente de variación de 25%. Su precipitación máxima anual se dio en 1960 con más de 3000 mm y la mínima en 1994 con 1150 mm. Aunque muestra una variabilidad anual considerada media, la variabilidad anual de los meses supera el 65%, incluso el mes de octubre, cuando más lluvia recibe dicha estación alcanzó valores de 193% de variabilidad. Su patrón de comportamiento es exactamente igual las estaciones anteriores (Fig. 58).

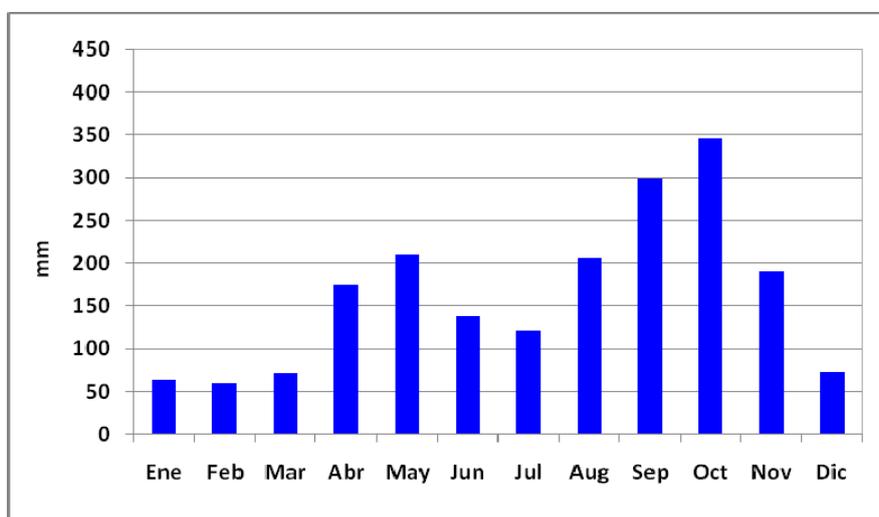


Figura 58. Precipitación Media Mensual en la estación de Aceituna 1955-2005. Cuenca Río Grande de Arecibo

6.1.2 Precipitación: Cuenca del Río Grande de Manatí

La precipitación media de la cuenca en los años del análisis fue de 1769 mm (tabla 14) con una variabilidad del 23%. La precipitación máxima fue de 3072 mm de lluvia anual registrados en la estación de Aceituna para el año 1960 (tabla 15). Este dato cae fuera de los años de análisis global para la cuenca, sin embargo no por ello deja de ser importante. La estación que registra mayor precipitación, promediada anualmente, es Cerro Maravilla. La estación de Manatí 3E es la que muestra la precipitación media más baja (Fig. 59).

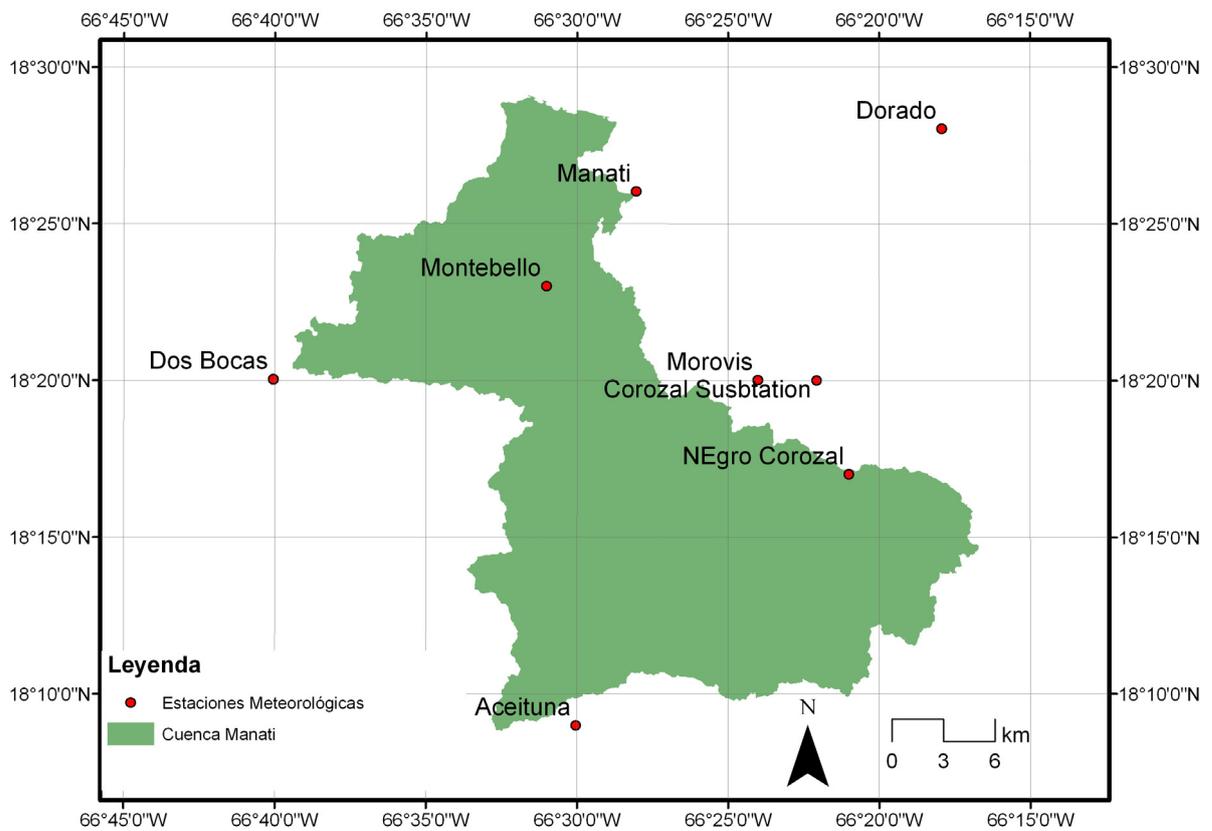


Figura 59. Ubicación de estaciones climáticas en la cuenca del Río Grande de Manatí.

Tabla 14. Precipitación (mm) media mensual y anual por estación y coeficiente de variación (CV, %) anual. Cuenca del Río Grande de Manatí

	Dos Bocas	Aceituna	Morovis	Montebello	Manatí 3E	Negro-Corozal	Cerro Maravilla
CV	17.1	23.9	23.6	27.9	25.1	27.4	20.4
Año	1937.3	1956.1	1803.4	1558.9	1512.5	1821.9	2420.3
Enero	99.1	64.1	112.0	89.3	117.7	131.5	102.6
Febrero	79.7	60.0	79.7	81.9	80.5	94.6	86.7
Marzo	95.6	71.5	98.3	78.2	77.2	113.0	113.3
Abril	171.4	175.1	173.5	145.6	132.1	189.7	196.6
Mayo	261.0	210.2	223.2	200.6	170.4	193.3	284.0
Junio	148.7	138.4	86.6	85.0	90.3	70.0	170.3
Julio	129.4	122.3	115.5	80.0	111.1	105.5	155.0
Agosto	184.3	206.1	152.7	80.2	116.1	143.4	250.0
Septiembre	239.6	298.9	203.7	119.4	134.2	226.9	353.0
Octubre	231.8	346.4	207.1	174.4	148.2	201.7	402.0
Noviembre	180.9	189.6	205.2	202.4	177.2	219.8	215.4
Diciembre	115.9	73.5	145.9	163.1	157.5	132.7	91.4

La precipitación mínima anual se registró en la estación de Manatí 3E en el año 1994 nuevamente, con una precipitación total anual de 861 mm (tabla 15). Representa un 50% menos de precipitación total comparada con la media. La variabilidad más alta de esta cuenca la muestra la estación de Montebello con un 28% de coeficiente de variación, seguida por la estación de Manatí 3E con un 25%. Mientras, la variabilidad más baja se encuentra en la estación de Corozal con un 22% de coeficiente de variación.

Tabla 15. Precipitación Media, Máxima y Mínima anual para la cuenca y por estación. Cuenca Río Grande Manatí

Estación	Media (mm)	Máxima (mm)	Mínima (mm)
Cuenca	1769.0	2447.7 (1979)	1054.1 (1994)
Negro-Corozal	1891.4	2940.8 (2005)	1053.4 (1994)
Aceituna	1976.4	3071.9 (1960)	1149.5 (1994)
Morovis	1828.2	2697.7 (2005)	1112.5 (1994)
Montebello	1558.9	2600.2 (1981)	936.3 (1994)
Manatí	1532.9	2302.0 (1965)	860.6 (1994)
Dos Bocas	1937.3	3053.6 (1981)	1100.8 (1994)
Cerro Maravilla	2420.3	3723.1 (1970)	1653.9 (1994)

Los coeficientes de variación de cada mes mostraron valores por encima del 30% y en algunas estaciones alcanzaron valores del 100% (tabla 16). Al igual que en la cuenca anterior, los meses de diciembre y enero (invierno) son los meses que revelaron los coeficientes más elevados, mientras que los meses de menos variabilidad son los de julio y agosto.

Tabla 16. Coeficiente de variación (CV, %) anual y mensual. Cuenca Río Grande de Manatí.

	Dos Bocas	Aceituna	Morovís	Montebello	Manatí 3E	Negro-Corozal	Cerro Maravilla
Año	17.1	25.0	23.6	27.9	25.1	27.4	20.4
Enero	70.5	102.2	64.7	60.3	59.5	74.9	85.6
Febrero	72.1	81.9	61.4	65.2	64.5	49.3	50.1
Marzo	70.9	68.1	80.0	68.6	75.0	66.1	62.7
Abril	61.8	65.8	65.9	72.2	66.1	57.4	61.1
Mayo	44.3	57.1	66.5	59.6	75.7	64.8	57.7
Junio	53.9	56.1	70.0	79.4	74.9	66.8	56.7
Julio	42.3	66.3	49.6	56.9	54.3	44.5	54.9
Agosto	32.9	42.3	41.7	56.6	42.4	49.9	38.5
Septiembre	52.9	49.4	43.6	47.9	47.9	50.7	45.7
Octubre	41.8	56.0	48.7	64.7	54.9	50.2	53.6
Noviembre	58.1	67.2	55.3	57.1	56.7	59.4	51.7
Diciembre	83.5	77.6	76.6	86.8	76.4	64.7	46.6

-Negro-Corozal y Aceituna

La precipitación media anual para la estación de Negro-Corozal es de 1891 mm de lluvia con una variabilidad de 27%. Mientras que la estación de Aceituna (1955-2005) cuenta con una media anual de 1976 mm. El mes más seco es junio para la estación de Negro-Corozal, con una media de 70 mm de lluvia (Fig. 60), y febrero en la estación de Aceituna con 60 mm.

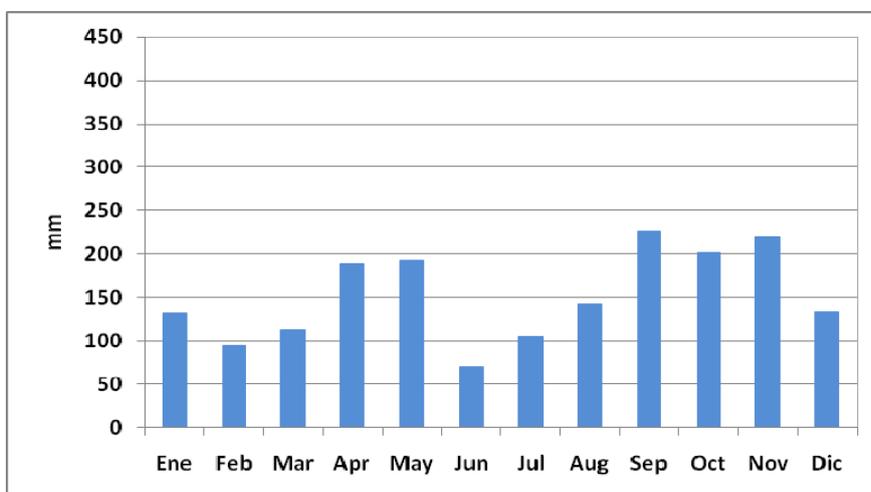


Figura 60. Precipitación Media Mensual en la estación de Negro-Corozal (1976-2007)

En ambas estaciones, los meses más secos ocurren entre diciembre, enero y principios de marzo. A finales de marzo y principios de abril tiene comienzo la temporada húmeda con su pico máximo de precipitaciones en mayo. Ocurre una gran disminución de las precipitaciones en el mes de junio y principios de julio volviendo aumentar a finales de julio, principios de agosto. Cabe mencionar, como se observa en la figura 59, que el mes más seco en Negro-Corozal es junio. La precipitación máxima mensual en la estación Negro-Corozal se presenta en el mes de septiembre, mientras que en la estación de Aceituna se muestra en octubre (Fig. 61).

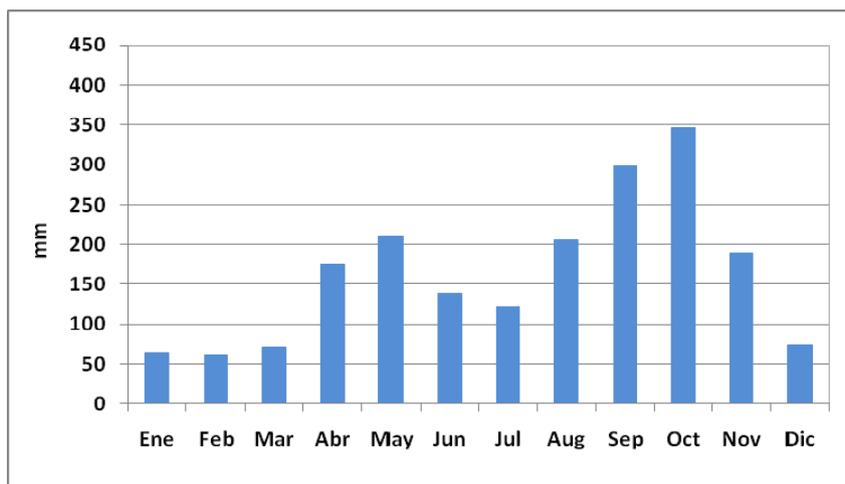


Figura 61. Precipitación Media Mensual en la estación de Aceituna (1955-2005)

-Morovis y Manatí 3E

La estación de Morovis se asemeja en su comportamiento anual (Fig. 62) a la estación de Corozal Substation. La precipitación máxima ocurre en el mes de mayo con una media en los últimos 49 años de 223 mm de lluvia. Mientras que la precipitación máxima mensual para la estación de Manatí se registra en noviembre con 177 mm. La temporada seca ocurre de enero a principios de marzo, siendo febrero con 79 mm de lluvia para la estación de Morovis y marzo para la estación de Manatí 3E (Fig. 63).

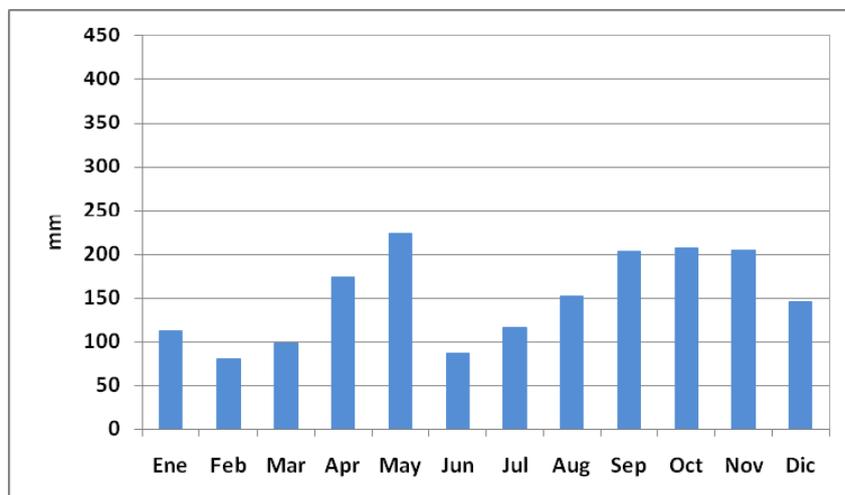


Figura 62. Precipitación Media Mensual en la estación de Morovis (1957-2006)

En ambas aumenta la precipitación a finales de marzo principios de abril teniendo su pico máximo en el mes de mayo. Le sigue una disminución en los mes de junio y comenzando una tendencia progresiva en julio hasta octubre y ya en diciembre comienzan a disminuir.

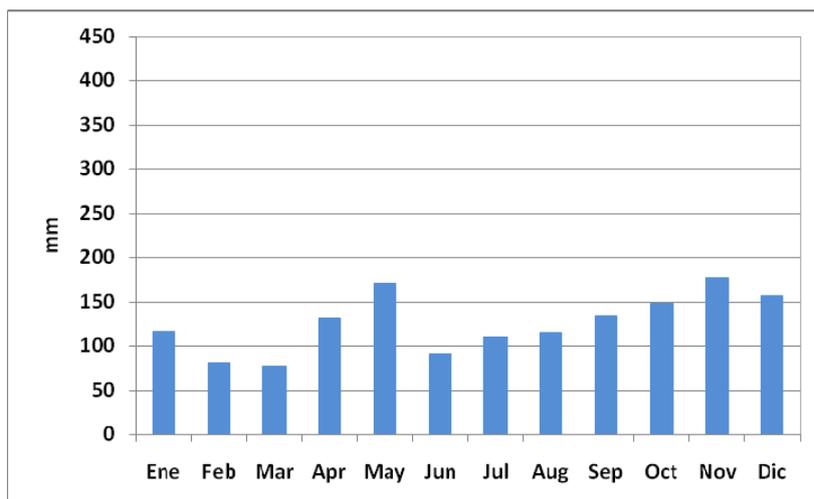


Figura 63. Precipitación Media Mensual en la estación de Manatí 3E (1956-2006)

6.1.3 Precipitación: Cuenca Río Culebrinas

Dicha cuenca (Fig 64.), representativa de la región hidrográfica del oeste, cuenta con una precipitación media de 2171 mm anuales. Muestra un coeficiente de variación anual relativamente bajo, que apenas alcanza el 13%, mientras la variabilidad mensual es considerada media (< 69%), siendo febrero el de mayor variabilidad.

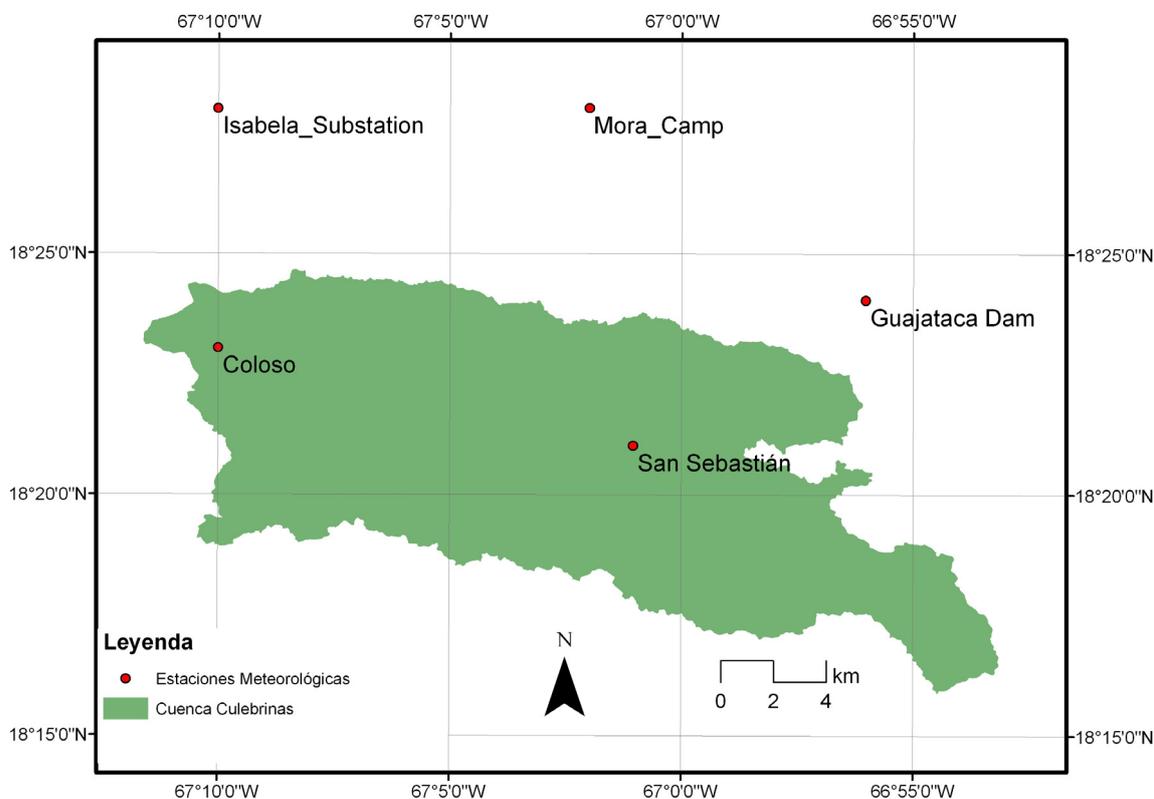


Figura 64. Ubicación de estaciones climáticas en la cuenca del Río Culebrinas.

La precipitación máxima encontrada en la cuenca fue de 2817 mm en el año 1960, sólo un 29% por encima de la media, mientras que la precipitación mínima se dio el año 1958 con 1592 mm de lluvia, un 26% aproximadamente por debajo de la media. De las cuatro estaciones consideradas en esta cuenca, la estación de San Sebastián registra la precipitación media anual más alta con 2335 mm. La estación de Mora Camp es la que menos precipitación anual muestra, sin embargo su variabilidad es la más alta (tabla 17).

Tabla 17. Precipitación (mm) media mensual y anual por estación y coeficiente de variación anual (CV, %). Cuenca del Río Culebrinas

	Coloso	San Sebastián	Mora Camp	Guajataca Dam
CV	14%	16%	19%	16%
Año	1994.1	2335.6	1510.3	1878.1
Enero	56.5	56.7	93.4	98.6
Febrero	56.2	71.2	69.3	76.8
Marzo	72.9	98.8	89.0	97.1
Abril	133.9	194.4	133.9	157.2
Mayo	250.2	328.2	184.2	247.1
Junio	260.2	293.9	147.8	184.9
Julio	226.8	205.8	109.8	129.8
Agosto	272.2	266.1	135.1	179.4
Septiembre	246.4	280.1	132.8	216.1
Octubre	225.1	290.4	147.8	215.2
Noviembre	127.3	168.5	147.3	167.3
Diciembre	66.5	81.3	119.8	108.8

Todas las estaciones utilizadas en esta cuenca muestran una variabilidad baja, <19%. La estación que registró la precipitación mínima anual fue Mora Camp con 956 mm en el año 1956 (tabla 18). La precipitación máxima anual se ha encontrado en la estación de San Sebastián con 3264 mm de lluvia en el año 1960.

Tabla 18. Precipitación Media, Máxima y Mínima anual para la cuenca y por estación. Cuenca Río Culebrinas.

Estación	Media (mm)	Máxima (mm)	Mínima (mm)
Cuenca	1769.0	2447.7 (1979)	1054.1 (1994)
Coloso	1994.1	2772.2 (1959)	1398.7 (1997)
San Sebastián	2335.6	3263.9 (1960)	1464.3 (1958)
Mora Camp	1510.3	2039.1 (1981)	956.1 (1956)
Guajatac Dam	1878.1	2590.3 (1965)	1214.6 (1976)

Esta cuenca muestra coeficientes de variación relativamente bajos. La estación de Mora Camp es la de mayor variabilidad anual. No obstante, la estación de Guataca Dam revela un coeficiente de variación en el mes de febrero que supera el 80%. Los meses que menos variabilidad sufren son los meses de verano, julio, agosto y septiembre, mientras que los que más variación mostraron son los del periodo de diciembre a febrero (tabla 19).

Tabla 19. Coeficiente de variación (CV, %) anual y mensual. Cuenca Río Culebrinas.

	Coloso	San Sebastián	Mora Camp	Guajataca Dam
Año	14.0	16.0	19.0	16.0
Enero	68.1	71.4	67.0	72.5
Febrero	77.7	81.1	60.7	72.9
Marzo	76.5	80.1	69.5	78.6
Abril	69.7	56.2	73.5	66.6
Mayo	37.6	36.5	53.8	43.5
Junio	34.4	32.3	51.4	37.1
Julio	35.6	45.4	46.2	43.6
Agosto	31.6	33.4	42.9	38.2
Septiembre	32.3	31.5	45.7	38.6
Octubre	36.9	30.3	42.5	42.5
Noviembre	53.7	57.9	50.9	60.2
Diciembre	72.4	72.6	66.9	84.3

-Coloso y San Sebastián

La precipitación media anual para la estación de Coloso es de 1994 mm de lluvia con una variabilidad de 14%. La estación de San Sebastián cuenta con una media anual de 2335 mm y con un coeficiente de variación anual del 19%. El mes más seco en Coloso ocurre en febrero con 56 mm de lluvia promediados (Fig. 65), mientras que para la estación de San Sebastián su observa en enero con una media también de 56 mm de lluvia (Fig. 66).

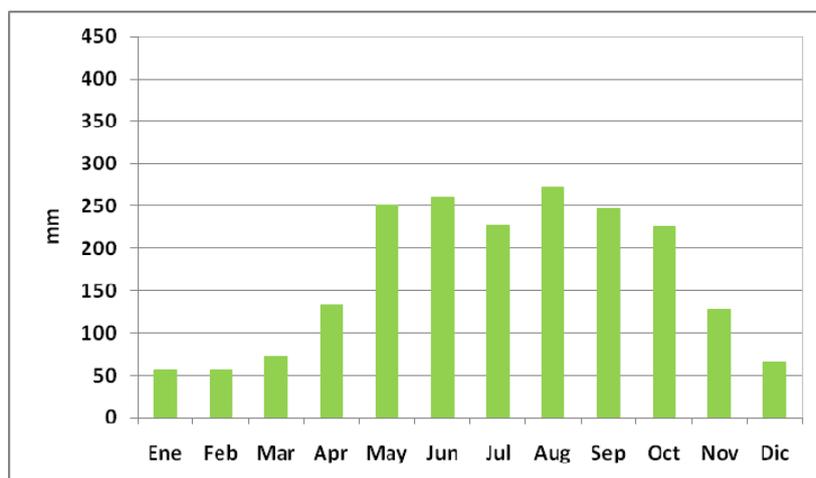


Figura 65. Precipitación Media Mensual en la estación de Coloso (1948-2007)

Como era de esperar, su comportamiento hidrológico es muy similar a las demás estaciones, donde la temporada de invierno es la época que menos lluvia se registra, mientras que los meses de más lluvia son en la primavera y el otoño.

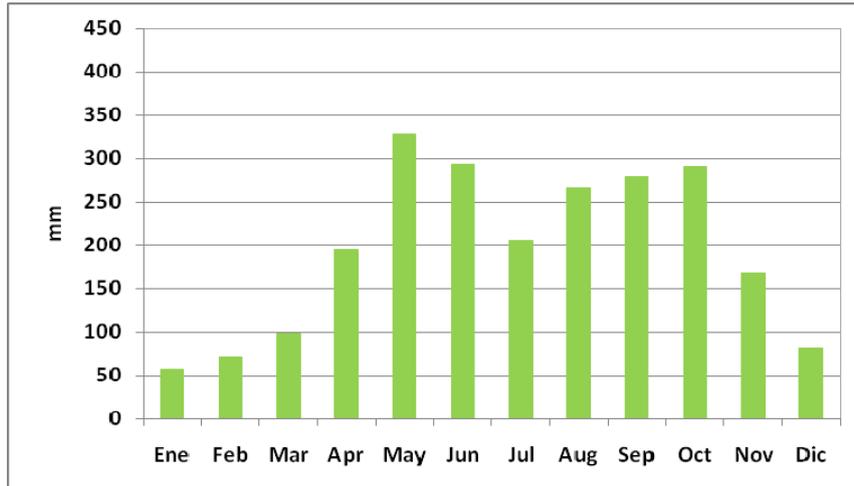


Figura 66. Precipitación Media Mensual en la estación de San Sebastián (1956-1996)

-Mora Camp y Guajataca Dam

Mora Camp (Fig. 67) es la estación que menos lluvia recibe en todo el año en la Cuenca del Río Culebrinas. Dicha estación promedia 1510 mm de lluvia anuales y cuenta con una variabilidad del 19%. La estación de Guajataca Dam tiene una media de 1878 mm de precipitación anual y cuenta con variabilidad del 16%.

Estas dos estaciones muestran un comportamiento hidrológico casi idéntico. Su pico de precipitación máxima se observa en el mes de mayo, seguido por una disminución en los meses de junio y más acusada en julio. A partir de agosto, muestran un ligero aumento de la precipitación hasta el mes de octubre, disminuyendo tenuemente en noviembre (Mora Camp) y un poco más notable en la estación de Guajataca Dam (Fig. 68). Los meses de invierno son los más secos de todo el año.

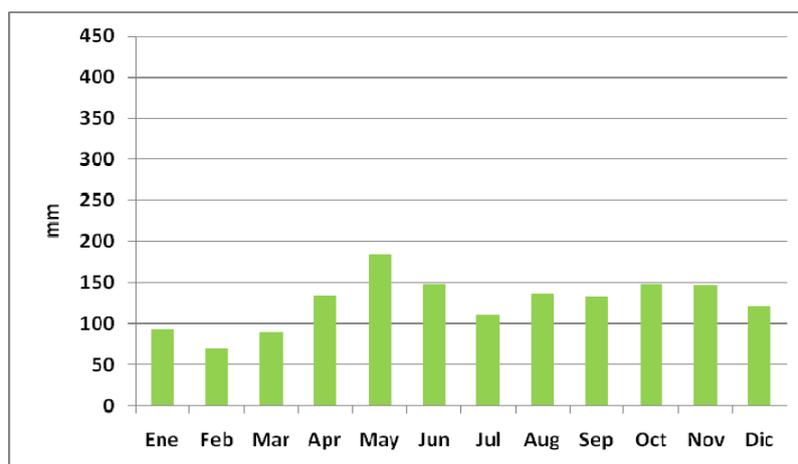


Figura 67. Precipitación Media Mensual en la estación de Mora Camp (1955-2007)

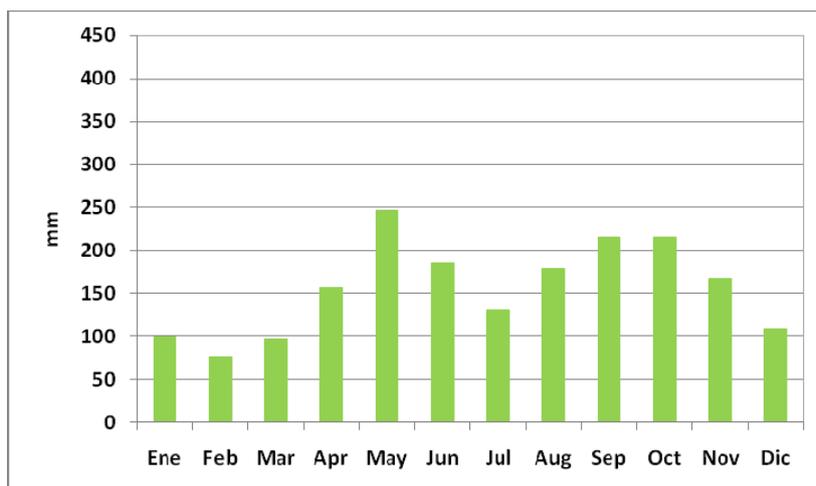


Figura 68. Precipitación Media Mensual en la estación de Guajataca Dam (1955-2006)

6.1.4 Precipitación: Cuenca Río Fajardo

La Cuenca del Río Fajardo (Fig. 69) cuenta con una precipitación media de 2556 mm al año y una variabilidad de tipo medio (17%). Los valores máximos de precipitación anual en la cuenca se registran en la estación de Pico del Este, donde la precipitación superó los 5000 mm en el 1987, más del doble de la media anual en la cuenca. En la tabla 20 se puede observar la media mensual de cada estación utilizada en la cuenca.

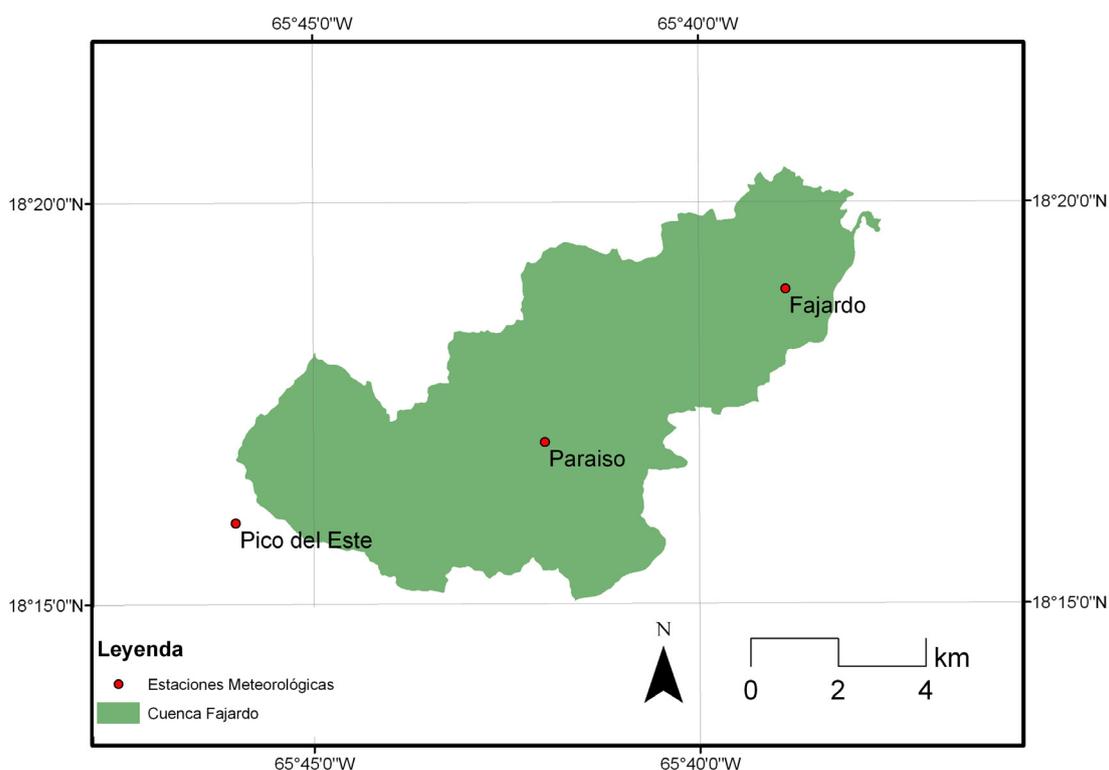


Figura 69. Ubicación de estaciones climáticas en la cuenca del Río Fajardo

Tabla 20. Precipitación (mm) media mensual y anual por estación y coeficiente de variación (CV, %) anual. Cuenca del Río Fajardo

	Paraíso	Pico del Este	Fajardo
CV	21.6	14.0	24.0
Año	2495.9	4340	1591.4
Enero	145.4	307.5	85.9
Febrero	112.9	257.6	68.4
Marzo	114.4	255.8	75.9
Abril	179.5	310.5	99.5
Mayo	284.7	460.9	188.5
Junio	189.3	324.4	125.6
Julio	181.6	326.1	131.3
Agosto	219.4	377.8	154.8
Septiembre	243.2	389.8	165.4
Octubre	296.2	442.7	195.7
Noviembre	316.7	500.6	181.4
Diciembre	212.6	386.3	119.0

Los valores mínimos de precipitación anual en la cuenca se registraron en la estación Fajardo (tabla 21) el año 1967 con unos 824 mm, un 32% por debajo de la media de la cuenca, seguido por la estación Paraíso con 1539 mm.

El coeficiente de variación en dicha cuenca no muestra valores muy llamativos. La variabilidad más alta en los años de estudio de la cuenca se encuentra en la estación Fajardo, con un 24% de coeficiente de variación, mientras que la variabilidad más baja se da en la estación Pico del Este con un 14%.

Tabla 21. Precipitación Media, Máxima y Mínima anual para la cuenca y por estación. Cuenca Río Fajardo.

Estación	Media (mm)	Máxima (mm)	Mínima (mm)
Cuenca	2556.1	3720.5	1912.1
Paraíso	2495.9	3954.5 (1979)	1539.7 (1967)
Pico del Este	4340.0	5457.4 (1987)	3480.2 (1994)
Fajardo	1591.4	2469.7 (1970)	824.2 (1967)

De manera general, las cuencas anteriores habían mostrado mayor variabilidad entre los meses de diciembre a febrero y menos variabilidad de julio a septiembre. No obstante, en las estaciones Paraíso y Fajardo, revelan el mayor coeficiente de variación en los meses de marzo y mayo, mientras que en Pico del Este destaca abril como el mes de mayor variación en los años de estudios. Aún así, en las tres estaciones se puede observar que el mes que menos variación sufre es agosto (tabla 22).

Tabla 22. Coeficiente de variación (CV, %) anual y mensual. Cuenca Río Fajardo

	Paraíso	Pico del Este	Fajardo
Año	21.6	14.0	24.0
Enero	50.9	38.2	60.9
Febrero	54.6	39.4	60.9
Marzo	67.5	43.5	71.9
Abril	61.0	47.4	67.9
Mayo	67.7	46.4	78.9
Junio	48.4	32.0	50.9
Julio	45.6	27.7	56.1
Agosto	40.6	28.6	33.8
Septiembre	46.7	37.3	44.9
Octubre	56.1	45.3	67.6
Noviembre	58.4	45.5	54.7
Diciembre	57.4	43.9	67.3

-Paraíso, Pico del Este y Fajardo

La temporada de lluvia en todas las estaciones de esta cuenca comienza a finales de marzo principios de abril, con un pico en el mes de mayo y una disminución en los meses de junio y julio (Figs. 70 y 71). En agosto muestran otro ascenso de las lluvias, con un pico en el mes de noviembre en las estaciones Paraíso y Pico del Este, mientras que el pico máximo en la estación de Fajardo se observa en el mes de octubre. Todas las estaciones concuerdan en que el mes más seco del año es febrero.

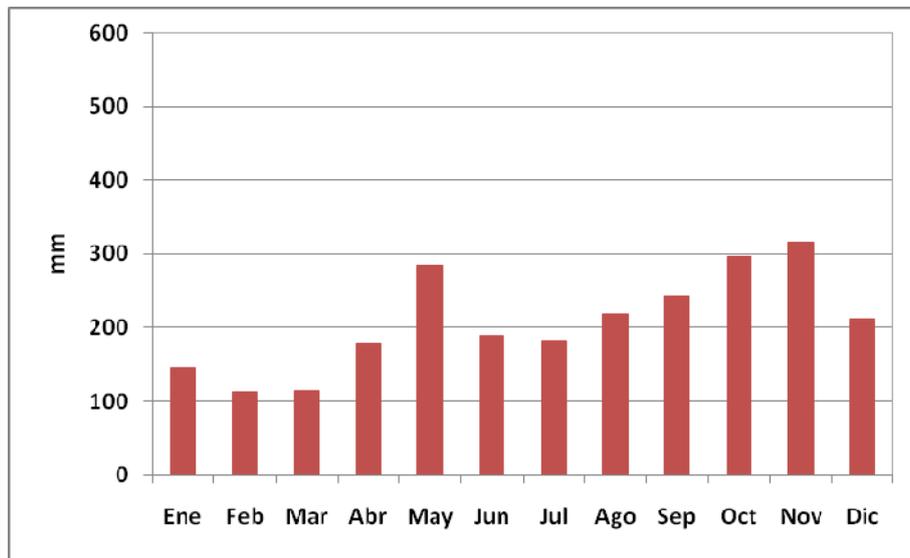


Figura 70. Precipitación Media Mensual. Paraíso

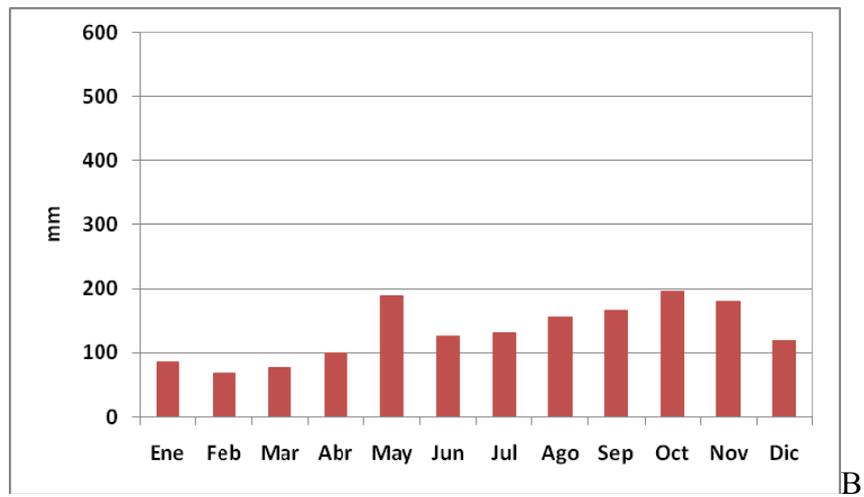
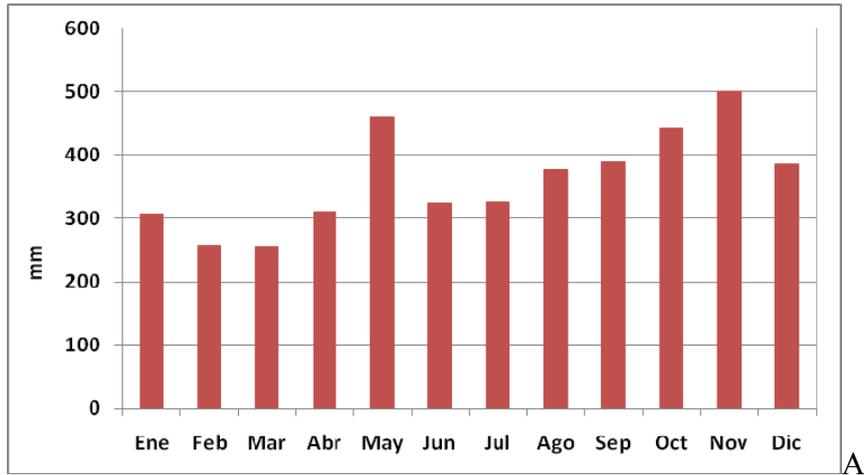


Figura 71. Precipitación Media Mensual (A) Pico del Este y (B) Fajardo.

6.2 Temperatura de Puerto Rico

La temperatura en la isla sigue un comportamiento típico de las zonas tropicales, en general, y del Caribe, en particular (Fig. 72). Todas las estaciones muestran el mismo comportamiento anual, en el que los meses más frescos van desde diciembre hasta marzo (como es de esperarse en el hemisferio norte). En abril surge un aumento de las temperaturas progresivamente hasta alcanzar su pico máximo en los meses de julio y agosto (dependiendo de la estación). Llegado septiembre, surge un descenso progresivo de las mismas.

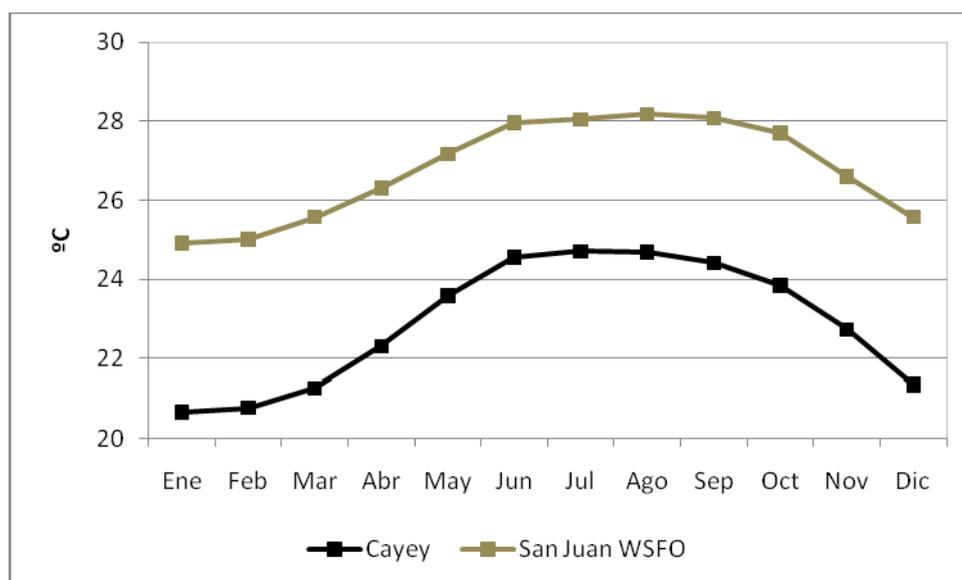


Figura 72. Temperatura media mensual

La isla cuenta con una temperatura media anual de 24.9 °C (tabla 23). Las estaciones que registraron la temperatura media anual más elevada son Fajardo (26.2 °C), San Juan (26.8 °C) y Gurabo Substation (26.7 °C), llegando alcanzar valores por encima de los 27.0 °C en muchas ocasiones y a no bajar de los 25.0 °C. Mientras, las estaciones donde más fresca fue la temperatura media anual son Pico del Este (18.6 °C), Adjuntas Substation (21.5 °C) y Cayey (22.9 °C). Vale mencionar que en todas las estaciones el coeficiente de variación se mantuvo por debajo del 2.5%.

Los años que más redundan como los años más calurosos son 1998 (se observa en 6 estaciones) y 2007 (en 3 estaciones). Por otro lado, casi ninguna estación (tabla 23) concuerda para poder descifrar en qué año se registraron las temperaturas medias anuales más frescas, ya que cada estación muestra un año distinto. La temperatura en la isla varía en altitud (aunque la variación es relativamente baja) desde las costas hacia el interior de la isla (Fig. 73) siendo más elevada en los llanos costeros y en las áreas metropolitanas (San Juan, Ponce y Mayagüez).

Tabla 23. Temperatura (°C) media anual, media anual mínima, media anual máxima, desviación estándar y coeficiente de variación.

ESTACIONES	Media Anual °C	Desv. Estándar	Media Anual Mínima °C	Media Anual Máxima °C	Coef. Variación (%)
Adjuntas Substation	21.5	0.5	20.7 (1988)	22.9 (1998)	2.5
Cayey	22.9	0.4	21.9 (1965)	23.9 (1998)	1.9
Coloso	25.2	0.6	23.9 (1978)	26.8 (2007)	2.3
Corozal Substation	24.6	0.5	23.7 (1992)	25.7 (2007)	2.0
Dos Bocas	25.3	0.5	24.2 (1952)	26.3 (1960)	1.9
Fajardo	26.2	0.4	25.5 (1971)	27.1 (1994)	1.5
Gurabo Substation	26.7	0.5	23.4 (1996)	25.6 (2003)	1.9
Isabela Substation	24.8	0.5	23.5 (1976)	25.8 (2003)	1.9
Juncos 1SE	25.0	0.6	23.7 (1965)	26.2 (1998)	2.3
Lajas Substation	25.2	0.5	24.0 (1994)	26.1 (2007)	2.2
Manatí	25.4	0.3	24.7 (1965)	26.0 (2003)	1.2
Mayaguez City	25.5	0.5	24.3 (1974)	26.9 (1998)	2.2
Pico del Este	18.6	0.4	17.7 (2001)	19.6 (1980)	2.4
Ponce	26.3	0.5	25.4 (1971)	27.4 (1998)	2.0
Río Piedras	25.8	0.5	24.7 (1994)	26.7 (1998)	1.9
San Juan WSFO	26.8	0.6	25.4 (1956)	28.0 (1983)	2.1

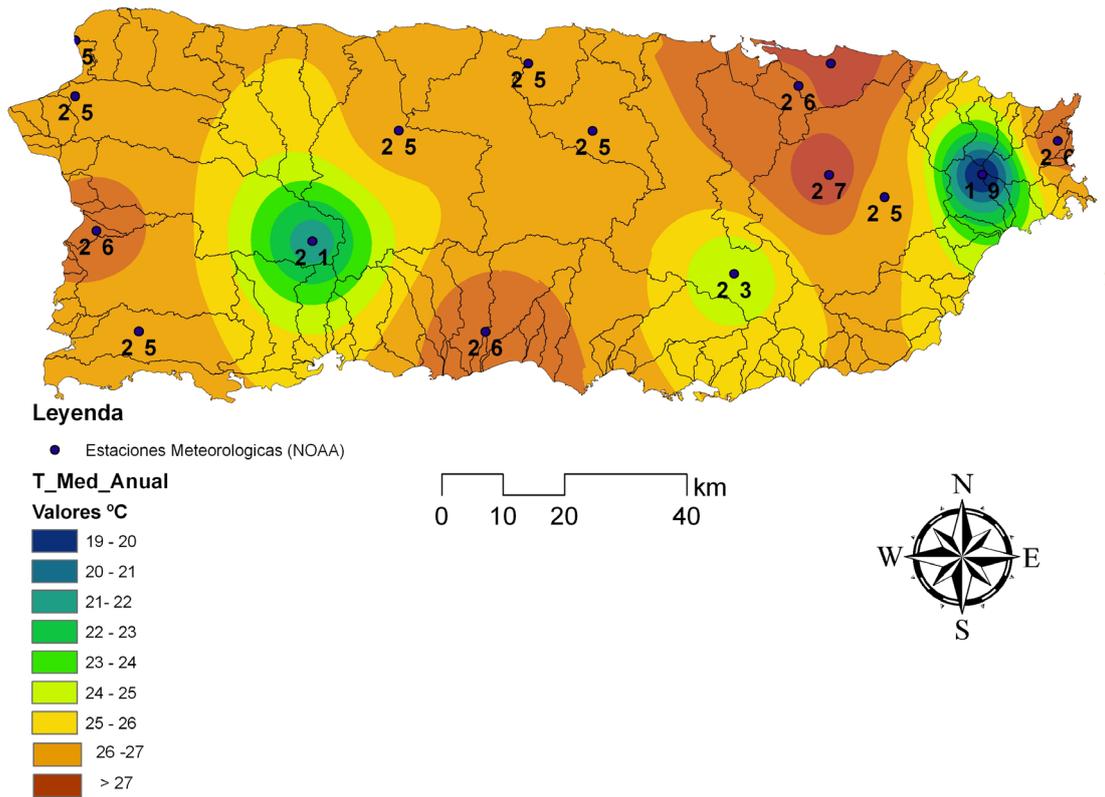


Figura 73. Temperatura media anual (°C).

6.2.1 Temperatura: Cuenca Río Grande de Arecibo

Los meses más frescos van de diciembre a marzo, donde las temperaturas se mantienen por debajo de los 24°C de media. La temperaturas descienden más el mes de febrero, alcanzando 23.3°C de media (Fig. 74). En abril se produce un aumento de las temperaturas progresivamente, hasta alcanzar su pico máximo el mes de agosto donde se alcanza de media los 26.9°C. Llegado septiembre, surge un descenso progresivo.

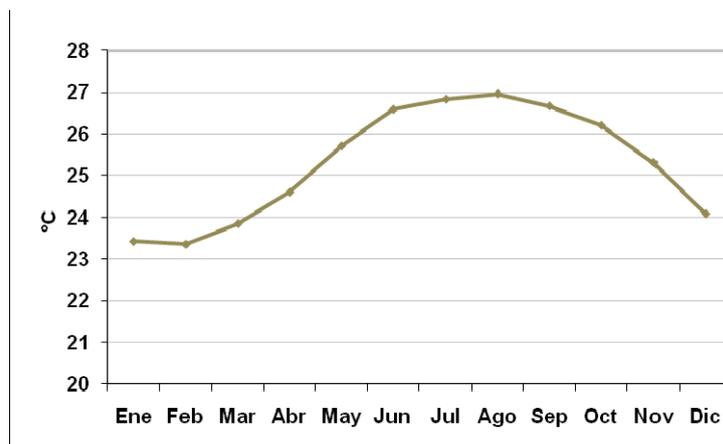


Figura 74. Temperatura media mensual. Estación Dos Bocas. Cuenca Río Grande de Arecibo (1948-2006)

La temperatura media anual de la estación Dos Bocas es de 25.3°C para los 59 años de estudio. Muestra una gran regularidad, con una variabilidad del 1.86%, considerada muy baja. La temperatura media máxima en la cuenca fue de 27.7°C. Estos valores se registraron en el mes de agosto para el año 1951. La media mínima de las temperaturas se registró para el mes de marzo en el año 1993 con 19.8°C.

En la tabla 24 se puede observar un resumen de la estadística descriptiva de los 59 años (1948-2006) para los valores de temperatura en la cuenca. En ella se observa que la variabilidad de cada mes es muy baja, como era de esperarse para condiciones tropicales. El coeficiente de variación más alto se encuentra en el mes de marzo con un 3.8%. La variabilidad más baja la muestra el mes de junio con un 1.7% de coeficiente de variación.

Tabla 24. Valores característicos de la temperatura. Cuenca Río Grande de Arecibo (1949-2006)

	Media °C	Desv. Est. °C	Mínimo °C	Máximo °C	Variabilidad (%)
Anual	25.3	0.5	24.2	26.3	1.9
Enero	23.4	0.7	21.6	25.1	3.0
Febrero	23.3	0.8	20.9	25.1	3.3
Marzo	23.8	0.9	19.8	25.4	3.8
Abril	24.6	0.8	21.6	26.2	3.1
Mayo	25.7	0.6	24.3	27.4	2.4
Junio	26.6	0.5	25.4	27.5	1.7
Julio	26.8	0.5	25.3	27.6	1.8
Agosto	27.0	0.5	25.6	27.7	1.8
Septiembre	26.7	0.5	24.6	27.5	2.0
Octubre	26.2	0.5	24.4	27.0	2.1
Noviembre	25.3	0.6	24.0	26.8	2.3
Diciembre	24.1	0.7	22.2	25.4	2.9

6.2.2 Temperatura: Cuenca del Río Grande de Manatí.

La temperatura en esta cuenca muestra el mismo comportamiento que la anterior. La temperatura media en los 51 años de serie es de 25.4°C. Los meses más frescos se dan de enero a marzo, aumentando la temperatura progresivamente a partir de abril hasta alcanzar su pico máximo en agosto con 26.9°C de media (Fig. 75). El mes menos cálido es febrero, con una media de 23.5°C.

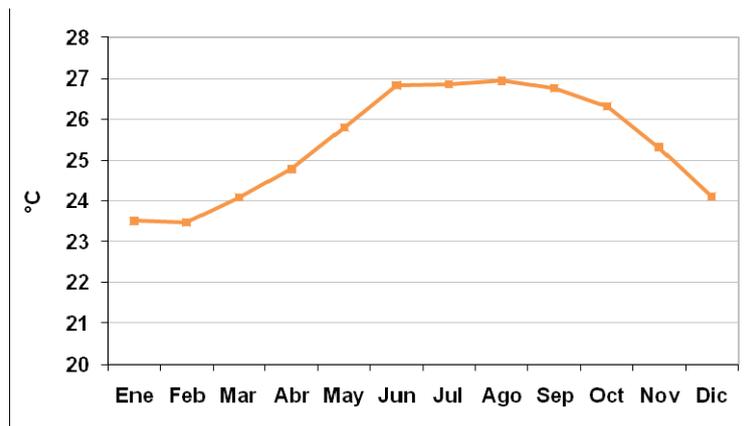


Figura 75. Temperatura media mensual. Estación Manatí. Cuenca Río Grande de Manatí (1956-2006)

La temperatura máxima mensual de esta estación se registró en el mes de junio de 1980 con una media de 28.1°C. La mínima de las temperaturas medias mensuales fue de 21.8°C en 1979 en el mes de febrero. La variabilidad de la temperatura es de solo el 1.2% (Tabla 25). El coeficiente de variación más alto se da en el mes de marzo con un 2.8% y el más bajo se presenta en el mes de septiembre.

Tabla 25. Valores característicos de la temperatura. Cuenca Río Grande de Manatí (1956-2006)

	Temperatura Media °C	Desv. Est. °C	Mínimo °C	Máximo °C	Variabilidad (%)
Anual	25.4	0.3	24.7	26.0	1.2
Enero	23.5	0.5	22.3	24.5	2.2
Febrero	23.5	0.6	21.8	24.6	2.6
Marzo	24.1	0.7	22.6	25.9	2.8
Abril	24.8	0.6	23.3	26.5	2.4
Mayo	25.8	0.6	24.5	26.9	2.2
Junio	26.8	0.5	25.9	28.1	1.9
Julio	26.9	0.4	26.0	27.9	1.5
Agosto	26.9	0.4	25.5	27.7	1.6
Septiembre	26.8	0.3	26.0	27.6	1.2
Octubre	26.3	0.4	25.3	27.2	1.6
Noviembre	25.3	0.5	24.5	26.4	1.8
Diciembre	24.1	0.6	22.7	25.6	2.5

6.2.3 Temperatura: Cuenca del Río Culebrinas

La temperatura media en la cuenca del Culebrinas en los últimos 60 años es de 25 °C. Aunque la temperatura no suele fluctuar mucho entre las distintas estaciones del año (Fig. 76), los meses más calientes se observan de junio a octubre con temperaturas que superan los 26 °C y alcanzando su pico máximo en el mes de agosto. Pasado octubre, las temperaturas muestran una ligera disminución siendo más frescas en los meses de enero y febrero (24°C).

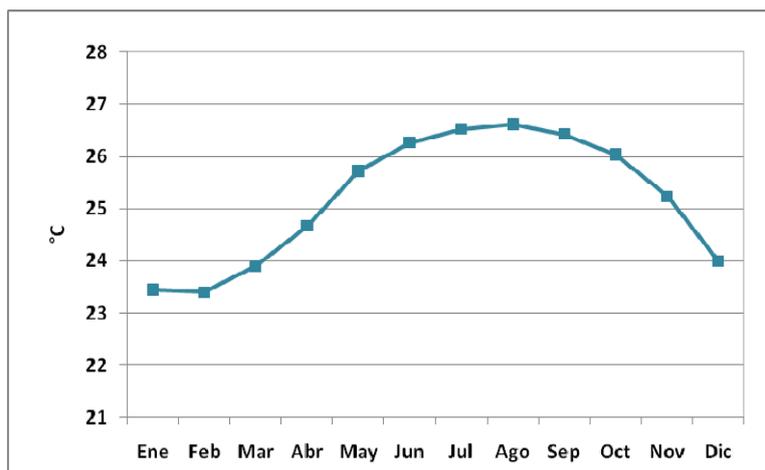


Figura 76. Temperatura media mensual. Estación Coloso. Cuenca Río Culebrinas (1948-2007).

Aunque la temperatura ha mostrado un coeficiente de variación más alto que en las estaciones anteriores, la variabilidad (tabla 26) aún es muy baja (<4%) como es de esperarse. La temperatura media máxima mensual se observó en el mes de agosto en el año 2007 con 31 °C mientras que la mínima mensual se obtuvo en diciembre de 1996 con 19 °C. El coeficiente de variación más alto se da en los meses de febrero y marzo y apenas alcanzan el 4%. El mes de junio es el que menos variabilidad ha mostrado (<2.7%).

Tabla 26. Valores Característicos de la temperatura. Cuenca Río Culebrinas (1948-2007)

	Temperatura Media °C	Desv. Est. °C	Mínimo °C	Máximo °C	Variabilidad (%)
Anual	25.2	0.57	23.9	26.8	2.3
Enero	23.4	0.85	20.4	25.6	3.6
Febrero	23.4	0.92	21.0	25.2	3.9
Marzo	23.9	0.92	22.1	27.8	3.9
Abril	24.7	0.74	23.2	26.6	3.0
Mayo	25.7	0.69	24.1	27.2	2.7
Junio	26.3	0.69	23.9	27.4	2.6
Julio	26.5	0.89	23.3	30.0	3.4
Agosto	26.6	0.94	24.0	30.6	3.5
Septiembre	26.4	0.81	23.1	28.1	3.1
Octubre	26.0	0.69	24.3	27.4	2.7
Noviembre	25.2	0.75	23.2	26.8	3.0
Diciembre	23.9	0.83	20.0	25.5	3.5

6.2.4 Temperatura: Cuenca del Río Fajardo

La cuenca del río Fajardo tiene la peculiaridad de contar con dos estaciones meteorológicas que registran temperaturas en su territorio (Fajardo y Pico del Este). Dado a las pocas estaciones con datos de temperatura, los resultados de la representatividad de los Polígonos de Thiessen no son muy seguros. Por tal razón, la temperatura se analiza con cada estación individualmente.

Afortunadamente, una de las estaciones se ubica en la llanura de la cuenca (Fajardo 7 metros s.n.m.m) mientras que la otra se ubica en el área montañosa (Pico del Este 1051

metros s.n.m.m). La temperatura media en la estación de Fajardo es de las más altas en toda la isla (26 °C) y la temperatura media en Pico del Este es de las más bajas (18 °C). Fajardo muestra un comportamiento similar a las demás estaciones. La temperatura más fresca la observamos en los meses de diciembre, enero y febrero (Fig. 77). Luego le sigue un ligero aumento en el mes de marzo hasta julio y agosto, siendo los meses más calurosos del año.

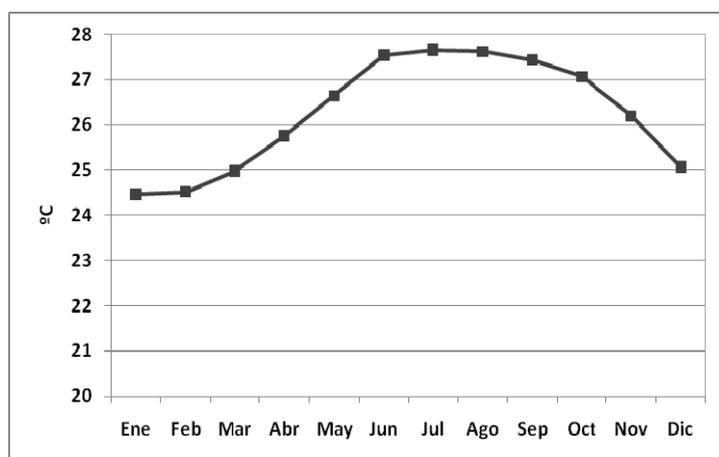


Figura 77. Temperatura media mensual. Estación Fajardo. Cuenca Río Fajardo (1948-1995).

La variabilidad, al igual que todas las estaciones de temperatura en la isla, es muy baja y se mantiene por debajo del 3%. El mes que menos variabilidad presenta es septiembre (1.4%), mientras que enero, el más fresco en esta estación, muestra el CV más alto relativamente (2.9%). La temperatura mensual más elevada la presentan los meses de julio y agosto (tabla 27), sin embargo fue junio en 1994 el que mostró la temperatura mensual media máxima con 29 °C.

Tabla 27. Valores Característicos de la temperatura. Cuenca Río Fajardo (1948-1995)

	Temperatura Media °C	Desv. Est. °C	Mínimo °C	Máximo °C	Variabilidad (%)
Anual	26.2	0.4	25.5	27.1	1.5
Enero	24.5	0.7	22.0	26.0	2.9
Febrero	24.5	0.6	23.0	26.4	2.6
Marzo	25.0	0.7	23.2	26.5	2.8
Abril	25.8	0.7	23.8	27.0	2.8
Mayo	26.6	0.7	25.0	28.9	2.8
Junio	27.5	0.6	26.3	29.2	2.1
Julio	27.7	0.5	26.0	28.8	1.7
Agosto	27.6	0.5	25.7	28.7	1.9
Septiembre	27.4	0.4	26.2	28.3	1.4
Octubre	27.1	0.4	26.2	28.0	1.6
Noviembre	26.2	0.6	24.6	27.7	2.5
Diciembre	25.1	0.7	23.0	26.9	2.8

La estación Pico del Este registra la temperatura media más fresca en toda la isla y además rompe con los esquemas anteriores. Los meses más frescos van de diciembre a febrero seguido por un leve aumento en marzo y abril, curiosamente mostrando un pico

inverso en el mes de mayo (Fig. 78). Dicha estación se encuentra ubicada en el Bosque Pluvial Tropical, El Yunque. Por tal razón, este comportamiento anual responde a la cantidad de agua que recibe la estación y especialmente en el mes de mayo, siendo uno de los meses que más precipitación recibe con 460 mm, sólo superado por el mes de noviembre con 500 mm.

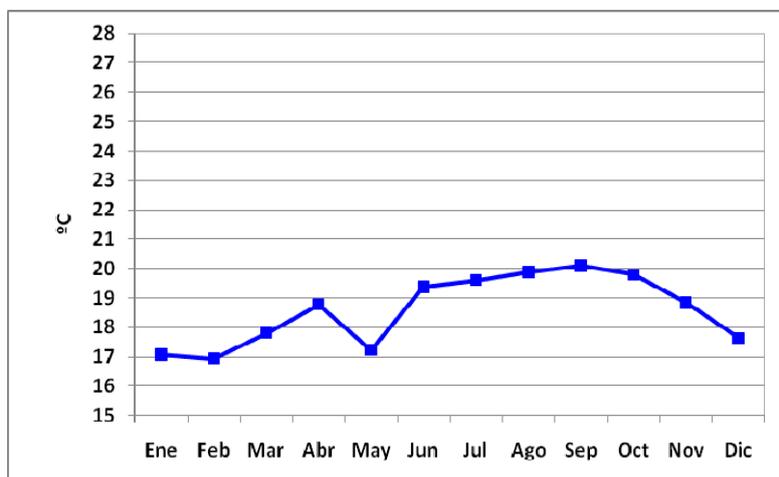


Figura 78. Temperatura media mensual. Estación Pico del Este. Cuenca Río Fajardo (1970-2004).

La temperatura media mensual más cálida se observó en el mes de septiembre con 20 °C, mientras que la mínima mensual se registró en el mes de febrero (tabla 28). La temperatura máxima mensual se observó en el mes de octubre para el año 1980 con 21 °C mientras que la mínima mensual la presentó el mes de enero en el 1975 con 15 °C. Como todas las demás estaciones el coeficiente de variación es bajo, alcanzando solo el 4.7% en el mes de enero.

Tabla 28. Valores Característicos de la temperatura. Cuenca Río Fajardo (Pico del Este 1970-2004)

	Temperatura Media °C	Desv. Est. °C	Mínimo °C	Máximo °C	Variabilidad (%)
Anual	18.6	0.5	17.7	19.6	2.4
Enero	17.1	0.8	15.6	18.7	4.7
Febrero	16.9	0.7	15.8	18.3	4.0
Marzo	17.8	0.7	16.5	19.2	3.9
Abril	18.8	0.7	17.7	21.0	3.9
Mayo	17.2	0.8	15.7	19.5	4.8
Junio	19.4	0.7	16.7	20.8	3.6
Julio	19.6	0.8	16.0	20.7	3.9
Agosto	19.9	0.8	15.9	21.0	4.0
Septiembre	20.1	0.4	18.9	21.0	2.2
Octubre	19.8	0.5	18.8	21.2	2.5
Noviembre	18.8	0.6	17.4	20.1	3.0
Diciembre	17.6	0.8	15.9	18.8	4.3

6.3 Características Climáticas. Evapotranspiración Potencial (ETP)

Utilizando el método Thornthwaite, se obtuvo los valores de la Evapotranspiración Potencial (ETP) mensual y anual. Debido a que la variable principal que utiliza este método es la temperatura, solo se utilizaron las 16 estaciones que contaban con dicho registro climático.

La ETP media anual para toda la isla es de 1048 mm, llegando a alcanzar un 60% de la salida del agua que precipita en el territorio. Los valores más elevados de ETP han sido localizados en las zonas costeras de la isla (Fig. 79). Resaltan valores alcanzados en las estaciones de San Juan (1145 mm), Ponce (1126 mm) y Fajardo (1121 mm) donde la evapotranspiración potencial excede los 1100 mm anuales.

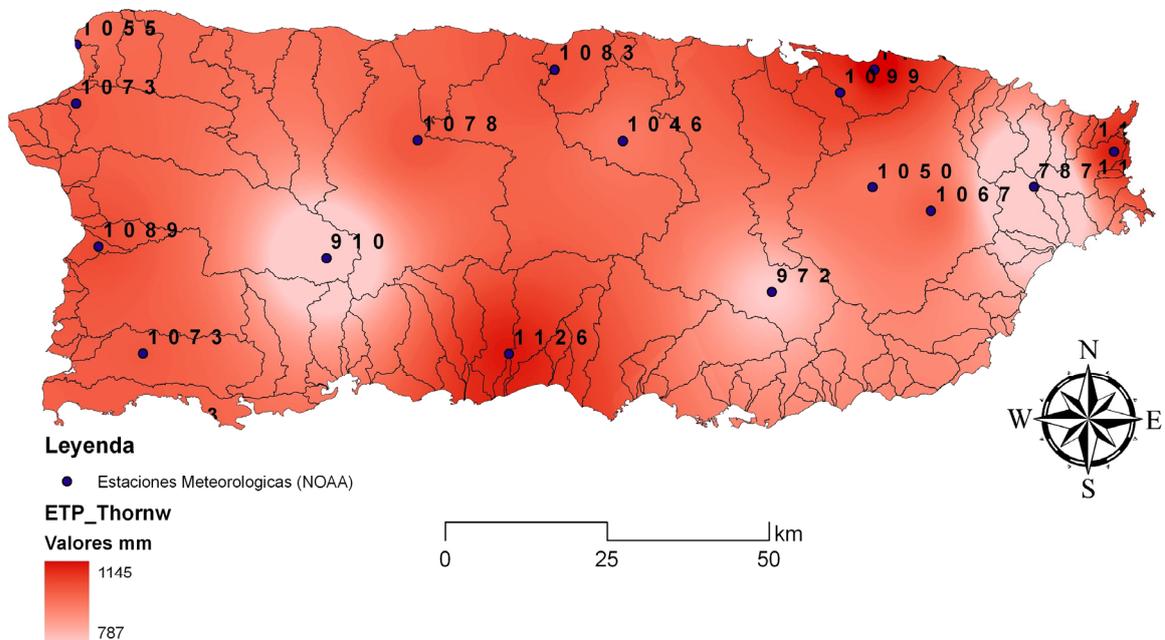


Figura 79. Evapotranspiración Potencial (ETP) anual (mm). Isla de Puerto Rico

Mientras, en las estaciones del interior (Pico del Este, 786 mm; Adjuntas Substation, 910 mm y Cayey, 972 mm) la ETP se mantiene por debajo de 1000 mm anuales. Los valores de la ETP calculados para la estaciones de las costas son relativamente altos cuando se comparan con la cantidad de lluvia anual que se ha registrado en las mismas (Fig. 80). Por otro lado, en las estaciones del interior ocurre todo lo contrario, la ETP es poco significativa cuando se compara a la elevada precipitación anual que reciben las mismas. Ejemplo de ello son la estación costera de San Juan WSFO donde la ETP puede representar un 83% de la salida del agua que precipita y en Pico del Este (estación del interior) sólo representa un 18% (tabla 29).

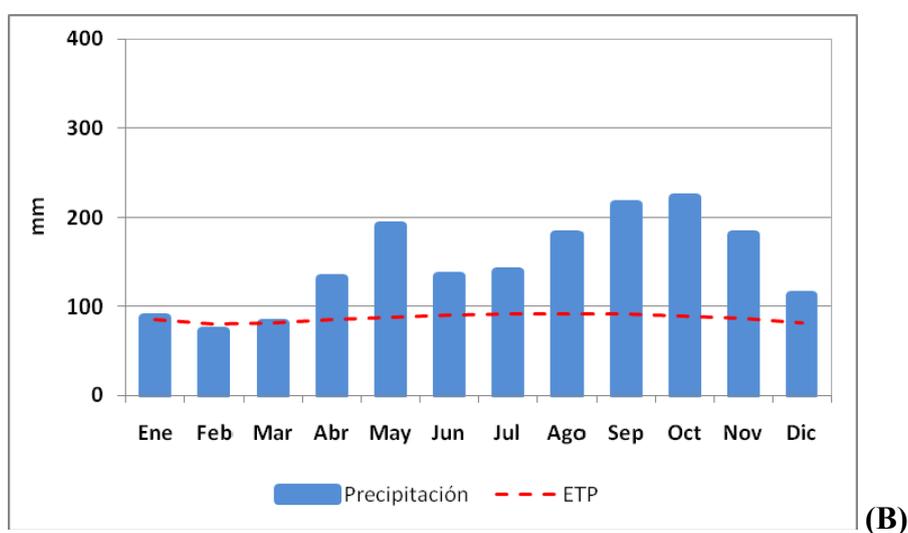
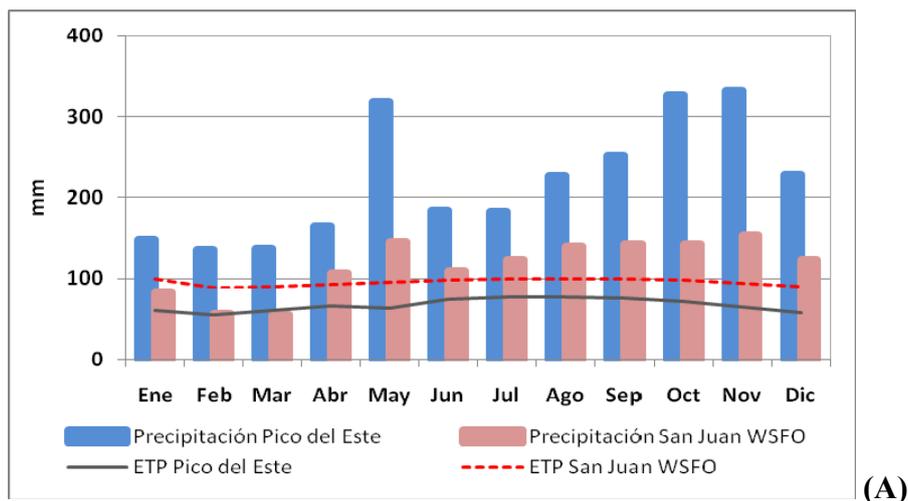


Figura 80. Precipitación media mensual (mm) y evapotranspiración potencial (mm) mensual. A) Estación Pico del Este y San Juan WSFO, B) Promedio de la isla.

Tabla 29. Precipitación media mensual (mm) y evapotranspiración potencial (mm) mensual.

Meses	ETP San Juan WSFO	Precipitación Media Mensual San Juan WSFO	ETP Pico del Este	Precipitación Media Mensual Pico del Este	Precipitación Media ISLA	ETP ISLA
Enero	100	82	60	308	88	86
Febrero	88	56	60	258	72	80
Marzo	90	55	63	256	81	82
Abril	93	106	66	310	132	85
Mayo	96	145	61	461	191	88
Junio	99	109	68	324	134	91
Julio	99	122	69	326	139	91
Agosto	99	139	70	378	180	92
Septiembre	99	142	71	390	213	91
Octubre	98	143	70	443	221	90
Noviembre	94	153	66	501	180	86
Diciembre	90	122	62	386	112	82

6.3.1 ETP. Cuenca Río Grande de Arecibo

Aunque se observa cierta diferencia en cuanto a la cantidad de agua susceptible a evapotranspirarse entre las dos estaciones (tabla 30), el comportamiento es idéntico. Ello se debe a la ubicación y elevación de cada estación. La estación de Dos Bocas se encuentra más cercana a la costa donde las temperaturas son más elevadas, mientras Adjuntas Substation se ubica en la Cordillera Central.

Los valores más altos de ETP se pueden ver en los meses de julio y agosto y los valores mínimos se observan en los meses de enero y febrero (Fig. 81). Se aprecia que la ETP muestra valores más altos que la precipitación en 3 de los 12 meses del año (solo en la estación de Dos Bocas), superada la ETP con gran diferencia en los meses que más precipitación registran en la cuenca, mayo, septiembre y octubre (Fig. 82).

Tabla 30. Evapotranspiración Potencial mensual y anual. Cuenca Río Grande de Arecibo

Meses	ETP mm Adjuntas Substation	ETP mm Dos Bocas
Anual	923.4	1461.7
Enero	63.4	76.5
Febrero	65.9	81.8
Marzo	70.4	94.9
Abril	77.5	115.6
Mayo	84.9	143.8
Junio	89.8	166.5
Julio	89.2	168.5
Agosto	86.9	162.6
Septiembre	82.1	143.3
Octubre	77.6	125.0
Noviembre	70.9	101.1
Diciembre	64.9	82.2

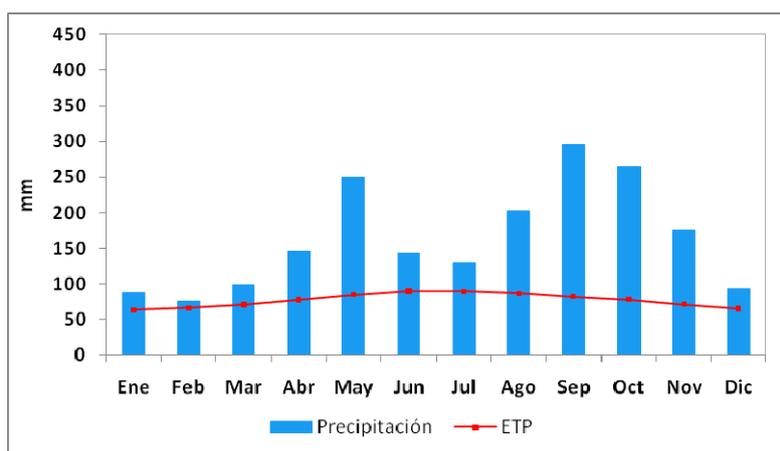


Figura 81. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual en Adjuntas Substation.

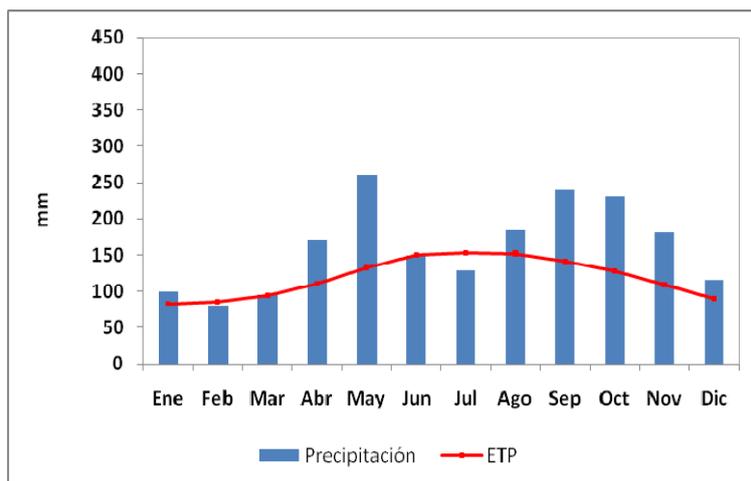


Figura 82. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual en Dos Bocas.

6.3.2 ETP. Cuenca Río Grande de Manatí

En esta cuenca los valores más altos de ETP se observan en junio y julio y los valores mínimos se observan en los meses de enero y febrero (tabla 31). No obstante, la ETP supera a la precipitación en 5 de los 12 meses del año (febrero, marzo, junio, julio, agosto y septiembre), superada sólo con cierta diferencia en los meses de enero, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre (Fig. 83).

Tabla 31. Evapotranspiración Potencial mensual y anual. Cuenca Río Grande de Manatí

Meses	ETP mm
Anual	1477.3
Enero	77.1
Febrero	83.0
Marzo	97.8
Abril	118.2
Mayo	145.2
Junio	171.7
Julio	169.3
Agosto	161.6
Septiembre	143.9
Octubre	126.6
Noviembre	100.7
Diciembre	82.1

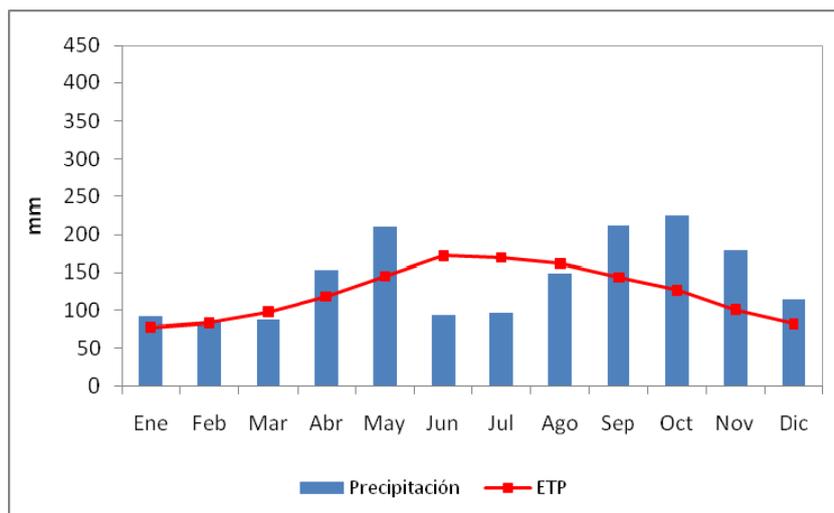


Figura 83. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual en la estación de Manatí.

6.3.3 ETP. Cuenca Río Culebrinas

La ETP en esta área casi no alcanza a superar a la precipitación, exceptuando sólo dos meses (enero y febrero) donde la evaporación aparenta ser más elevada. Como en las demás cuencas, en ésta los valores de evapotranspiración más elevados se observan en junio y julio y los valores mínimos en enero y febrero (tabla 32). Sin embargo, en el resto del año la ETP es muy poco significativa respecto a la precipitación mensual y anual en esta cuenca (Fig. 84 y 85).

Tabla 32. Evapotranspiración Potencial mensual y anual. Cuenca Río Culebrinas

Meses	ETP mm Isabela	ETP mm Coloso
Anual	1069.5	1073.3
Enero	79.6	89.2
Febrero	78.0	82.6
Marzo	83.2	84.4
Abril	89.9	87.1
Mayo	96.6	90.8
Junio	100.9	92.7
Julio	101.1	93.6
Agosto	99.1	94.0
Septiembre	94.0	93.3
Octubre	89.2	91.9
Noviembre	81.7	89.1
Diciembre	76.3	84.7

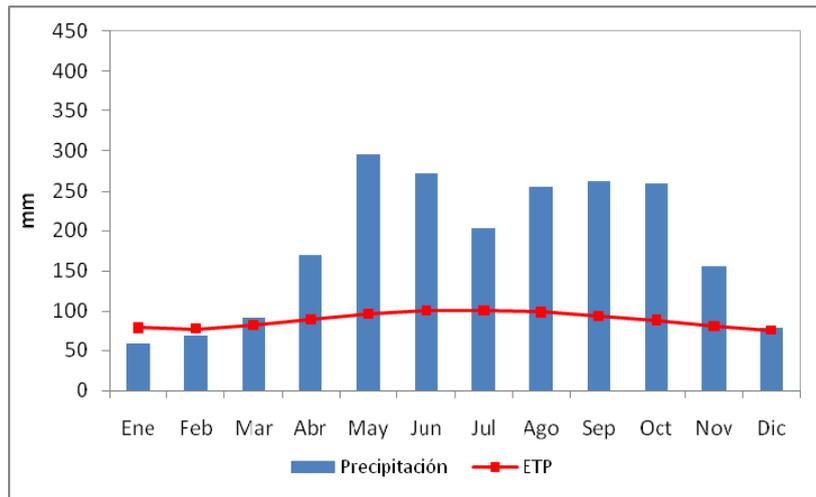


Figura 84. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual. Estación de Isabela.

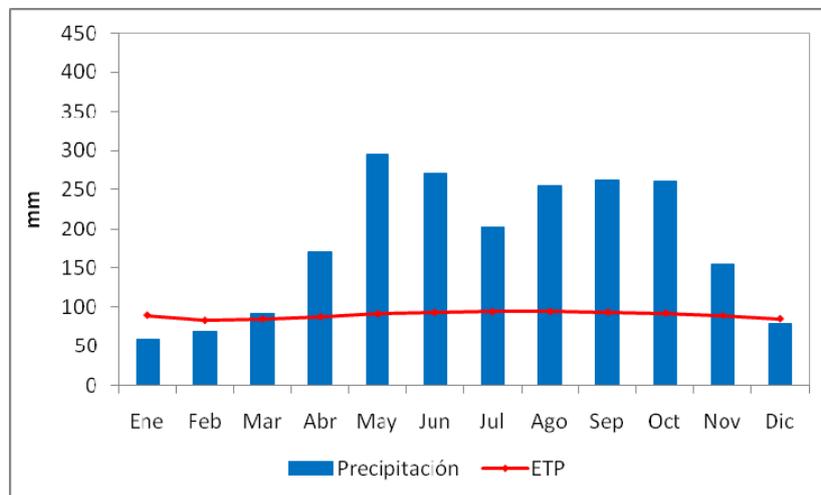


Figura 85. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual. Estación de Coloso.

6.3.4 ETP. Cuenca Río Fajardo

Existe una diferencia entre las dos estaciones de esta cuenca de casi 400 mm en cuanto a la cantidad anual de agua que es susceptible a evaporarse (tabla 33). Dado a sus distintas localizaciones, una en la montaña (Pico del Este) y la otra en la costa (Fajardo) han registrado distintas temperaturas, variable clave para la calcular la ETP con el método Thornwaite. Los valores de evapotranspiración más elevados se observan en los meses de junio y julio y los valores mínimos se observan en enero y febrero (Fig. 86 y 87). Sin embargo, en esta cuenca la ETP no alcanza a superar a la precipitación en ningún mes del año, comparada con la precipitación mensual.

Tabla 33. Evapotranspiración Potencial mensual y anual. Cuenca Río Fajardo

Meses	ETP mm Fajardo	ETP mm Pico del Este
Anual	1136.3	804.2
Enero	88.6	60.0
Febrero	83.1	55.0
Marzo	88.2	60.3
Abril	95.5	66.3
Mayo	102.5	63.9
Junio	107.9	74.6
Julio	107.4	76.8
Agosto	104.3	77.2
Septiembre	98.8	75.9
Octubre	93.6	71.3
Noviembre	86.0	65.2
Diciembre	80.5	57.9

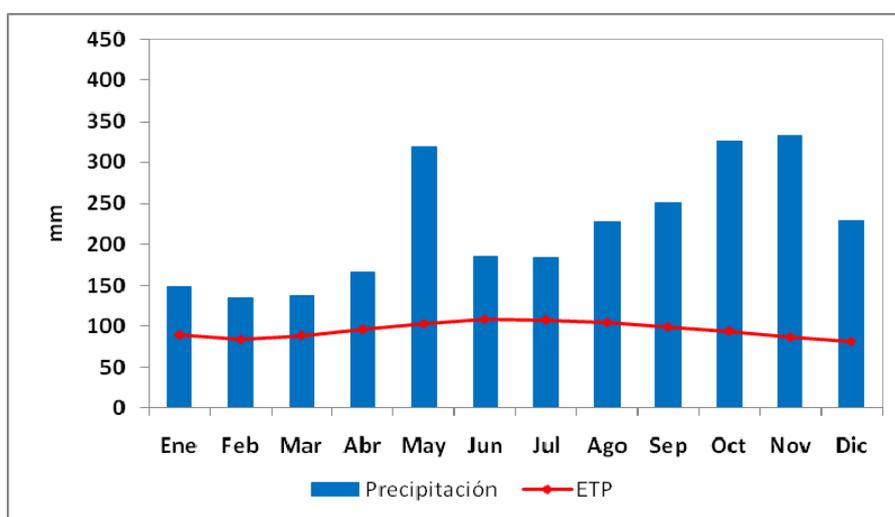


Figura 86. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual. Estación de Fajardo

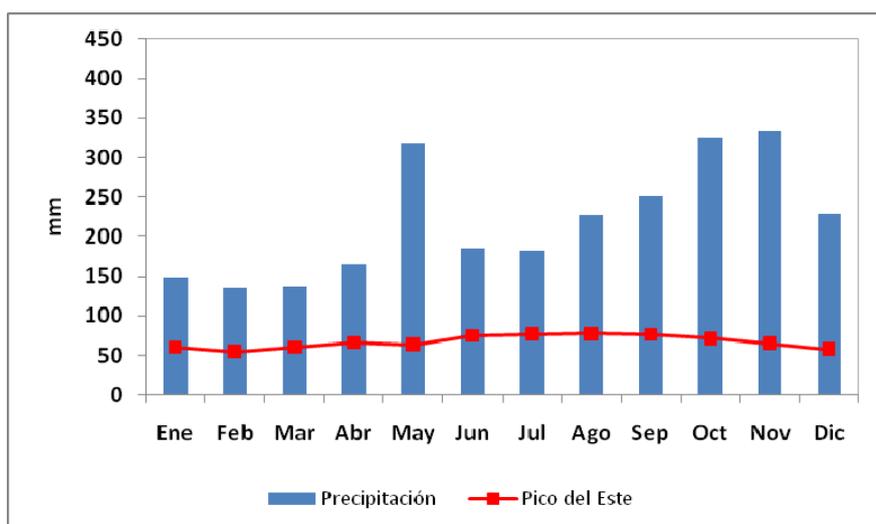


Figura 87. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual. Estación Pico del Este.

7. ANÁLISIS DE TENDENCIAS CLIMÁTICAS EN PUERTO RICO



Municipio de Manatí, PUERTO RICO

7. ANÁLISIS DE TENDENCIAS CLIMÁTICAS EN PUERTO RICO

7.1 Tendencias de la Precipitación anual en Puerto Rico

De las 36 estaciones utilizadas en el análisis de precipitación, 17 de ellas muestran valores negativos con los resultados del análisis de correlación Rho Spearman (r_s) entre la precipitación anual y el tiempo. No obstante, la mayoría de estos valores son muy cercanos a cero y carentes de significación estadística, siendo la estación Mayagüez City la única que ha obtenido un coeficiente de correlación regresivo ($r_s = -0.40$) significativo al nivel de 0.05 (tabla 34). Otras 19 estaciones mostraron valores positivos con la precipitación total anual, aunque solamente dos alcanzaron resultados significativos al nivel de 0.05 (Negro-Corozal $r_s = 0.40$ y Ponce $r_s = 0.30$).

La prueba no paramétrica de MK ha confirmado las tendencias reflejadas en el análisis de Rho Spearman y también nos ha permitido discriminar aquellas estaciones que manifestaban cierta incertidumbre dado los valores obtenidos de r_s . Valores positivos de MK indican un aumento de las precipitaciones en el tiempo y, por el contrario, valores negativos indican una disminución de las precipitaciones. Se ha utilizado un nivel de confianza de 0.05, como es común en mucho de los trabajos que utilizan este estadístico para el análisis de tendencias cuyo valor crítico de $|Z| = 1.645$ (EPA, 2006, Cruz Báez, 2006).

De las 17 estaciones que mostraron tendencias regresivas con Rho Spearman, se confirman 12 con valores de $Z > 1.645$, lo cual nos permite rechazar la hipótesis nula de no tendencia para cada una de ellas. Las otras 5 estaciones obtuvieron valores de $Z < 1.645$. Entre las 19 estaciones que mostraron aumento en la precipitación con el análisis de Rho Spearman, se corroboran 14 estaciones con la prueba de Mann-Kendall donde se obtienen valores de $Z > 1.645$. En las otras 5 estaciones no fue posible establecer una tendencia debido a los valores obtenidos de Z .

Vale señalar las diferencias que se observan en cuanto a las tendencias en algunas estaciones tan próximas como Adjuntas 1NW con Adjuntas Substation (7 km) y Pico del Este con Paraíso (4 km). Aunque se trata de distancias muy cortas y características climáticas y topográficas similares, aún así han mostrado tendencias distintas. No obstante, hay que tener en consideración que se trata de periodos de tiempo muy distintos como se explicó en el apartado 4. Adjuntas 1NW cubre un periodo de tiempo de 52 años (1955-2006) y Adjuntas Substation cubre otro de 37 años (1970-2006) con 15 años de diferencia. De igual forma la estación de Pico del Este registró datos entre 1970-2004 mientras la estación de Paraíso cubre fechas de 1956-2007, existiendo una diferencia de 17 años de datos entre ambas estaciones.

Tabla 34. Coeficiente de Correlación (r_s) entre el tiempo y la precipitación anual. Análisis de Mann-Kendall para la precipitación total anual por estación para todo Puerto Rico.

ESTACIONES (años)	Rho de Spearman	Significación Estadística	S de (MK)	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Adjuntas 1NW (52)	-0.02	N	-40	-2.31	Si (0.0104)
Adjuntas Substation (37)	0.32	N	136	12.71	Si (0.0001)
Aceituna (51)	-0.15	N	-121	-6.79	Si (0.0001)
Cayey (45)	0.02	N	18	1.11	No
Coloso (60)	-0.12	N	-150	-7.76	Si (0.0001)
Corral Viejo (37)	0.29	N	131	11.56	Si (0.0001)
Cerro Maravilla (37)	0.28	N	122	9.59	Si (0.0001)
Corozal Substation (52)	-0.06	N	-52	-4.61	Si (0.0001)
Dorado 2WNW (58)	-0.20	N	-253	-13.36	Si (0.0001)
Dos Bocas (58)	-0.04	N	-51	-2.67	Si (0.0038)
Ensenada 1NW(53)	0.23	N	215	12.20	Si (0.0001)
Fajardo (48)	-0.03	N	-52	-3.72	Si (0.0001)
Guajataca Dam (52)	0.05	N	24	1.30	No
Guayama 2E (60)	-0.02	N	-12	-0.53	No
Gurabo Substation (51)	0.11	N	79	4.57	Si (0.0001)
Isabela Substation (58)	-0.04	N	-44	-2.33	Si (0.0099)
Jajome Alto (53)	-0.08	N	-66	-3.55	Si (0.00019)
Juncos 1SE (60)	0.03	N	14	0.72	No
Lajas Substation (60)	0.06	N	68	4.06	Si (0.0001)
Manatí (50)	-0.10	N	-101	-9.75	Si (0.0001)
Mayaguez City (59)	-0.40	*	-446	-27.02	Si (0.0001)
Montebello (32)	-0.06	N	-16	-1.33	No
Mora Camp (53)	-0.05	N	-36	-1.58	No
Morovis 1N (49)	0.003	N	-8	-0.43	No
Negro Corozal (32)	0.40	**	130	12.88	Si (0.0001)
Paraiso (52)	0.12	N	114	6.53	Si (0.0001)
Peñuelas (32)	0.21	N	76	6.72	Si (0.0001)
Pico del Este (35)	-0.06	N	-17	-1.41	No
Ponce (53)	0.31	*	300	15.27	Si (0.0001)
Río Piedras (45)	0.02	N	34	2.10	Si (0.01786)
San Juan WSFO (52)	0.01	N	0	0.11	No
San Lorenzo (39)	-0.02	N	-13	-0.90	No
San Sebastián (41)	-0.13	N	-74	-4.61	Si (0.0001)
Santa Isabel (53)	0.17	N	172	8.63	Si (0.0001)
Santa Rita (53)	0.14	N	134	7.54	Si (0.0001)
Trujillo Alto (38)	0.10	N	39	3.07	Si (0.00017)

N- valores carentes de significación estadística. * Correlación significativa al nivel de 0.05.

** Correlación significativa al nivel de 0.01. $|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia. Valor $p < 0.05$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia

A escala insular, en el territorio se obtuvieron 12 estaciones con tendencias regresivas en ambos análisis estadísticos. Aunque con Rho Spearman no se alcanzaron valores significativos, la variabilidad podría haber influido en los resultados. En otras 14 estaciones se pudo establecer perfectamente una tendencia positiva con la prueba de Mann-Kendall, mientras que con Rho Spearman ninguno alcanzó valores significativos. En las otras 10 estaciones restantes, no se ha podido detectar un comportamiento definido utilizando ambas pruebas, por lo cual no se puede establecer tendencias claras referente a la precipitación total anual a escala insular, ya que muchas estaciones muestran aumento (14 estaciones), otras muestran disminución (12 estaciones) y algunas no reflejan tendencias.

Con estos resultados no se puede afirmar un único patrón para toda la isla, sino que ligeros cambios espaciales en la distribución de la precipitación. Se ha detectado que la región sur, lugar donde se encuentran las zonas más áridas del país con un promedio de 1000 mm de lluvia al año, expresa tendencias positivas con la precipitación total anual. Mientras, la región oeste, que cuenta con un promedio de 1600 mm muestra disminución en la cantidad total de agua que precipita. En las regiones centro-norte y este de la isla, donde la lluvia anual supera los 1800 mm, no se puede descifrar un patrón claro de lo que ocurre con la precipitación. De esta manera es destacable observar que en la región de sotavento las tendencias de la precipitación son positivas (Fig. 88).

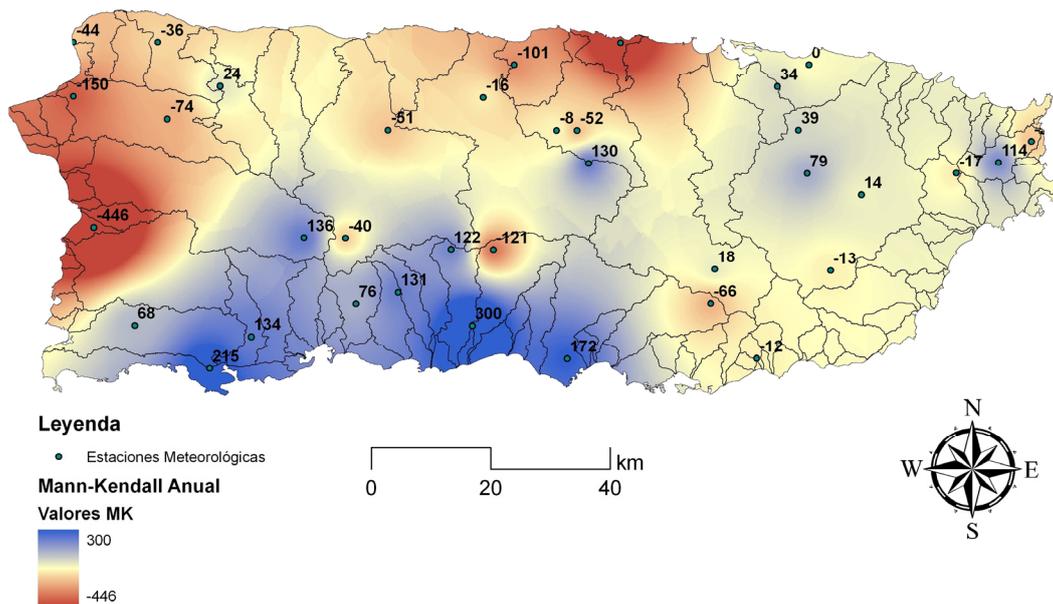


Figura 88. Tendencias de la precipitación total anual con Mann-Kendall.

La versión secuencial del estadístico Mann-Kendall (MKS) nos permite identificar con precisión, en cada estación, el comienzo de las tendencias detectadas (positivas o negativas). De todas las estaciones analizadas, con MKS se ha podido identificar el año de inicio en 5 de ellas. Entre las 14 estaciones que mostraban aumento en la precipitación anual, se pudo detectar el comienzo en 3, aunque muy pocas alcanzaron a ser significativas.

Las estaciones Ensenada, Ponce 4E y Santa Isabel, ubicadas en la región sur de la isla mostraron valores positivos con Rho Spearman y Mann-Kendall. Al aplicar la versión MKS, se identifica el año de comienzo en cada una de ellas (Fig. 89, 90 y 91). La estación Ensenada, mostró el inicio de la tendencia en el año 1967, Santa Isabel en 1980 y Ponce 4E en 1959 con valores significativos a partir del 2000.

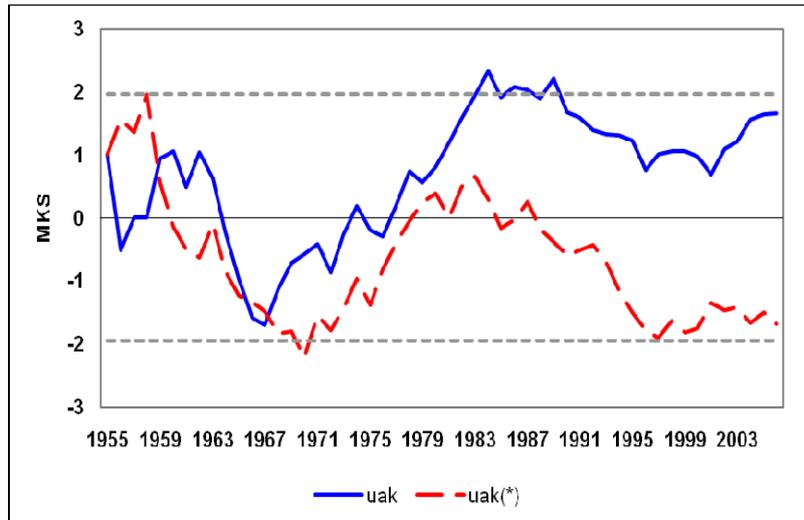


Figura 89. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. Ensenada, comienzo en 1967.

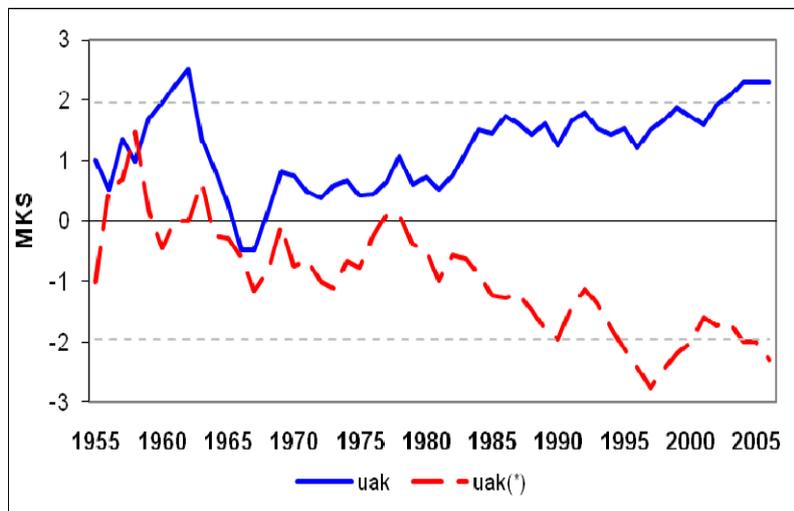


Figura 90. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. Ponce, comienzo 1959.

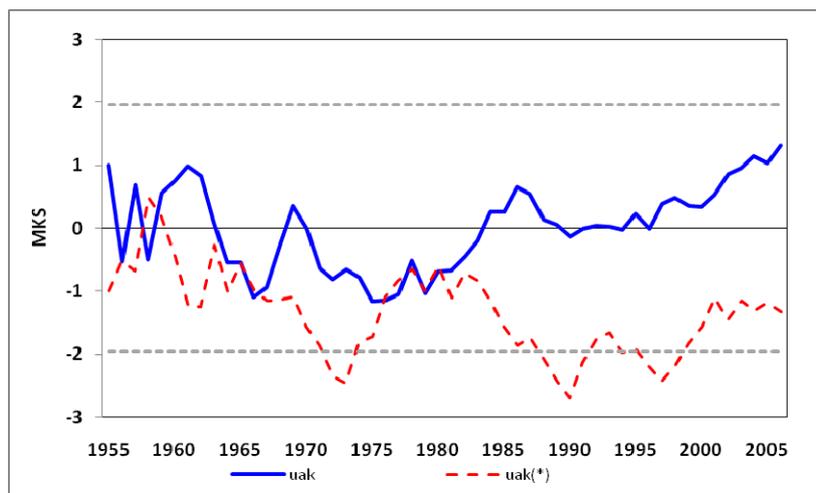


Figura 91. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. Santa Isabel, comienzo 1980.

La estación Mayagüez City, ha destacado en todos los análisis estadísticos de tendencias aplicados. Como se pudo observar anteriormente, tanto con RS, con MK y con la versión secuencial de éste último (MKS) ha expresado resultados que han alcanzado la significancia estadística (Fig. 92). Otra estación que se distingue entre las estaciones con resultados regresivos es la estación Dorado (Fig. 93). En dicha estación sí se pudo rechazar la hipótesis nula de no tendencia con MK y además con el MKS, expresó una disminución acompasada de la precipitación desde 1962.

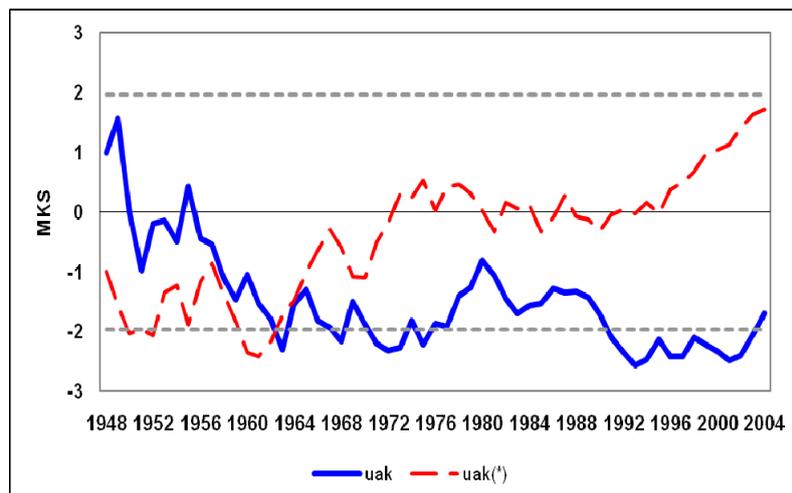


Figura 92. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. Dorado, comienzo 1962.

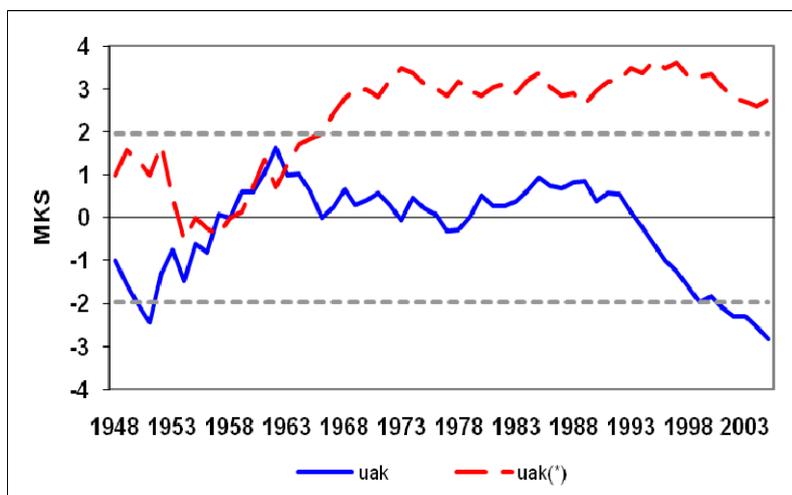


Figura 93. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. Mayagüez, comienzo 1963.

En muchos países se han realizado estudios sobre las tendencias de la precipitación a distintas escalas espaciales y temporales en los cuales se encuentran resultados muy enriquecedores (Molnar y Ramirez, 2001; Ceballos et al. 2004; Martínez-Fernández et al. 2005; Batisani y Yarnal, 2009; Krishnakumar et al. 2009; Lebel y Ali, 2009). Según Canarrozzo et al. (2006) en la isla de Sicilia, Italia han encontrado diferentes tendencias de la precipitación de acuerdo a su ubicación geográfica entre 1921-2000, sin expresar un patrón único de lluvia. Utilizando los Sistemas de Información Geográfica, han extrapolado los resultados de MK de manera que se puede observar espacialmente los

patrones de la misma. Algunas regiones mostraron aumento de la precipitación y otras revelan una disminución. Un gran número de las estaciones que mostraron disminución de la precipitación se ubican en el oeste y suroeste de la isla. Además encontraron que entre 1931-1960 y 1961-1990 hubo tendencias regresivas en ambos períodos. En las islas caribeñas de Trinidad y Tobago entre 1946-1995 se ha observado que la precipitación anual tuvo un incremento desde el inicio de los años 60 hasta mediados de los 80, pasado 1980 la precipitación mostró una disminución (Singh, 1997). Sin embargo, a finales de 1980 y principios de 1990 mostró indicios de aumento.

7.2 Tendencias de la precipitación mensual en Puerto Rico.

Referente a la evolución de los 12 meses del año (estación por estación) a escala de toda la isla, se distinguen los meses de verano (junio, julio y agosto), algunos meses de otoño e invierno (Fig. 94). Los meses de verano han obtenido valores que indican una tendencia a la disminución de la precipitación. Resalta junio donde se confirman la misma evolución regresiva con ambos análisis estadísticos en 27 (75%) de las 36 estaciones.

A partir de septiembre, mes que no refleja una tendencia clara, octubre y noviembre han destacado con 22 (61%) estaciones donde muestran un ligero aumento de la precipitación. En estos mismos meses, otras 14 estaciones manifestaron tendencias regresivas (tabla 35 y 36). Por el contrario, el mes de diciembre tiende a expresar una disminución de la precipitación en 22 estaciones con ambos análisis, no siguiendo el mismo patrón en los meses de enero, febrero y marzo donde predominan las estaciones con tendencias positivas, enfatizando en febrero con 27 estaciones. Como se puede observar en la figura 94, los meses de primavera (en especial abril y mayo) y los meses de otoño (septiembre y octubre), no manifiestan tendencias claras a escala de toda la isla.

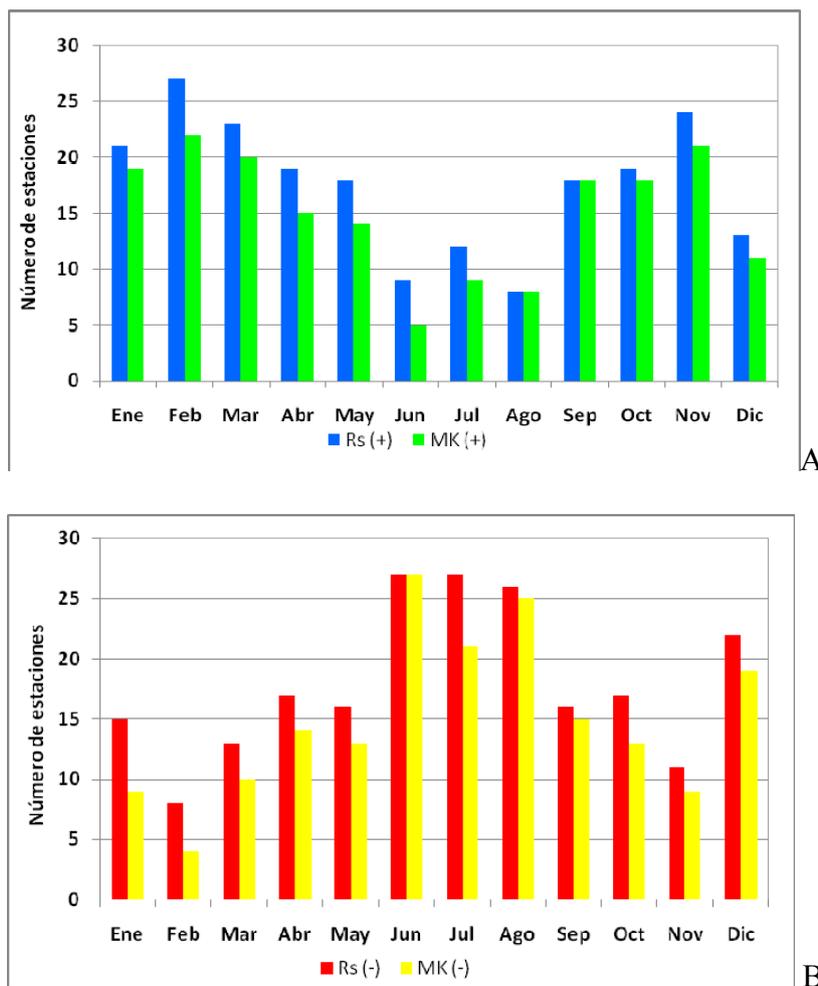


Figura 94. Número de estaciones donde se confirman las tendencias anuales mes a mes. A) Estaciones con meses positivos. Azul, Rho Spearman y Verde, Mann-Kendall. B) Estaciones con meses negativos. Rojo Rho Spearman, y Amarillo, Mann-Kendall

Aunque no se pudo establecer un patrón espacial con las tendencias estacionales, estos resultados parecen indicar un ligero cambio en el comportamiento anual de la precipitación y podrían explicar las evoluciones regionales que se detectaron. En los meses más secos de la isla (diciembre, enero, febrero y marzo), que normalmente contribuyen con un 20-30% de la lluvia anual, se ha evidenciado un incremento, más sin embargo los meses más húmedos (mayo, septiembre y octubre) no muestran un patrón claro ni significativo.

Tabla 35. Coeficiente de Correlación (r_s) anual para cada uno de los 12 meses.

ESTACIONES	Ene.	Feb.	Mar	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Adjuntas INW	0.12	0.04	0.07	-0.06	0.12	-0.15	-0.23	-0.26	0.11	0.02	-0.12	-0.08
Adjuntas Substation	-0.17	-0.04	0.11	0.23	-0.36	0.13	-0.04	0.17	0.16	-0.12	0.15	0.08
Aceituna	0.004	0.06	0.25	-0.01	-0.01	-0.19	-0.24	-0.19	-0.10	-0.02	-0.21	-0.10
Cayey	0.06	0.11	0.05	-0.33	-0.24	-0.31	0.02	-0.25	0.22	-0.11	0.11	-0.02
Coloso	-0.11	0.12	0.15	-0.02	-0.06	-0.25	-0.31	-0.13	-0.08	0.17	-0.07	0.08
Corral Viejo	0.03	-0.02	0.11	0.44	0.03	0.18	-0.04	0.31	0.18	0.14	-0.11	0.12
Cerro Maravilla	0.09	0.07	0.32	0.32	0.11	0.03	-0.02	0.40	0.00	0.08	-0.08	-0.15
Corozal	-0.01	-0.10	-0.20	-0.03	0.07	-0.08	-0.07	-0.13	0.18	-0.02	0.09	-0.15
Dorado	-0.03	0.05	-0.22	-0.17	-0.05	-0.24	-0.21	-0.22	-0.03	0.14	0.18	-0.15
Dos Bocas	-0.23	0.03	0.01	-0.05	0.03	-0.07	-0.20	-0.07	0.08	0.07	0.06	-0.19
Ensenada	0.11	0.07	0.31	0.07	0.07	-0.12	-0.05	-0.13	-0.12	0.17	-0.01	0.05
Fajardo	-0.04	0.28	0.15	-0.12	-0.01	-0.06	-0.15	-0.28	-0.18	-0.09	0.17	0.01
Guajataba Dam	0.07	0.04	-0.12	0.06	0.28	-0.24	0.01	0.05	0.04	-0.03	0.07	-0.21
Guayama	0.23	0.01	0.37	-0.12	0.10	-0.24	-0.11	-0.14	-0.10	-0.15	0.01	0.12
Gurabo	0.21	0.22	0.15	0.10	-0.10	-0.21	-0.03	-0.13	-0.11	0.20	0.10	-0.04
Isabela Substation	-0.11	-0.15	-0.11	-0.06	0.07	-0.11	0.11	0.00	-0.10	0.21	0.11	-0.06
Jajome Alto	0.15	-0.01	-0.01	-0.22	-0.24	-0.33	-0.13	-0.26	-0.03	-0.02	0.18	0.05
Juncos	0.16	0.16	0.30	0.09	-0.05	-0.26	-0.02	-0.33	-0.17	-0.02	0.21	0.04
Lajas Substation	0.02	0.14	0.01	0.06	0.12	-0.03	-0.25	-0.23	-0.21	0.20	0.00	-0.20
Manatí	-0.15	-0.01	-0.16	-0.15	-0.04	-0.31	-0.16	-0.05	0.15	0.15	0.07	-0.16
Mayaguez City	-0.30	0.10	0.08	-0.02	-0.25	-0.40	-0.36	-0.28	-0.26	-0.21	-0.36	-0.21
Montebello	-0.01	0.10	-0.19	-0.24	0.17	0.02	0.29	-0.13	-0.04	-0.08	-0.06	-0.16
Mora Camp	-0.03	-0.16	0.01	-0.02	0.12	-0.28	0.22	-0.10	0.06	0.11	0.04	-0.18
Morovis	-0.20	0.09	-0.19	-0.15	0.08	-0.05	-0.11	0.06	0.19	0.08	0.02	-0.10
Negro Corozal	0.37	-0.05	-0.05	0.07	0.02	0.42	0.37	0.09	0.20	0.17	0.33	0.11
Paraiso	0.27	0.09	0.27	0.03	-0.14	-0.06	0.07	-0.12	0.15	0.07	0.16	0.02
Peñuelas	0.10	0.25	0.16	0.42	-0.01	0.06	-0.05	0.34	-0.03	0.14	0.15	0.22
Pico del Este	0.18	0.19	-0.05	0.03	-0.12	0.12	0.10	0.05	-0.19	-0.37	0.19	-0.09
Ponce	0.10	0.19	0.35	0.21	0.13	-0.12	0.16	-0.01	0.12	0.09	0.02	0.06
Río Piedras	0.09	0.26	0.08	0.04	0.02	-0.11	-0.03	-0.11	0.19	-0.08	0.11	-0.22
San Juan WSFO	0.13	0.03	-0.22	0.16	-0.19	-0.20	0.10	-0.10	0.00	-0.05	0.26	0.00
San Lorenzo	0.30	0.09	-0.17	0.03	-0.24	0.04	0.13	-0.14	0.04	-0.16	0.01	-0.03
San Sebastián	-0.20	0.22	0.01	-0.11	0.07	0.01	-0.13	-0.08	-0.13	0.24	-0.18	-0.06
Santa Isabel	-0.07	0.14	0.22	0.01	0.00	-0.17	0.03	0.00	0.04	-0.07	0.19	-0.06
Santa Rita	-0.03	0.02	0.35	0.16	0.00	-0.14	-0.10	-0.26	0.04	0.13	-0.08	0.01
Trujillo Alto	0.30	0.00	0.07	0.29	-0.07	-0.12	-0.02	-0.07	0.09	-0.06	-0.10	-0.25

Valores en **negritas**: Correlación significativa al nivel de 0.05.

Valores en **negritas cursivas**: Correlación significativa al nivel de 0.01.

Tabla 36. Análisis de Mann-Kendall anual para cada uno de los 12 meses

ESTACIONES	Ene.	Feb.	Mar	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Adjuntas INW	7.65	0.45	2.82	-3.01	6.52	-6.04	-12.82	-14.53	5.62	0.70	-5.42	-4.19
Adjuntas Substation	6.77	-1.54	3.41	8.26	11.63	3.85	-1.73	5.04	5.98	-4.72	5.38	3.06
Aceituna	-3.40	4.07	12.60	-1.28	-0.36	-9.90	-13.87	-9.72	-5.41	-1.67	-10.03	-6.06
Cayey	2.29	4.05	2.27	-6.40	-6.10	-6.24	-0.18	-6.05	5.91	-3.31	4.02	-1.50
Coloso	-4.81	7.24	8.57	-0.96	-3.23	-13.30	-19.62	-7.89	-5.71	12.10	-2.93	4.14
Corral Viejo	0.64	-0.82	3.05	18.10	1.08	5.79	-1.11	11.23	4.71	5.60	-3.34	5.10
Cerro Maravilla	1.98	1.81	10.00	10.02	5.45	4.94	-0.79	17.25	1.10	7.08	0.54	-2.32
Corozal	0.64	-4.42	-10.76	-1.50	3.68	-4.10	-3.30	-7.43	9.06	-1.86	4.31	-8.11
Dorado	0.92	7.40	-17.30	-14.47	-6.02	-12.77	-14.83	-18.40	-8.09	10.18	9.37	-9.16
Dos Bocas	-11.87	0.69	1.27	-4.17	1.86	-3.02	-11.19	-4.01	3.96	4.46	3.81	-13.48
Ensenada	7.13	6.11	16.81	2.85	3.42	-6.35	-2.80	-4.91	-7.80	10.33	1.25	3.52
Fajardo	-1.40	12.61	7.31	-5.86	0.32	-2.99	-6.45	-15.74	-9.60	-5.36	8.37	2.10
Guajataca Dam	3.20	0.15	-7.46	3.74	14.86	-17.40	1.63	1.90	1.97	-1.55	2.99	-10.10
Guayama	14.17	0.90	20.74	-6.55	6.57	-17.03	-5.70	-10.36	-5.92	-9.88	0.88	7.13
Gurabo	10.03	10.91	7.83	5.73	-5.75	-8.77	-1.87	-6.79	-6.70	9.90	4.55	-2.74
Isabela Substation	-0.69	-9.14	-7.72	-3.23	-3.70	-6.47	6.23	-0.23	-6.00	13.24	4.35	-3.87
Jajome Alto	8.03	-2.20	-0.15	-12.21	-13.60	-15.83	-7.60	-16.76	-2.03	0.05	11.70	4.40
Juncos	9.80	9.11	17.47	5.14	-2.52	-13.63	-1.64	-20.44	-10.95	-1.50	12.76	2.44
Lajas Substation	1.62	9.40	0.44	3.75	10.10	-3.13	-12.90	-14.56	-13.18	14.20	1.09	-15.28
Manatí	-4.67	-0.56	-5.58	-5.33	-1.24	-6.39	-5.58	-1.69	4.97	5.32	3.57	-5.60
Mayaguez City	-19.19	8.24	4.58	-2.22	-18.22	-22.48	-23.65	-18.15	-16.23	-12.46	-21.34	-13.34
Montebello	0.63	3.22	-5.01	-7.92	3.96	0.15	7.13	-3.44	-2.71	-2.08	-2.37	-5.13
Mora Camp	-0.15	-8.48	-0.27	-0.55	6.12	-15.21	11.48	-4.66	3.30	5.15	1.76	-9.26
Morovis	-9.92	3.77	-10.82	-9.87	3.37	-1.92	-5.20	2.77	8.52	3.74	0.47	-5.16
Negro Corozal	11.46	-1.05	-2.73	1.43	0.66	13.21	11.40	2.33	7.93	4.28	11.26	3.27
Paraíso	14.29	3.71	13.63	1.76	-8.22	-2.99	4.71	-7.56	6.78	3.25	7.70	1.03
Peñuelas	1.87	6.86	5.16	14.23	0.09	1.48	-2.64	12.31	-1.02	4.07	3.70	6.22
Pico del Este	6.43	5.02	-1.59	0.84	-3.62	3.01	3.18	2.37	-6.60	-12.97	3.60	-3.11
Ponce	4.81	12.47	18.91	10.26	8.87	-5.60	7.96	0.48	7.60	5.60	1.96	3.46
Río Piedras	2.42	11.71	3.81	2.51	0.36	-6.30	-1.83	-5.15	7.83	-3.67	3.44	-10.91
San Juan WSFO	7.05	2.19	-11.11	10.26	-9.44	-9.01	5.98	-7.04	-0.39	-1.85	12.99	-0.22
San Lorenzo	12.40	2.80	-7.81	1.65	-10.67	1.05	4.58	-5.60	1.90	-5.32	-0.44	-0.14
San Sebastián	-7.90	9.05	0.34	-3.25	3.81	0.86	-4.72	-3.10	-6.72	8.95	-7.28	-1.08
Santa Isabel	-3.72	6.82	11.87	0.11	-1.43	-7.34	1.21	0.96	2.37	-3.72	12.14	-2.91
Santa Rita	-2.02	1.47	17.18	8.26	0.16	-7.82	-7.31	-15.21	1.72	6.07	-5.13	1.52
Trujillo Alto	12.48	-0.87	2.60	14.90	-3.42	-4.73	-1.09	-4.01	3.62	-1.04	-2.74	-10.01

Valores en Negritas: $|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

Varios investigadores han encontrado resultados similares en cuanto al comportamiento de la precipitación. Un estudio sobre la evolución anual de la precipitación realizado en Kerala, India (1871-2005), revela una disminución significativa en el suroeste con las lluvias del Monzón, mientras se ha observado un aumento en la temporada post-Monzón en el Estado de Kerala (Krishnakumar et al. 2009). Este mismo análisis ha evidenciado que la lluvia en los meses de junio y julio muestran una disminución acusada significativa con MK, mientras enero, febrero y abril expresan un aumento también significativo. Según Canarozzo et al. (2006), en Sicilia los meses de verano

mostraron tendencias positivas, mientras que los meses de invierno obtuvieron tendencias regresivas significativas, ambos con MK.

Sin embargo, merecen atención los fenómenos que controlan el clima a escala regional en la cuenca del Caribe. Aunque son fenómenos de alcance global, en el Caribe y Latinoamérica se ha evidenciado la gran influencia que pueden tener los fenómenos atmosféricos NAO, El Niño (ENSO) y La Niña en los patrones de precipitación lo que dificulta interpretar ciertos resultados climáticos (Ropelewski y Halpert, 1987; Laing, 2004; Giannini et al. 2000). Giannini et al. (2000) encontraron en su estudio que la presión atmosférica en la superficie del mar en el Atlántico Norte afecta directamente las lluvias en el Caribe cambiando los patrones de corrientes de viento en la región e indirectamente con anomalías en la temperatura superficial del mar. Evidencian también que anomalías de altas presiones en el Atlántico Norte se traducen en vientos alisios más fuertes haciendo que las temperaturas de la superficie del mar sean más frescas y por tanto menos precipitación en el Caribe. En cuanto las condiciones atmosféricas van retomando normalidad, se favorece la convección y al inicio de la temporada de lluvia las mismas suelen ser más fuertes, específicamente en las Antillas Mayores. Jamaica es más propenso a inundaciones durante mayo-julio del primer año de la fase cálida, mientras que en Cuba se observan lluvias excesivas durante el último invierno (enero-marzo) del primero año del ENSO (Giannini et al. 2000).

Martis et al. (2001) aseguran en un estudio llevado a cabo en las Antillas Holandesas (Aruba, Curazao y Bonaire) que el comportamiento de la precipitación en los meses de octubre-enero muestran una relación estrecha con el ENSO. En Costa Rica, la intensificación de los vientos alisios del Caribe registrados durante el verano del ENSO y la topografía que eleva el aire, son factores que han incrementando la precipitación en la costa Caribe disminuyendo simultáneamente en la costa Pacífico (Giannini et al. 2000). Similar a los resultados y patrones en Puerto Rico, según Centella et al. (1999) la precipitación anual en Cuba no ha mostrado grandes cambios significativos en un largo periodo de tiempo. Por el contrario, un importante aumento en la precipitación de invierno se ha registrado y una ligera disminución en la de verano.

7.3 Tendencias de Precipitación por cuencas.

7.3.1 Región Hidrográfica Cibuco-Guajataca

En Cibuco-Guajataca (Fig. 95), varían las tendencias por estación. Muchos de los resultados obtenidos con Rho Spearman son carentes de significación estadística con excepción de la estación Negro-Corozal.

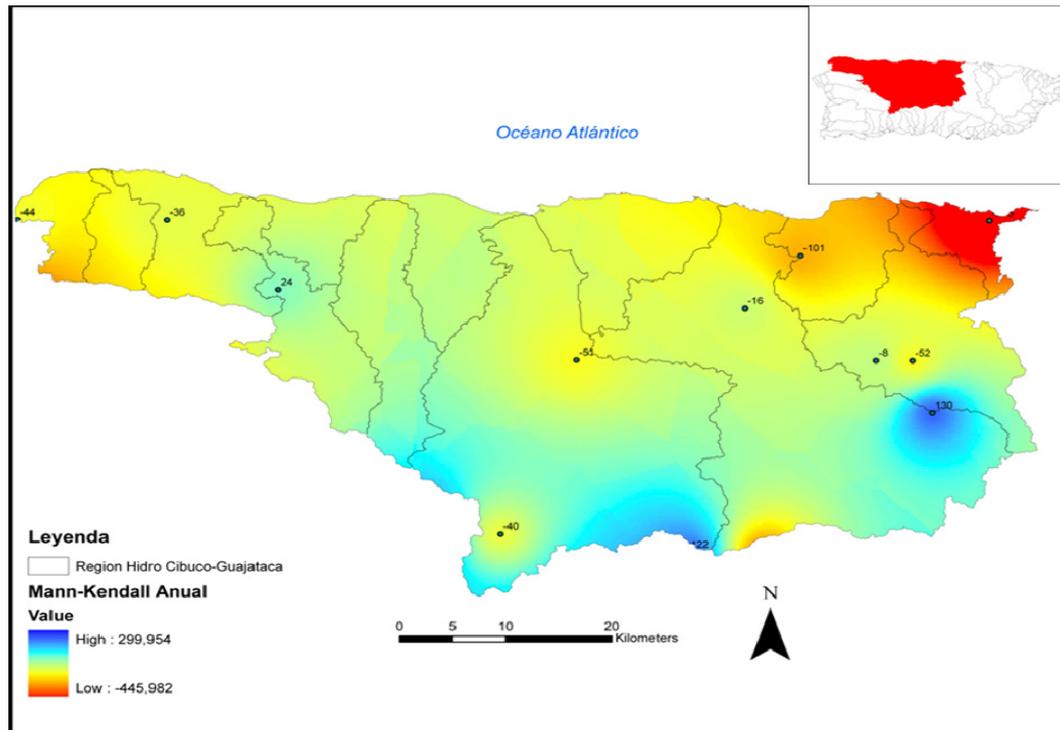


Figura 95. Tendencias de la precipitación total anual con Mann-Kendall en la Región Hidrográfica Cibuco-Guajataca.

7.3.1a Cuenca del Río Grande Arecibo

La precipitación no muestra tendencias con la media anual. De ocho estaciones, cuatro expresaron resultados regresivos con RS y con MK se confirman tres de las mismas que han obtenido valores significativos. No obstante, a escala de cuenca tampoco se pudo evidenciar una tendencia con la precipitación anual (tabla 37).

Tabla 37. Tendencias de la precipitación total anual con Rho Spearman y Mann-Kendall.
Cuenca Río Grande de Arecibo

	Rho de Spearman	Significación Estadística	S de (MK)	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Cuenca R.G Arecibo	0.02	N	7	0.91	NO
Montebello	-0.06	N	-16	-1.33	NO
Dos Bocas	-0.04	N	-51	-2.67	SI (0.0038)
Adjuntas Substation	0.32	N	136	12.71	SI (0.000)
Adjuntas 1NW	-0.02	N	-40	-2.31	SI (0.0104)
Peñuelas	0.21	N	76	6.72	SI (0.000)
Corral Viejo	0.29	N	131	11.56	SI (0.000)
Cerro Maravilla	0.28	N	122	9.59	SI (0.000)
Aceituna	-0.15	N	-121	-6.79	SI (0.000)

N- valores carentes de significación estadística. * Correlación significativa al nivel de 0.05.

** Correlación significativa al nivel de 0.01. $|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

Adjuntas Substation, Corral Viejo y Cerro Maravilla han sido las tres estaciones que han obtenidos los resultados más elevados con RS, aunque no alcanzan la significancia estadística. Aún así, según el análisis de regresión la estación de Adjuntas Substation ha mostrado un incremento de casi 12 mm /año (Fig. 96). Además con la aplicación de MKS, se identificó el comienzo de la tendencia en el año 1980. (Fig. 97).

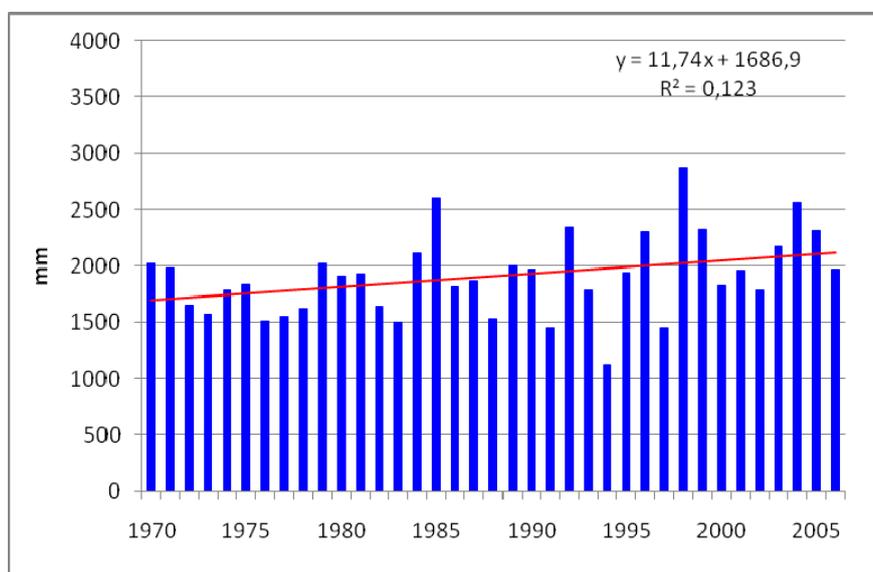


Figura 96. Evolución de precipitación total anual. Adjuntas Substation

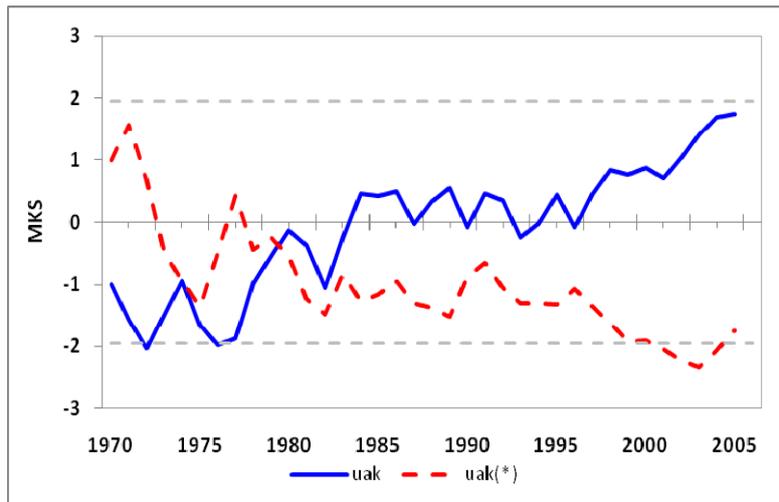


Figura 97. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. Adjuntas Substation, comienzo 1980

La estación Corral Viejo (Fig. 98) mostró un aumento moderado de 9.9 mm/año. Según MKS, en dicha estación se inicia el aumento de la precipitación en la década del 70 y se puede observar que las estadísticas (*uak*) y (*uak**) muestran una separación clara entre ambas (Fig. 99).

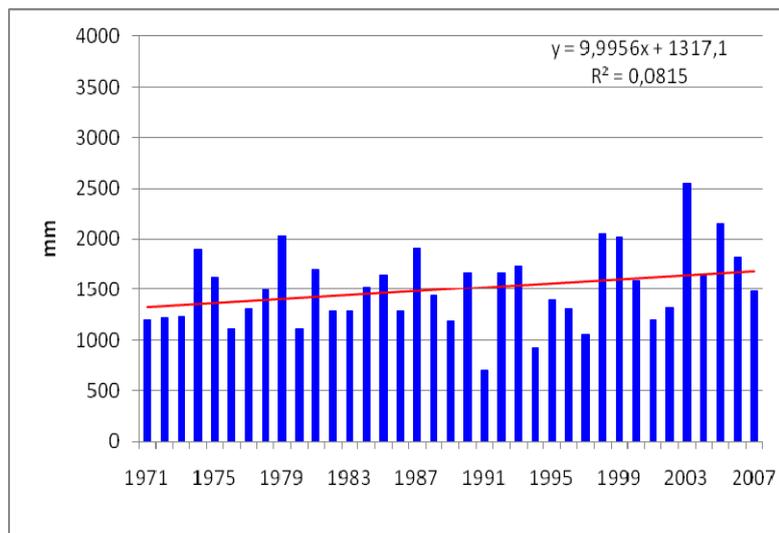


Figura 98. Evolución de precipitación total anual. Corral Viejo

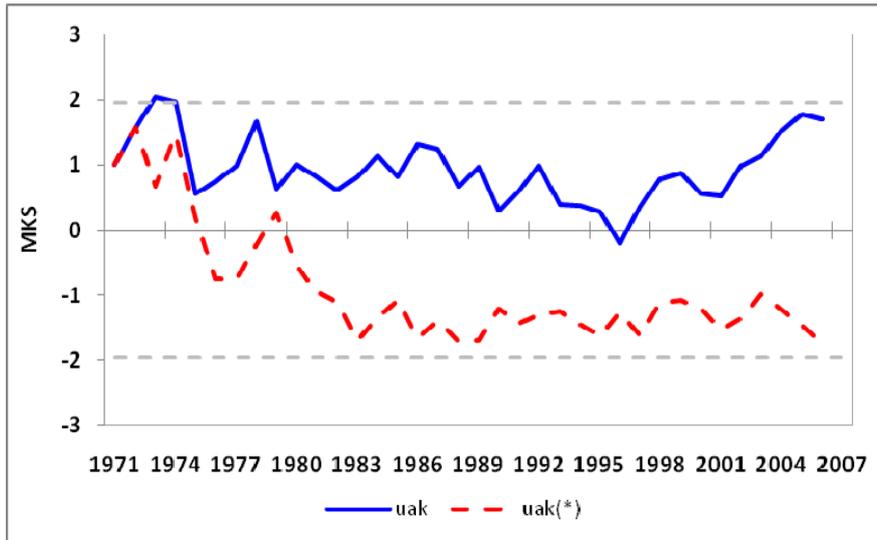


Figura 99. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. Corral Viejo, comienzo 1972.

La estación Cerro Maravilla (Fig. 100) tuvo un incremento anual de 6.6 mm/año de haber sido lineal la tendencia. El inicio se detectó en el 1978 (Fig. 101). Cabe destacar que en dicha estación, ocurre un ligero acercamiento de las estadísticas (*uak*) y (*uak**) en 1996, punto donde vuelven a separarse aunque sin alcanzar los valores significativos.

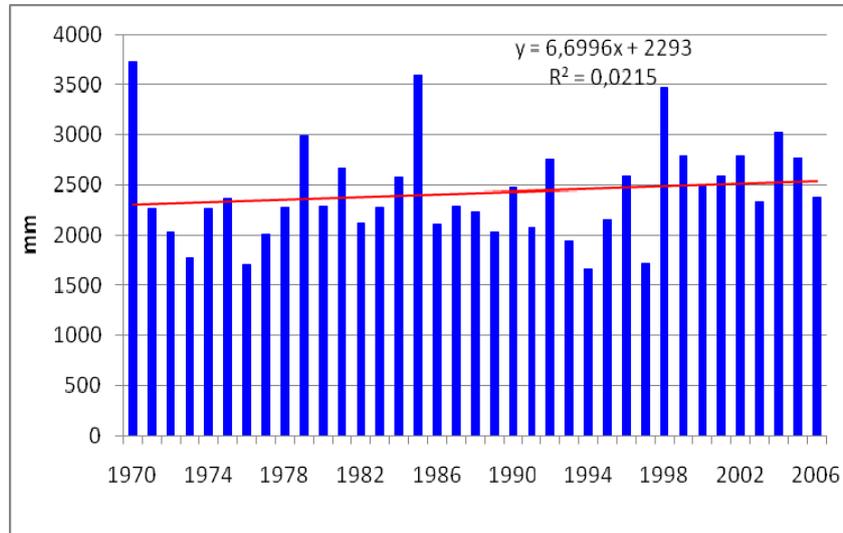


Figura 100. Evolución de precipitación total anual. Cerro Maravilla

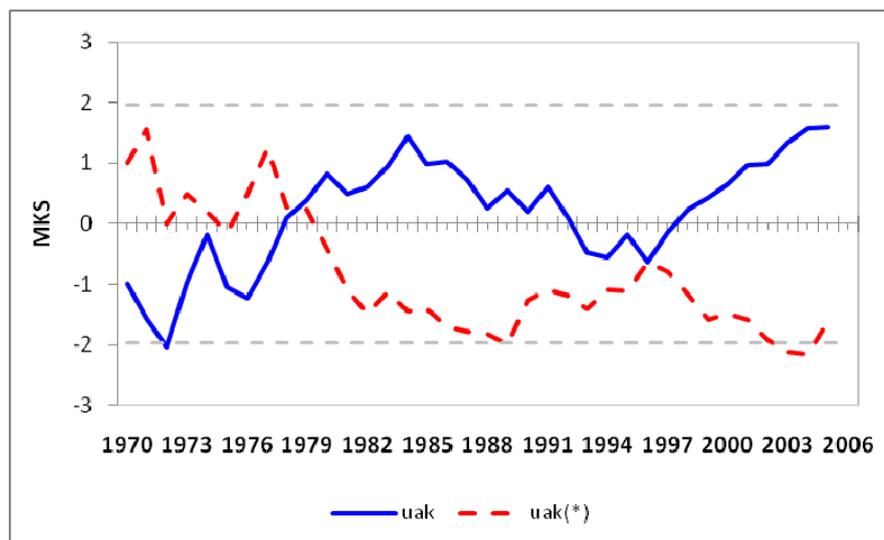


Figura 101. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. Cerro Maravilla, comienzo 1978

Por otro lado, al igual que ocurre a escala insular, se pueden detectar tendencias con la precipitación mensual. De 8 estaciones con influencias en el territorio de la cuenca, 6 de ellas muestran aumento de la precipitación en el mes de enero y 4 de ellas con valores significativos con MK. Los meses de febrero, marzo y mayo también muestran indicios al aumento de la precipitación (tablas 38 y 39). Los cuatro meses (enero, febrero, marzo y mayo) contribuyen con un 26% de la lluvia anual en la región. Mientras, el mes de julio, que representa un 7% de la lluvia anual, ha manifestado una ligera tendencia regresiva en casi todas las estaciones de la cuenca (Fig. 102).

Tabla 38. Tendencias de la precipitación mensual con Rho Spearman. Cuenca Río Grande de Arcibo

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cuenca R.G Arcibo	0.23	0.01	-0.19	-0.21	0.19	0.07	-0.16	0.37*	0.01	-0.04	-0.17	-0.07
Montebello	-0.01	0.10	-0.19	-0.24	0.17	0.02	0.29	-0.13	-0.04	-0.08	-0.06	-0.16
Dos Bocas	-0.23	0.03	0.01	-0.05	0.03	-0.07	-0.20	-0.07	0.08	0.07	0.06	-0.19
Adjuntas Substation	-0.17	0.04	0.11	0.23	0.36	0.13	-0.04	0.17	0.16	-0.12	0.15	0.08
Adjuntas 1NW	0.12	0.04	0.07	-0.06	0.12	-0.15	-0.23	-0.26	0.11	0.02	-0.12	-0.08
Peñuelas	0.10	0.25	0.16	0.42	-0.01	0.06	-0.05	0.34	-0.03	0.14	0.15	0.22
Corral Viejo	0.03	-0.02	0.11	0.44	0.03	0.18	-0.04	0.31	0.18	0.14	-0.11	0.12
Cerro Maravilla	0.09	0.07	0.32	0.32	0.11	0.03	-0.02	0.40	0.00	0.08	-0.08	-0.15
Aceituna	0.004	0.06	0.25	-0.01	-0.01	-0.19	-0.24	-0.19	-0.10	-0.02	-0.21	-0.10

Valores en **negritas**: Correlación significativa al nivel de 0.05.

Valores en **negritas/cursivas**: Correlación significativa al nivel de 0.01

Tabla 39. Tendencias de la precipitación mensual con Mann-Kendall. Cuenca Río Grande de Arecibo

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cuenca R.G Arecibo	6.53	-0.18	-5.95	-6.35	6.29	2.38	-4.87	11.34	-1.11	-0.35	-4.68	-2.27
Montebello	0.63	3.22	-5.01	-7.92	3.96	0.15	7.13	-3.44	-2.71	-2.08	-2.37	-5.13
Dos Bocas	-11.87	0.69	1.27	-4.17	1.86	-3.02	-11.19	-4.01	3.96	4.46	3.81	-13.48
Adjuntas Substation	6.77	-1.54	3.41	8.26	11.63	3.85	-1.73	5.04	5.98	-4.72	5.38	3.06
Adjuntas 1NW	7.65	0.45	2.82	-3.01	6.52	-6.04	-12.82	-14.53	5.62	0.70	-5.42	-4.19
Peñuelas	1.87	6.86	5.16	14.23	0.09	1.48	-2.64	12.31	-1.02	4.07	3.70	6.22
Corral Viejo	0.64	-0.82	3.05	18.10	1.08	5.79	-1.11	11.23	4.71	5.60	-3.34	5.10
Cerro Maravilla	1.98	1.81	10.00	10.02	5.45	4.94	-0.79	17.25	1.10	7.08	0.54	-2.32
Aceituna	-3.40	4.07	12.60	-1.28	-0.36	-9.90	-13.87	-9.72	-5.41	-1.67	-10.03	-6.06

Valores Negritas: $|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

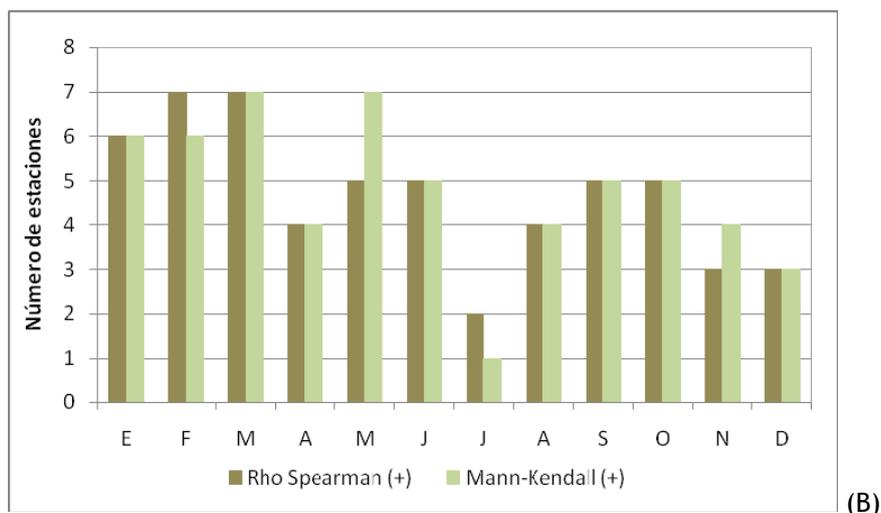
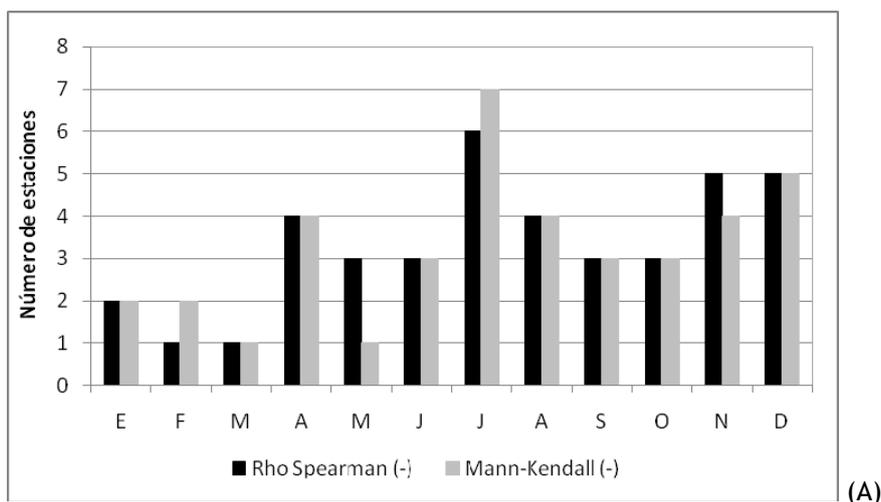


Figura 102. Cantidad de estaciones con tendencias negativas (A) y positivas (B) de la precipitación total mensual en la Cuenca del Río Grande de Arecibo.

Un buen ejemplo de las tendencias mensuales se puede observar en abril de la estación Peñuelas (Fig. 103). Abril, con una precipitación media de 106 mm ha mostrado un incremento en la cantidad de lluvia de 3.7 mm/año por término medio. Por otro lado, se encuentra la estación Adjuntas Substation que ha mostrado un aumento significativo en el mes de mayo (Fig. 104). Mayo, con una media de 215 mm, ha mostrado un incremento de 3.8 mm/año en el análisis de regresión.

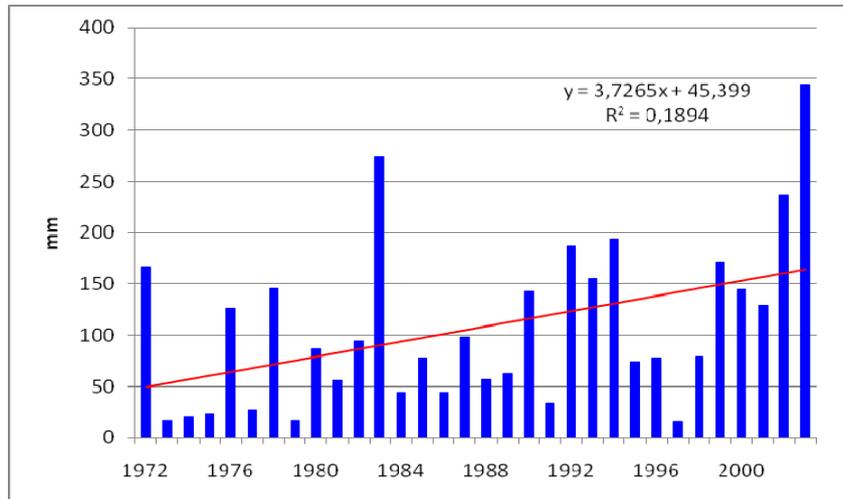


Figura 103. Evolución de la precipitación total del mes de abril. Peñuelas

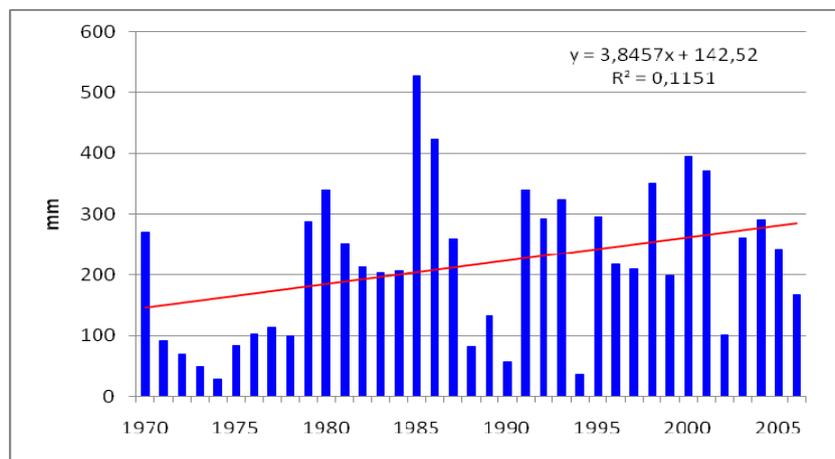


Figura 104. Evolución de la precipitación total del mes de mayo. Adjuntas Substation

7.3.1b Cuenca Río Grande de Manatí

Aplicando los análisis a todas las estaciones con influencia en la cuenca, obtenemos resultados interesantes. Dicha cuenca tampoco muestra tendencia alguna con la media anual. De siete estaciones utilizadas, cuatro de ellas obtuvieron signos de tendencias regresivas con valores muy cercanos a cero con el análisis de RS. Mientras que con MK se confirmó la tendencia en tres de ellas con valores de $|Z|$ que superaron 1.645 (tabla 40). Otras dos estaciones muestran ligero aumento con ambos análisis estadísticos.

Tabla 40. Tendencias de la Precipitación total anual por estación

	Rho de Spearman	Significación Estadística	S de (MK)	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Cuenca R.G Manatí	0.07	N	13	1.48	NO (0.0694)
Manatí	-0.10	N	-101	-9.75	SI (0.000)
Montebello	-0.06	N	-16	-1.33	NO
Dos Bocas	-0.04	N	-51	-2.67	SI (0.0038)
Cerro Maravilla	0.28	N	122	9.59	SI (0.000)
Aceituna	-0.15	N	-121	-6.79	SI (0.000)
Negro-Corozal	0.40	**	130	12.88	SI (0.000)
Morovis	0.003	N	-8	-0.43	NO

N- valores carentes de significación estadística. * Correlación significativa al nivel de 0.05.

** Correlación significativa al nivel de 0.01. $|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

A partir del análisis con Polígonos de Thiessen, se ha detectado que la estación Negro-Corozal es la que más influencia territorial tiene en esta cuenca. Esta estación representa el 26% del territorio y mostró tendencias positivas con valores significativos en ambos análisis estadísticos. Además, se ha observado que hubo un incremento de la precipitación total anual de 18 mm (Fig. 105). Con MKS, se ha identificado 1979 como el año de inicio del incremento en la precipitación total anual, alcanzando valores significativos a partir de 2005 (Fig. 106).

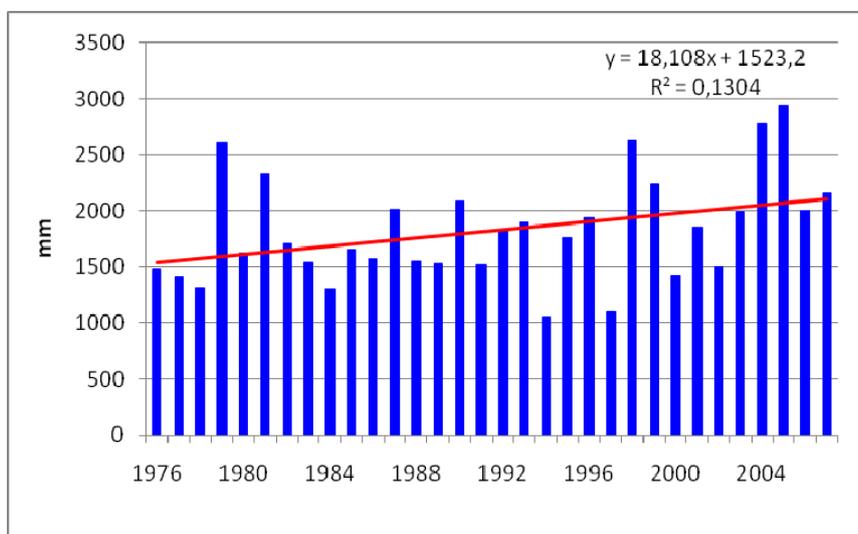


Figura 105. Evolución de la precipitación total anual. Negro-Corozal

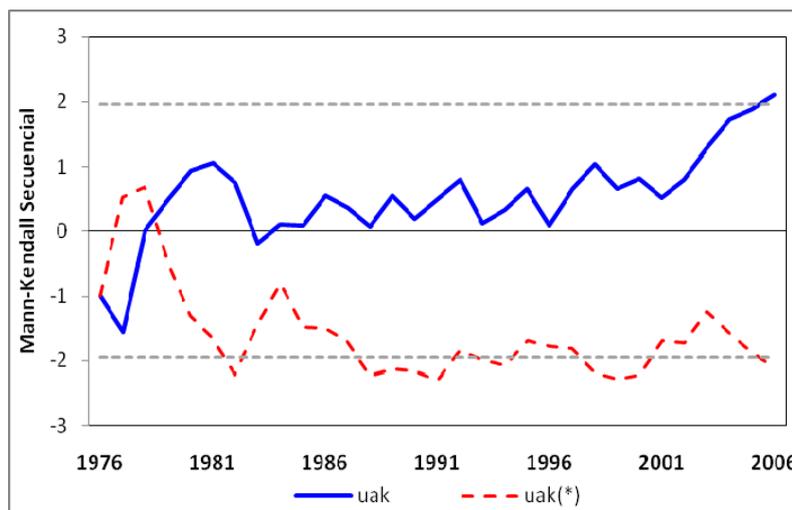


Figura 106. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. Negro Corozal, comienzo 1979.

En seis estaciones se ha observado que el mes de diciembre, expresa una disminución de la precipitación con excepción de la estación Negro-Corozal (tablas 41 y 42). Abril y julio expresan tendencias regresivas en 5 estaciones (Fig. 106). Abril, julio y diciembre contribuyen con un 21% de lluvia anual en la cuenca. Mientras, los meses de febrero, mayo, septiembre, octubre y noviembre han mostrado un aumento en la precipitación que reciben, siendo significativos en las cinco estaciones con MK. Entre estos cinco meses aportan el 53% de la lluvia al año.

Tabla 41. Tendencias de la precipitación mensual con Rho Spearman. Cuenca Río Grande de Manatí

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cuenca R.G Manatí	0.34	0.07	-0.31	-0.40*	-0.06	0.04	0.15	0.12	0.09	0.08	0.15	0.09
Manatí	-0.15	-0.01	-0.16	-0.15	-0.04	-0.31	-0.16	-0.05	0.15	0.15	0.07	-0.16
Montebello	-0.01	0.10	-0.19	-0.24	0.17	0.02	0.29	-0.13	-0.04	-0.08	-0.06	-0.16
Dos Bocas	-0.23	0.03	0.01	-0.05	0.03	-0.07	-0.20	-0.07	0.08	0.07	0.06	-0.19
Cerro Maravilla	0.09	0.07	0.32	0.32	0.11	0.03	-0.02	0.40	0.00	0.08	-0.08	-0.15
Aceituna	0.004	0.06	0.25	-0.01	-0.01	-0.19	-0.24	-0.19	-0.10	-0.02	-0.21	-0.10
Negro-Corozal	0.37	-0.05	-0.05	0.07	0.02	0.42	0.37	0.09	0.20	0.17	0.33	0.11
Morovis	-0.20	0.09	-0.19	-0.15	0.08	-0.05	-0.11	0.06	0.19	0.08	0.02	-0.10

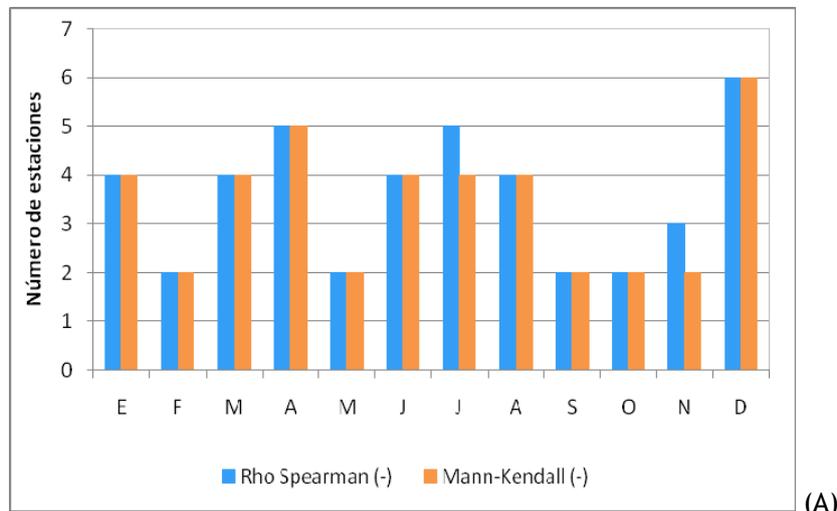
Valores en **negritas**: Correlación significativa al nivel de 0.05.

Valore en **negritas/cursivas**: Correlación significativa al nivel de 0.01

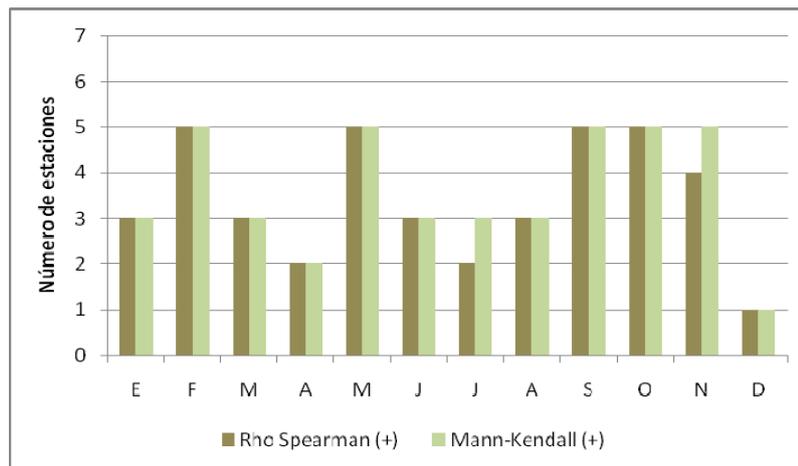
Tabla 42. Tendencias con Mann-Kendall de la precipitación total mensual.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cuenca R.G Manatí	8.37	1.44	-7.12	-12.26	-0.91	0.66	4.29	2.61	2.82	3.12	3.65	2.57
Manatí	-4.67	-0.56	-5.58	-5.33	-1.24	-6.39	-5.58	-1.69	4.97	5.32	3.57	-5.60
Montebello	0.63	3.22	-5.01	-7.92	3.96	0.15	7.13	-3.44	-2.71	-2.08	-2.37	-5.13
Dos Bocas	-11.87	0.69	1.27	-4.17	1.86	-3.02	-11.19	-4.01	3.96	4.46	3.81	-13.48
Cerro Maravilla	1.98	1.81	10.00	10.02	5.45	4.94	-0.79	17.25	1.10	7.08	0.54	-2.32
Acetuna	-3.40	4.07	12.60	-1.28	-0.36	-9.90	-13.87	-9.72	-5.41	-1.67	-10.03	-6.06
Negro-Corozal	11.46	-1.05	-2.73	1.43	0.66	13.21	11.40	2.33	7.93	4.28	11.26	3.27
Morovis	-9.92	3.77	-10.82	-9.87	3.37	-1.92	-5.20	2.77	8.52	3.74	0.47	-5.16

Valore en negritas: $|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.



(A)



(B)

Figura 107. Cantidad de estaciones con tendencias negativas (A) y positivas (B) de la precipitación total mensual en la Cuenca del Río Grande de Manatí.

La estación Manatí muestra un claro ejemplo de tendencias mensuales. La precipitación en el mes de junio mostró una disminución anual de 1.5 mm según la pendiente de la recta del análisis de regresión (Fig. 108). En la estación Cerro Maravilla se detectó una tendencia clara y significativa en el mes de agosto donde la precipitación ha aumentado 2.5 mm al año por término medio (Fig. 109).

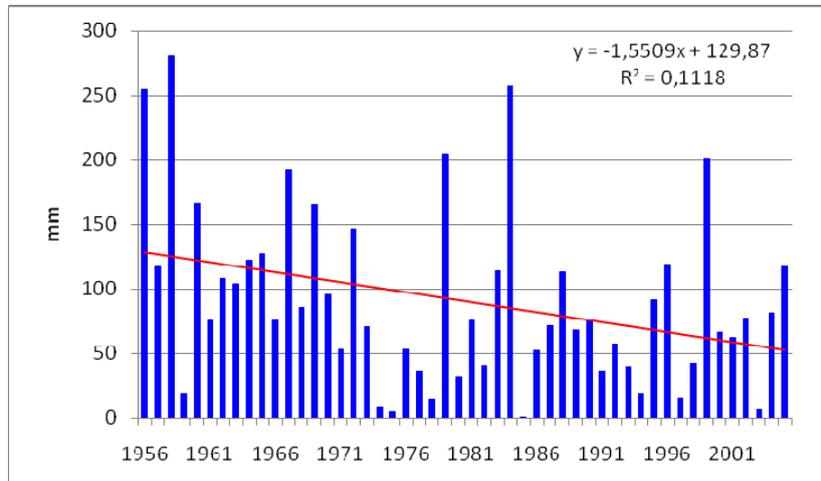


Figura 108. Evolución de la precipitación total en el mes de junio. Manatí

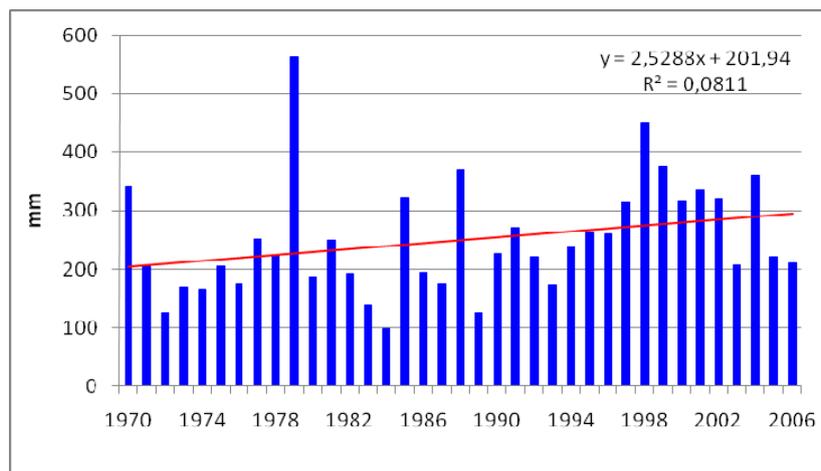


Figura 109. Evolución de la precipitación total en el mes de agosto. Cerro Maravilla

7.3.2 Cuenca del Río Culebrinas

En esta región, las estaciones más cercanas a la costa manifiestan una disminución de la precipitación total anual, sin embargo las que se ubican en el área más oriental, cercano a la Cordillera Central muestran una tendencia positiva (Fig. 110).

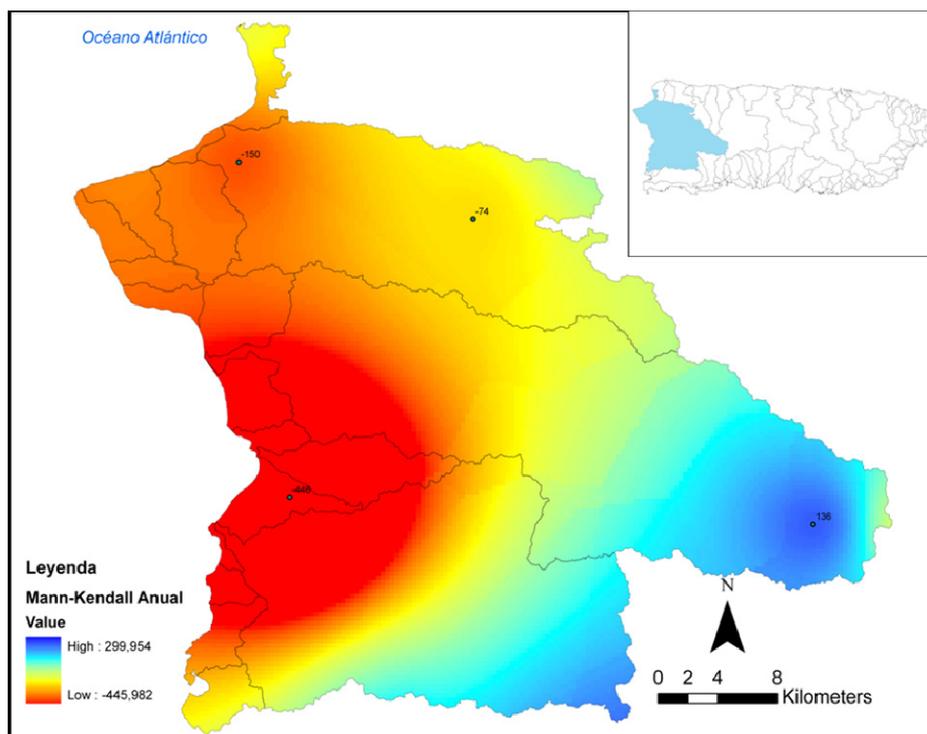


Figura 110. Tendencias de la precipitación total anual con Mann-Kendall en la Región Hidrográfica Culebrinas-Guanajibo.

De cuatro estaciones, dos obtuvieron tendencias regresivas con RS, aunque con valores cercanos a cero. Con MK se confirman las mismas y además alcanza valores significativos (tabla 43). A escala de cuenca, con la precipitación media tampoco se pudo detectar una tendencia anual con RS, mientras que con Mann-Kendall se obtuvieron valores de $|Z| > 1.645$. Se observa que en los 41 años de la serie, la precipitación disminuyó 5.1 mm anuales según la pendiente de la recta en el análisis de regresión (Fig. 111).

Tabla 43. Tendencias con Rho Spearman y Mann-Kendall de la precipitación total anual. Cuenca Río Culebrinas

	Rho de Spearman	Significación Estadística	S de (MK)	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Cuenca Río Culebrinas	-0.19	N	-118	-7.50	Si (0.000)
Coloso	-0.12	N	-150	-7.76	Si (0.000)
San Sebastián	-0.13	N	-74	-4.61	Si (0.000)
Guajataca Dam	0.05	N	24	1.30	No
Mora Camp	-0.05	N	-36	-1.58	No

N- valores carentes de significación estadística. * Correlación significativa al nivel de 0.05.

** Correlación significativa al nivel de 0.01. $|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

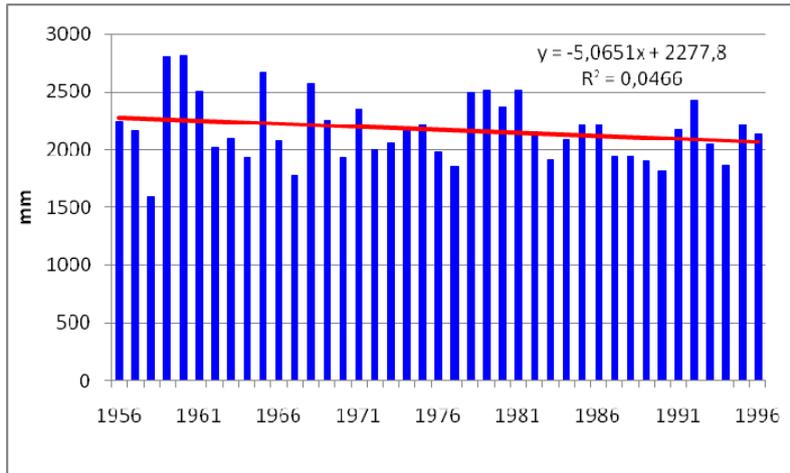


Figura 111. Precipitación media anual. Cuenca Río Culebrinas. 1956-1996.

De igual manera, en la estación Coloso (Fig. 112), que solo mostró un ligero descenso de las precipitaciones anuales, para los años de análisis esto representa 2.7 mm/año. Mientras, en la estación San Sebastián la precipitación total anual ha disminuido 4 mm por año (Fig. 113).

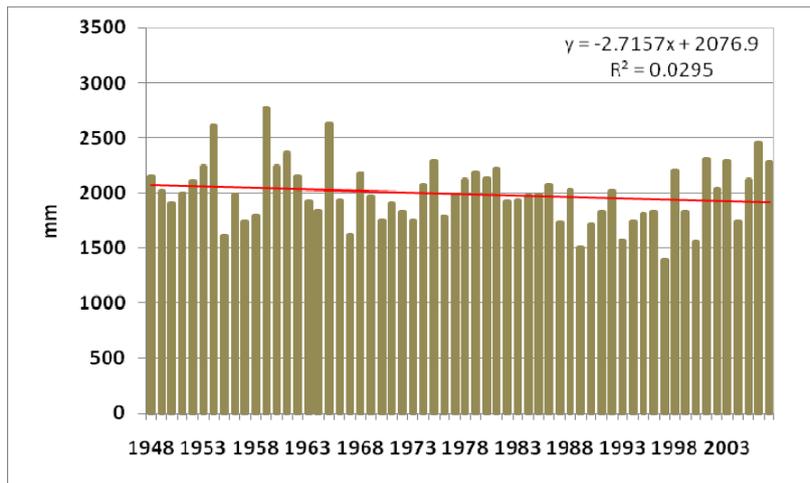


Figura 112. Precipitación total anual. Coloso

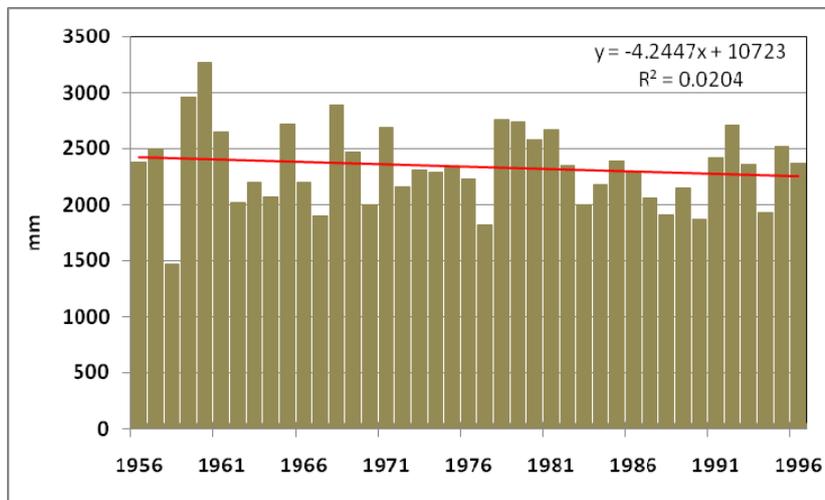


Figura 113. Precipitación total anual. San Sebastián

Distinto a como ocurre a escala insular, casi no se pueden detectar tendencias con la precipitación total mensual en esta cuenca. Con la media destaca el mes de febrero que obtuvo valores positivos y significativos en ambos análisis (tablas 44 y 45). Con MK febrero, mayo y octubre mostraron aumento anual y entre ellos contribuyen en un 29% de la lluvia. Enero, abril, junio, julio, agosto y noviembre, que juntos aportan el 51% del agua que precipita en la cuenca, han demostrado una disminución anual.

Tabla 44. Tendencias de la precipitación mensual con Rho Spearman. Cuenca Río Culebrinas

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cuenca Culebrinas	-0.25	0.33*	0.04	-0.14	0.11	-0.06	-0.25	-0.20	-0.01	0.22	-0.22	-0.07
Coloso	-0.11	0.12	0.15	-0.02	-0.06	-0.25	-0.31	-0.13	-0.08	0.17	-0.07	0.08
San Sebastián	-0.20	0.22	0.01	-0.11	0.07	0.01	-0.13	-0.08	-0.13	0.24	-0.18	-0.06
Guajataca Dam	0.07	0.04	-0.12	0.06	0.28	-0.24	0.01	0.05	0.04	-0.03	0.07	-0.21
Mora Camp	-0.03	-0.16	0.01	-0.02	0.12	-0.28	0.22	-0.10	0.06	0.11	0.04	-0.18

Valores en **negritas**: Correlación significativa al nivel de 0.05.

Valore en **negritas/cursivas**: Correlación significativa al nivel de 0.01.

Tabla 45. Tendencias de la precipitación total mensual con Mann-Kendall. Cuenca Río Culebrinas

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cuenca Culebrinas	-9.29	13.10	1.52	-4.34	4.05	-2.02	-10.51	-7.44	0.07	9.06	-8.70	-1.53
Coloso	-4.81	7.24	8.57	-0.96	-3.23	-13.30	-19.62	-7.89	-5.71	12.10	-2.93	4.14
San Sebastián	-7.90	9.05	0.34	-3.25	3.81	0.86	-4.72	-3.10	-6.72	8.95	-7.28	-1.08
Guajataca Dam	3.20	0.15	-7.46	3.74	14.86	-17.40	1.63	1.90	1.97	-1.55	2.99	-10.10
Mora Camp	-0.15	-8.48	-0.27	-0.55	6.12	-15.21	11.48	-4.66	3.30	5.15	1.76	-9.26

Valores en **negritas**: $|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia

También cabe mencionar que junio y julio, en las estaciones cercanas a la costa (Coloso y Mora Camp), indican tendencias regresivas considerables (Fig. 114 y 115). Estos dos meses tienen mucha influencia en la lluvia anual y contribuyen con 24% de la precipitación registrada en la estación Coloso y 17% en la estación Mora Camp. Según el análisis de regresión aplicado a la serie de precipitación en la estación Coloso, el mes de junio muestra una disminución anual de 1.4 mm/año y julio 1.2 mm.

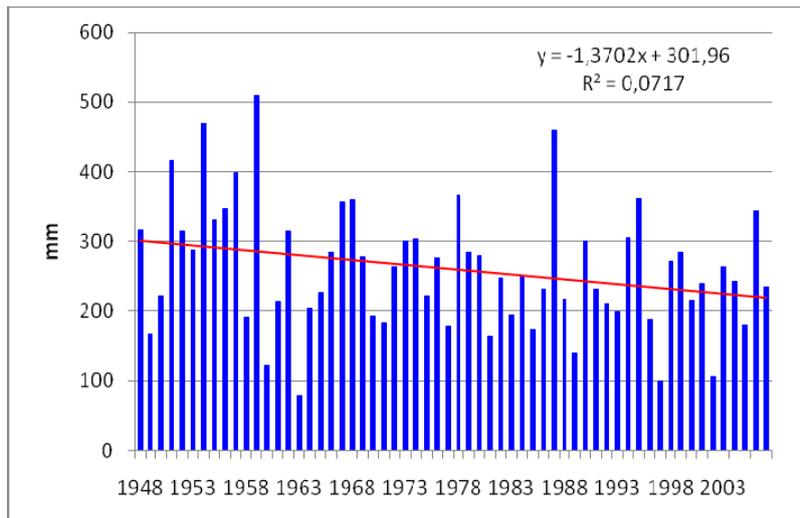


Figura 114. Evolución de la precipitación total mensual del mes de junio. Coloso

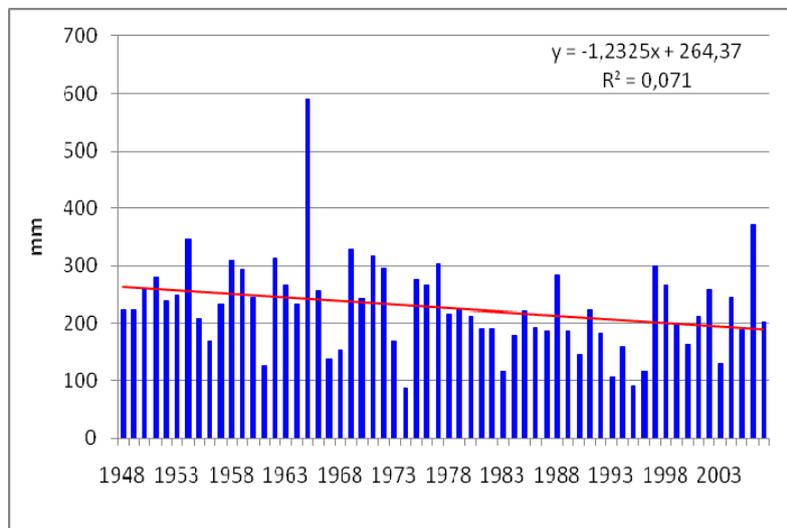


Figura 115. Evolución de la precipitación total mensual del mes de julio. Coloso

7.3.3 Cuenca del Río Fajardo

De los resultados obtenidos se puede interpretar que la región hidrográfica del este no refleja indicios de tendencias (positivas o negativas) con la precipitación anual (Fig. 116). Sólo 3 estaciones obtuvieron valores negativos, donde una de ellas alcanzó a rechazar la hipótesis nula de no tendencia con MK. Otras 6 estaciones en esta misma región expresaron valores positivos, de las cuales 4 alcanzaron la significancia estadística y 1 de ellas no mostró tendencia alguna.

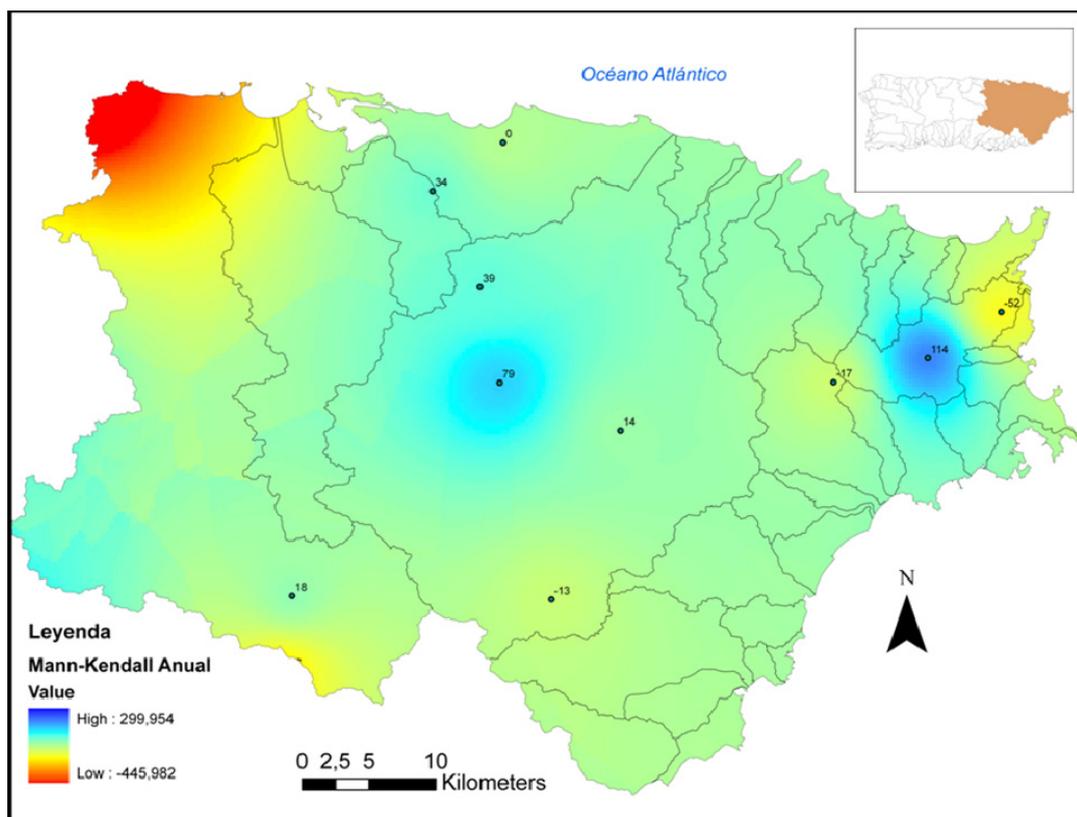


Figura 116. Tendencias de la precipitación total anual con Mann-Kendall en la Región Hidrográfica del Este.

En la cuenca del Río Fajardo, representativo de la región este, tampoco se puede identificar una tendencia clara con la precipitación total anual. Sin embargo, si se puede observar que la estación con mayor influencia en la cuenca (Paraíso), que cubre el 55% del área aproximadamente, expresa una tendencia positiva (tabla 46).

Tabla 46. Tendencias de la precipitación total anual. Cuenca Río Fajardo

	Rho de Spearman	Significación Estadística	S de (MK)	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Cuenca	-0.12	N	-25	-2.85	SI (0.0022)
Paraíso (52)	0.12	N	114	6.53	SI (0.000)
Pico del Este (35)	-0.06	N	-17	-1.41	NO
Fajardo (48)	-0.03	N	-52	-3.72	SI (0.0001)

N- valores carentes de significación estadística. * Correlación significativa al nivel de 0.05.

** Correlación significativa al nivel de 0.01. $|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

Dado a que la media de precipitación es tan elevada en esta cuenca, cuando se realiza el análisis de tendencias para la cuenca con la precipitación, se observa que entre 1970-1995 la misma tuvo una disminución anual de 14 mm según el análisis de regresión (Fig. 117). Sin embargo, con MKS no fue posible identificar el inicio de la tendencia.

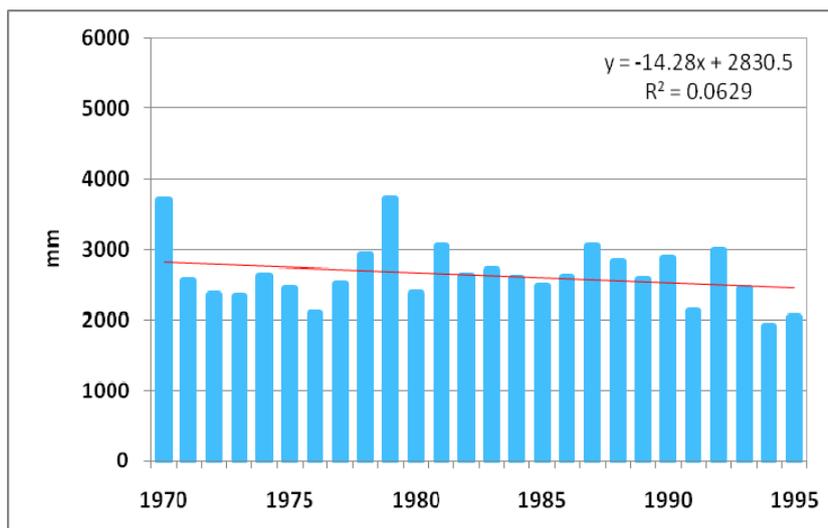


Figura 117. Precipitación media anual. Cuenca Río Fajardo. 1970-1995

La estación Fajardo solo mostró tendencias regresivas con MK. Mientras que Paraíso mostró valores cercanos a cero con RS y alcanzó la significancia estadística con Mann-Kendall. Debido a la abundante cantidad de agua que recibe la estación Paraíso, un ligero aumento implica cerca de 4 mm de lluvia al año (Fig. 118). De igual forma ocurre con la estación Pico del Este aunque de manera inversa. De haber sido lineal, la precipitación disminuyó 3 mm anuales (Fig. 119). Sin embargo, en ninguna de las estaciones fue posible identificar el comienzo de las tendencias.

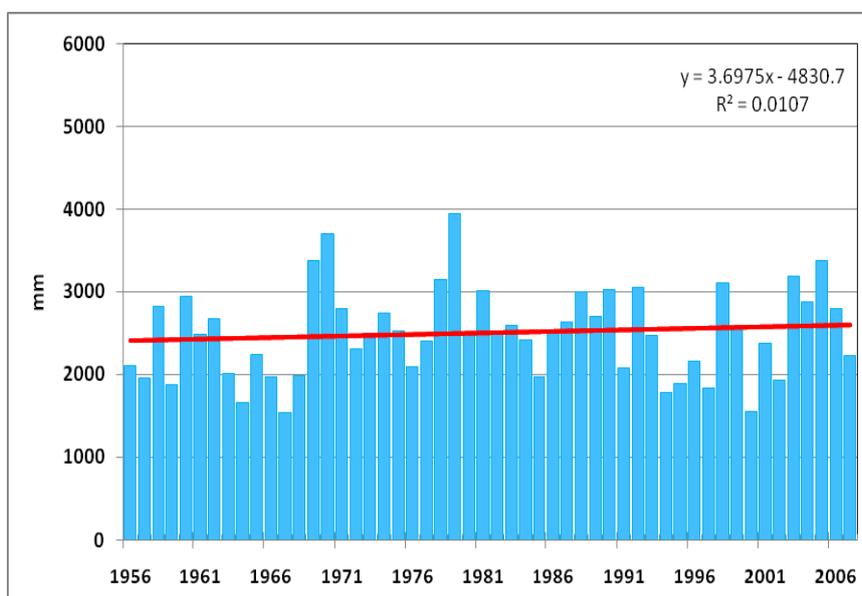


Figura 118. Evolución de la precipitación total anual. Paraíso.

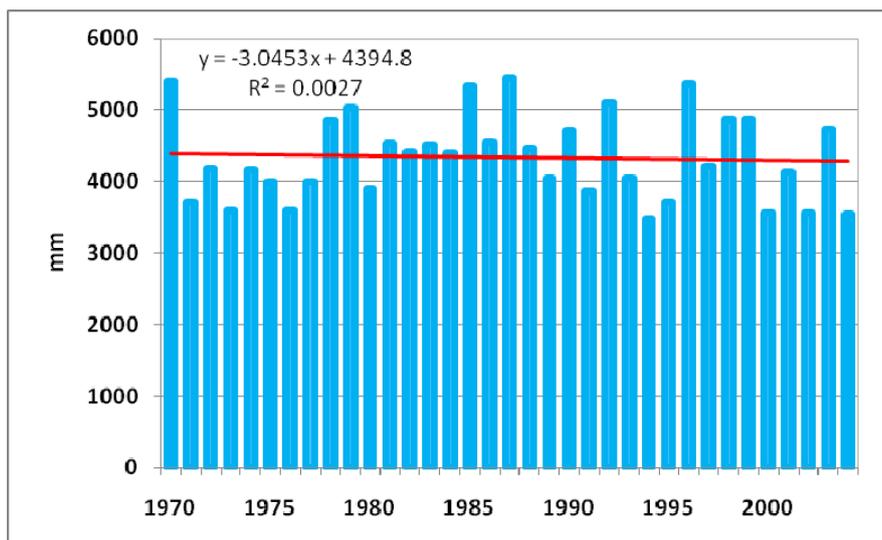


Figura 119. Evolución de la precipitación total anual. Pico del Este.

En esta cuenca, enero, febrero, marzo, abril, junio y julio han mostrado un incremento anual en ambos análisis, aunque estos seis meses sólo contribuyen con el 36% de la lluvia anual. Agosto, octubre, noviembre y diciembre, que juntos representan el 42% de la lluvia que precipita al año, expresan una disminución en la cantidad de agua que reciben (tabla 47 y 48).

Tabla 47. Tendencias de la precipitación mensual por estación con Rho Spearman. Cuenca Río Fajardo.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Media	0.24	0.43	0.17	0.08	-0.03	0.13	0.38	-0.30	-0.08	-0.56	-0.35	-0.07
Paraíso	0.27	0.09	0.27	0.03	-0.14	-0.06	0.07	-0.12	0.15	0.07	0.16	0.02
Pico del Este	0.18	0.19	-0.05	0.03	-0.12	0.12	0.10	0.05	-0.19	-0.37	0.19	-0.09
Fajardo	-0.04	0.28	0.15	-0.12	-0.01	-0.06	-0.15	-0.28	-0.18	-0.09	0.17	0.01

Valores en **negritas**: Correlación significativa al nivel de 0.05.

Valore en **negritas/cursivas**: Correlación significativa al nivel de 0.01

Tabla 48. Tendencias de la precipitación mensual por estación con Mann-Kendall. Cuenca Río Fajardo.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Media	4.97	12.77	4.90	1.77	-1.24	2.64	8.90	-9.34	-1.61	-17.26	-7.75	-1.82
Paraíso	14.29	3.71	13.63	1.76	-8.22	-2.99	4.71	-7.56	6.78	3.25	7.70	1.03
Pico del Este	6.43	5.02	-1.59	0.84	-3.62	3.01	3.18	2.37	-6.60	-12.97	3.60	-3.11
Fajardo	-1.40	12.61	7.31	-5.86	0.32	-2.99	-6.45	-15.74	-9.60	-5.36	8.37	2.10

Valores en **negritas**: $|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

El mes de octubre en la estación Pico del Este ha mostrado una disminución por término medio de 7 mm al año (Fig. 120). De manera opuesta ocurre en la estación Paraíso con el mes de marzo donde muestra un aumento en la precipitación de 1.5 mm/año 9 (Fig. 121).

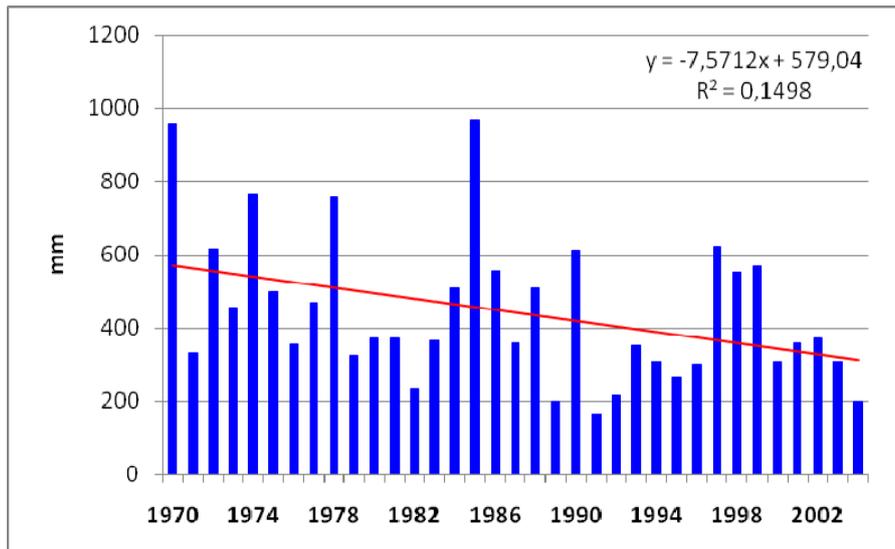


Figura 120. Evolución de la precipitación total del mes de octubre. Pico del Este

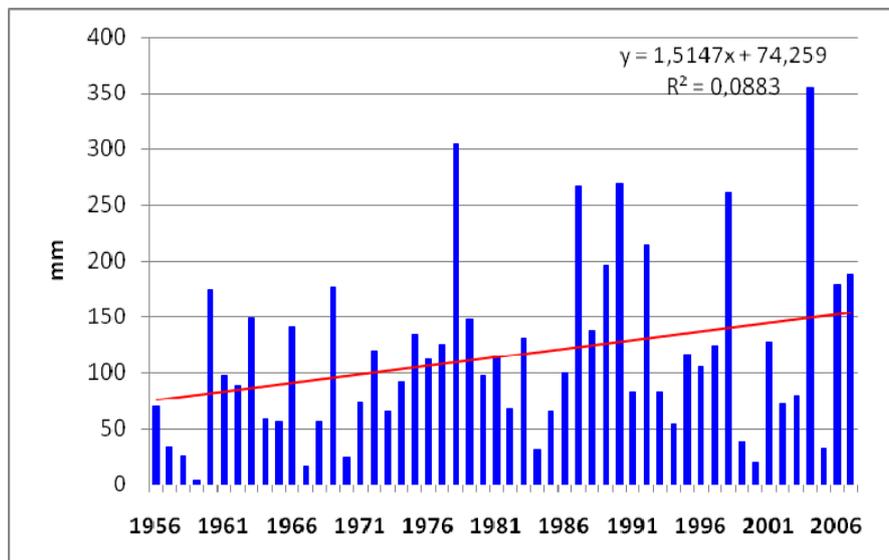


Figura 121. Evolución de la precipitación total del mes de marzo. Paraíso

7.4 Análisis de Tendencias. Temperatura. Puerto Rico

Para apreciar las tendencias de la temperatura se hizo un análisis de la media, la mínima y las máximas. Se han utilizado los mismos estadísticos utilizados que en el caso de las precipitaciones, Rho Spearman, Mann-Kendall (MK) y Mann-Kendall Secuencial (MKS).

De las 16 estaciones de temperatura utilizadas en toda la isla, 12 de ellas manifestaron tendencias positivas con el coeficiente de correlación entre el tiempo y la temperatura media anual. Entre estas 12 estaciones, exceptuando las de Fajardo y Manatí, las demás alcanzaron valores significativos, mientras que la estación de Cayey no reflejó tendencia alguna. Otras dos estaciones (Dos Bocas y Pico del Este), mostraron signos de tendencias regresivas con Rho Spearman expresando una disminución de la temperatura media anual en dichas estaciones, aunque Pico del Este no obtuvo valores r_s significativos.

En la tabla 49, se observa que los resultados de RS han sido corroborados cuando se empleó el análisis estadístico MK. Además, en la mayoría de los casos se pudo rechazar la hipótesis nula de no tendencia, con excepción de Cayey. De estos resultados obtenidos, podríamos deducir que la temperatura media anual ha ido incrementando con el pasar de los años en toda la isla de Puerto Rico, sin poder hacer excepciones por regiones.

Tabla 49. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y el estadístico Mann-Kendall entre tiempo y temperatura media anual.

ESTACIONES	Rho de Spearman	Significación Estadística	S de (MK)	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Adjuntas Substation	0.33	*	159	5.77	Si (0.0001)
Cayey	-0.04	N	4	0.16	No
Coloso	0.31	*	338	22.19	Si (0.0001)
Corozal Substation	0.59	*	648	43.77	Si (0.0001)
Dos Bocas	-0.42	**	-494	-22.83	Si (0.0001)
Fajardo	0.24	N	186	11.30	Si (0.0001)
Gurabo Substation	0.29	*	211	16.68	Si (0.0001)
Isabela Substation	0.47	**	559	33.44	Si (0.0001)
Juncos 1SE	0.52	**	675	39.36	Si (0.0001)
Lajas Substation	0.35	*	226	19.40	Si (0.0001)
Manatí	0.16	N	133	7.74	Si (0.0001)
Mayaguez City	0.66	**	734	41.93	Si (0.0001)
Pico del Este	-0.24	N	-109	-9.01	Si (0.0001)
Ponce	0.39	**	408	22.93	Si (0.0001)
Río Piedras	0.55	**	346	26.94	Si (0.0001)
San Juan WSFO	0.55	**	541	23.73	Si (0.0001)

N- valores carentes de significación estadística. * Correlación significativa al nivel de 0.05.

** Correlación significativa al nivel de 0.01. $|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

Todas las tendencias en las estaciones de temperatura han sido corroboradas con el análisis MKS, tanto las positivas como las negativas. Además, como en los análisis anteriores de precipitación, en este caso también se ha podido identificar el comienzo de las mismas en algunas de las estaciones. Sin embargo, no todas las estaciones llegaron a alcanzar la significación estadística aplicando MKS.

En la figura 122, se observan las líneas de tendencias de las estaciones Adjuntas Substation, Cayey, Coloso y Corozal Substation. Adjuntas Substation nos muestra nuevamente una evolución positiva con valores significativos entre los años 1995 y 2003, aparentemente comenzando a partir de 1985. La estación de Cayey, al igual que con la aplicación de los estadísticos anteriores, no muestra una tendencia clara en cuanto a la temperatura. Mientras, la estación de Coloso, si mostró un aumento de las mismas comenzando en el año 1979 y alcanzando valores significativos en 2006 (Fig. 121). Corozal Substation mantuvo valores significativos entre los años 1979-1990 y 1993-2007 (Fig. 123).

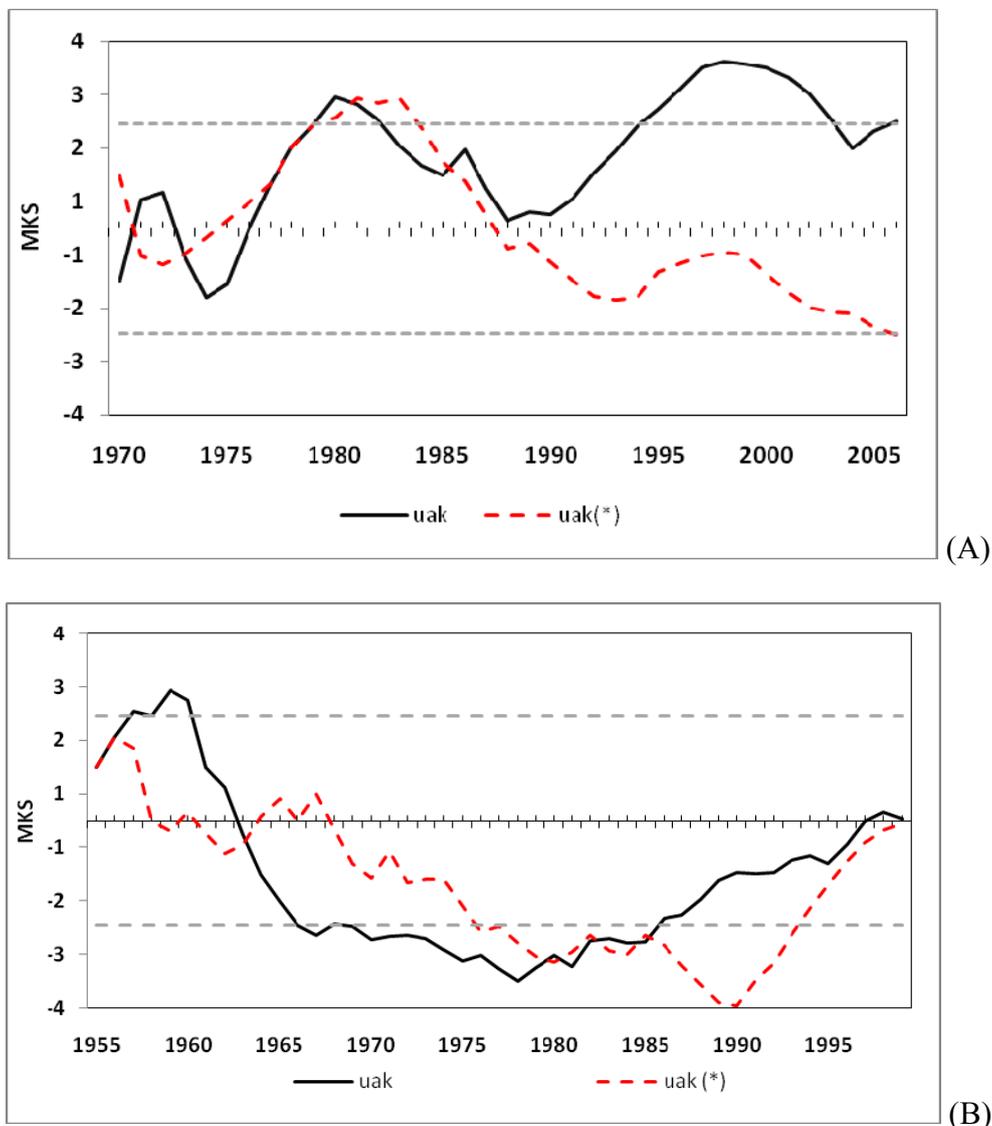


Figura 122. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. A) Adjuntas Substation y B) Cayey

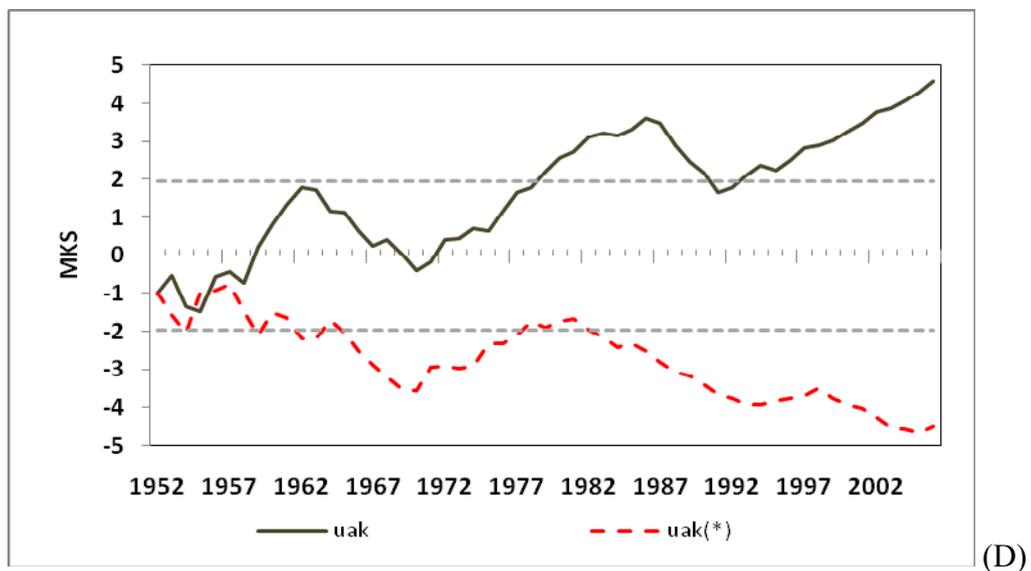
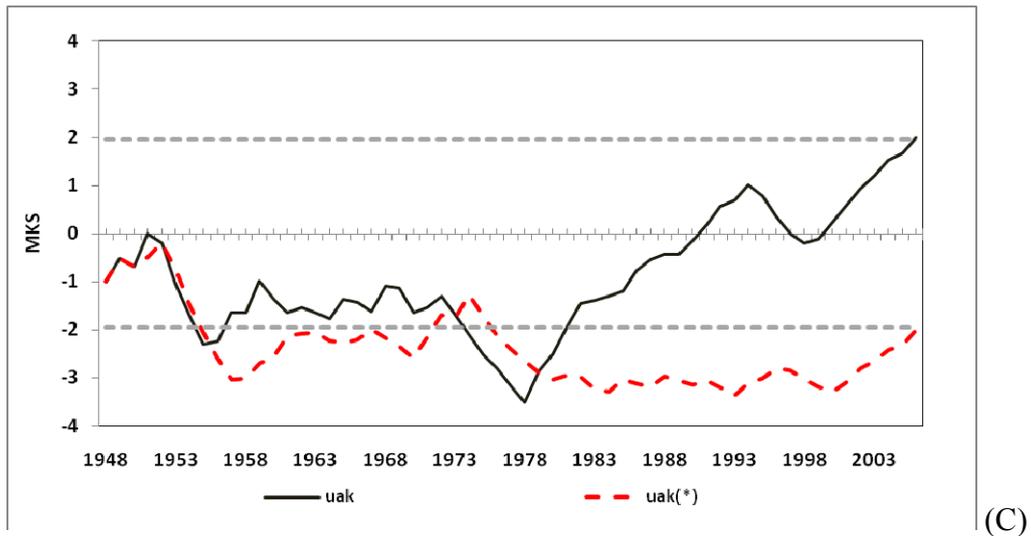
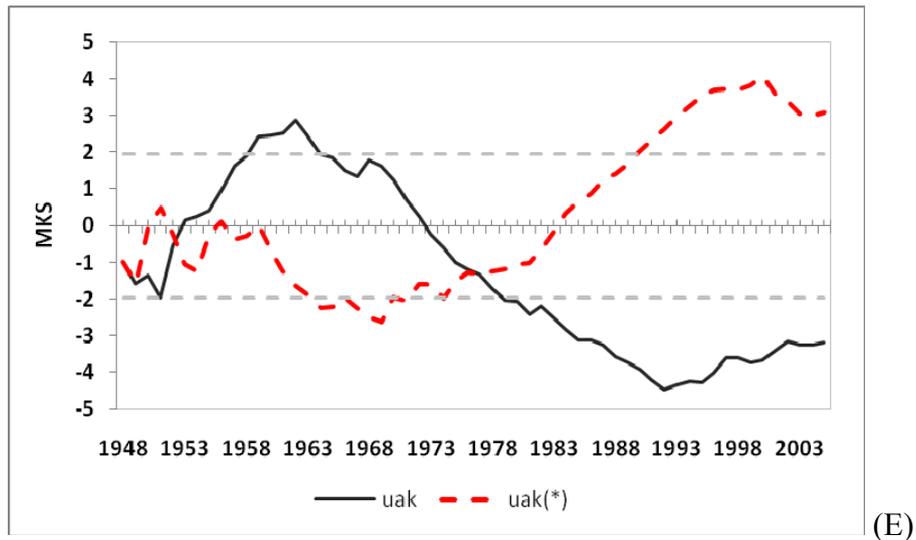
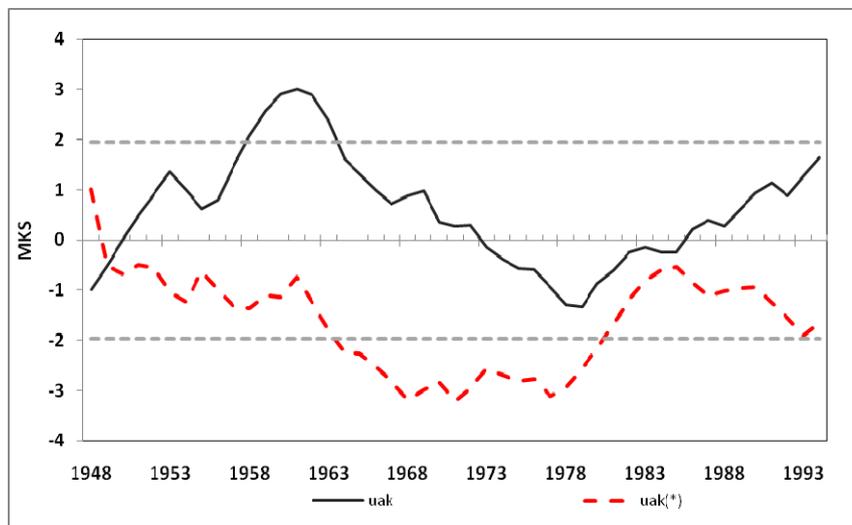


Figura 123. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (uak) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (uak^*) serie temporal inversa. C) Coloso y D) Corozal Substation

La figura 124 muestra las tendencias de las estaciones de Dos Bocas y Fajardo. Exceptuando la estación de Dos Bocas, Fajardo muestra claramente un ligero aumento desde el comienzo de la serie. Aunque Fajardo alcanzó valores significativos durante cinco años (entre los años 1959-1964), en seguida se mantuvo por debajo de la significación. Dos Bocas mostró una baja de la temperatura media anual desde 1977, seguidamente (1980) alcanzó valores por encima de 1.96 hasta el final de la serie.



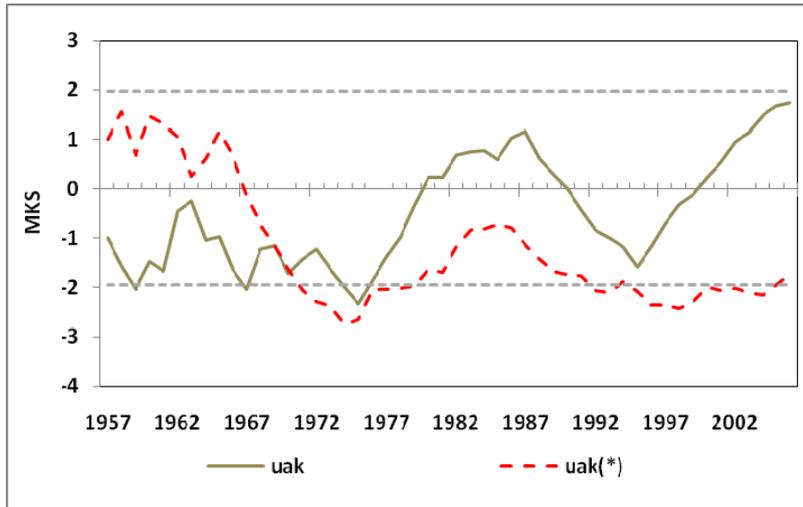
(E)



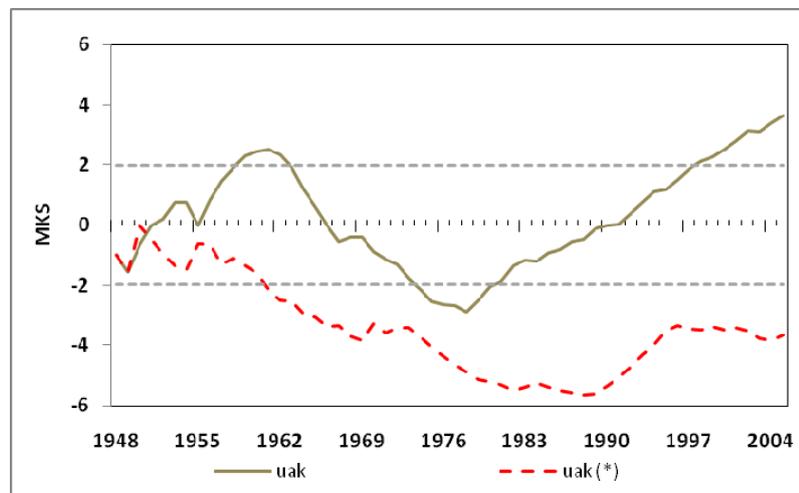
(F)

Figura 124. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. E) Dos Bocas y F) Fajardo.

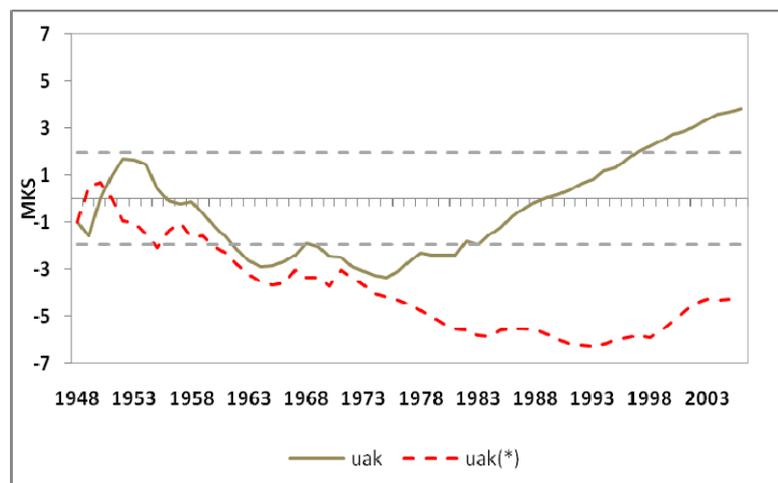
Las estaciones Gurabo Substation, Isabela Substation y Juncos también registran un ligero aumento de las temperaturas medias anuales. Las estaciones de Isabela Substation y Juncos muestran un comportamiento muy similar. Según los resultados de MKS, la estación Isabela Substation comienza su tendencia en el año 1950, mientras Juncos indica que su inicio fue en el 1958 (Fig. 125). Ambas estaciones alcanzaron valores significativos en el mismo año (Isabela Substation, 1997 y Juncos, 1997).



(G)



(H)



(I)

Figura 125. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. G) Gurabo Substation, H) Isabela Substation, I) Juncos.

Lajas, Manatí y Mayagüez mostraron tendencias positivas de la temperatura para la serie de años estudiados en cada estación (Fig. 126). La estación de Manatí nunca obtuvo valores por encima de 1.96 con el análisis de MKS, pero si Lajas y Mayagüez. Lajas marca su inicio en el año 1967 alcanzando valores significativos entre 1982-1989 y al final de la serie 2005-2006. Mayagüez mostró su inicio en el 1962 y se mantuvo con valores que sobrepasaban el 1.96 desde 1982 hasta finalizar la serie.

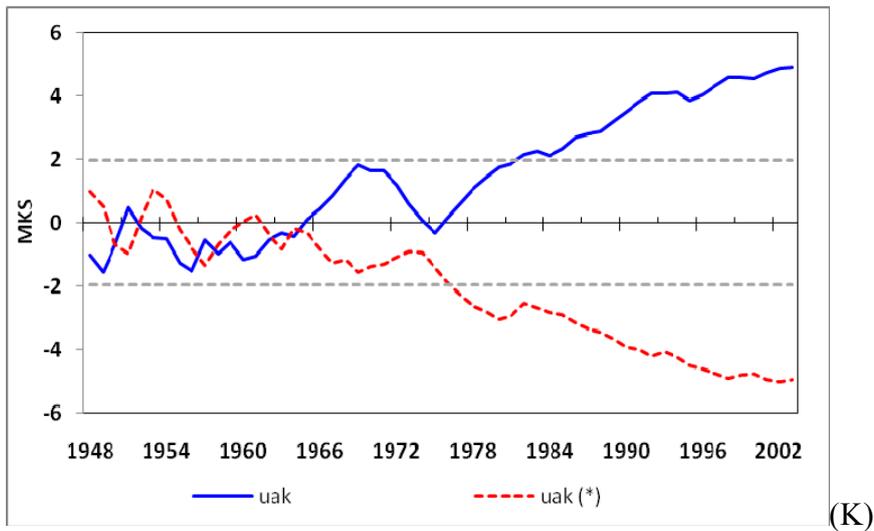
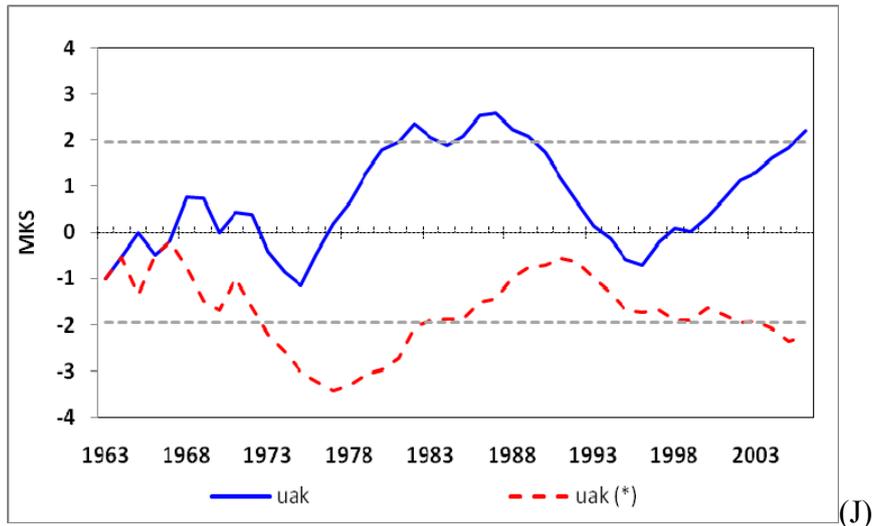


Figura 126. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. J) Lajas, K) Mayagüez.

En la figura 127, se observan las líneas de tendencias (MKS) de las estaciones Pico del Este y Ponce. Pico del Este, al igual que Dos Bocas, es una de las estaciones que curiosamente mostró tendencias regresivas de la temperatura media anual, con inicio en el año 1988. Ponce, por el contrario, mostró tendencias positivas comenzando desde 1956 y alcanzando valores significativos entre 1960-1969 y en el 2000 hasta el final de la serie analizada.

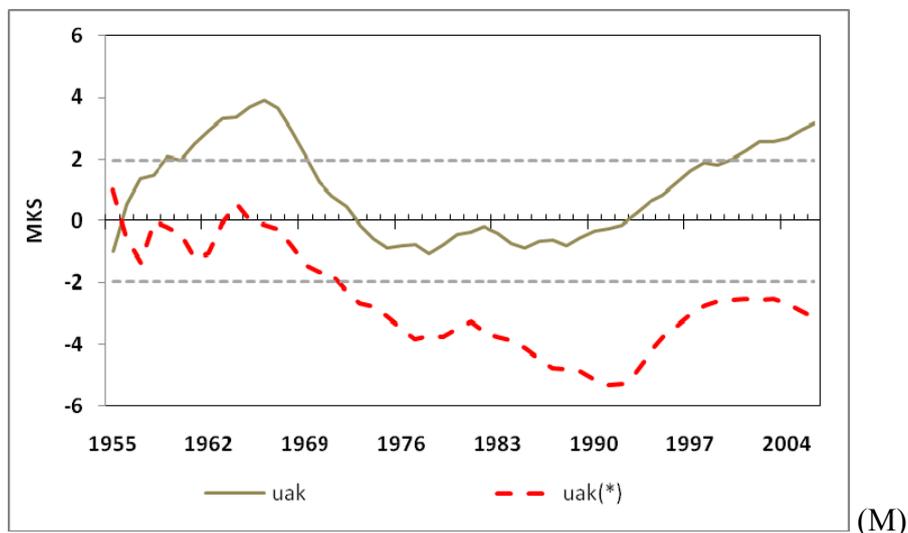
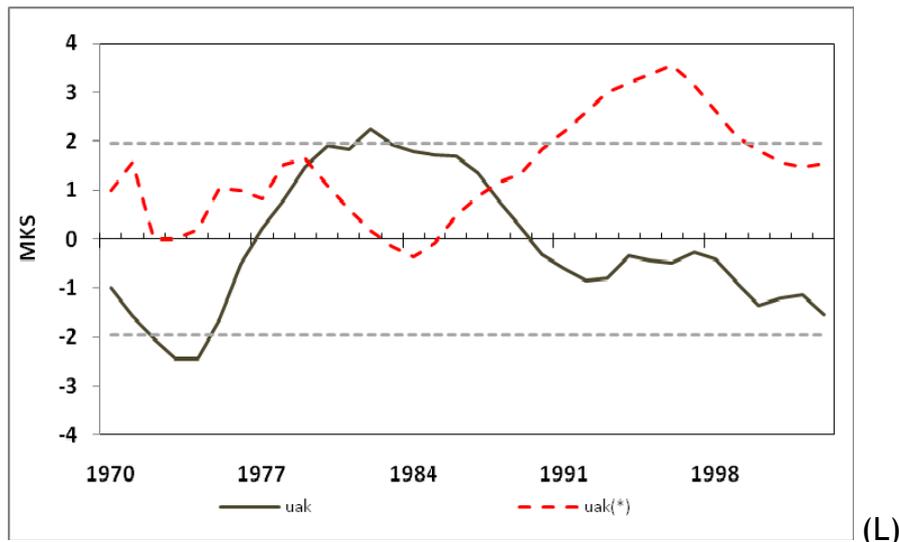


Figura 127. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. L) Pico del Este 1988, M) Ponce 1956, sig. 1960-1969 y 2000-2007

Las estaciones más cercanas a la capital (Río Piedras y San Juan WSFO), han mostrado un incremento claro de las temperaturas medias anuales y alcanzaron valores significativos. En la estación de San Juan WSFO, no se puede establecer el inicio, sin embargo alcanzó valores significativos a partir del año 1963 manteniéndose hasta el final de la serie (Fig. 128). Según parece, puede que no se observe el comienzo de la línea de tendencia debido, probablemente, a que comenzara antes de los años registrados y analizados en esta serie. Sin embargo, este aumento queda corroborado por otros autores. Velazquez-Lozada et al. (2006) mencionan que la temperatura en la ciudad de San Juan ha aumentado a una tasa de $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los últimos 40 años. Por otro lado, en la estación de Río Piedras se pudo detectar el comienzo en el año 1972, siendo significativa entre 1988-1992 y 1997 hasta el fin de la serie de años (2006).

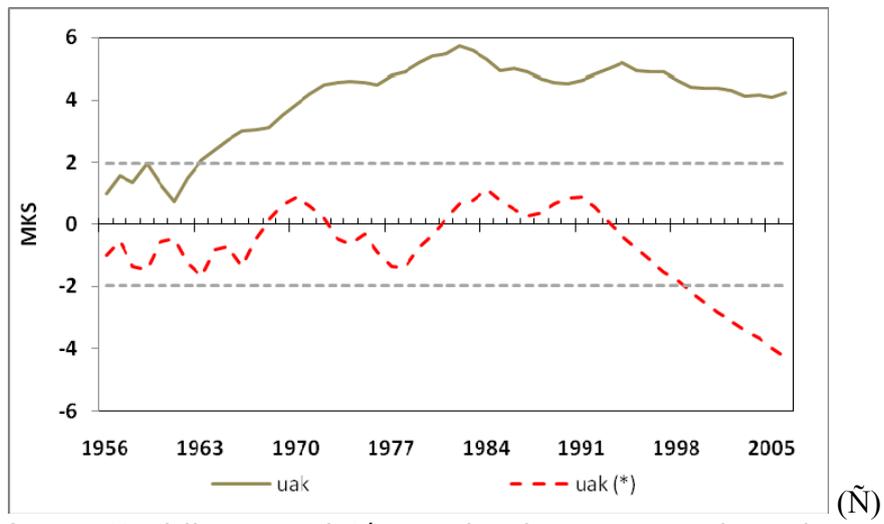
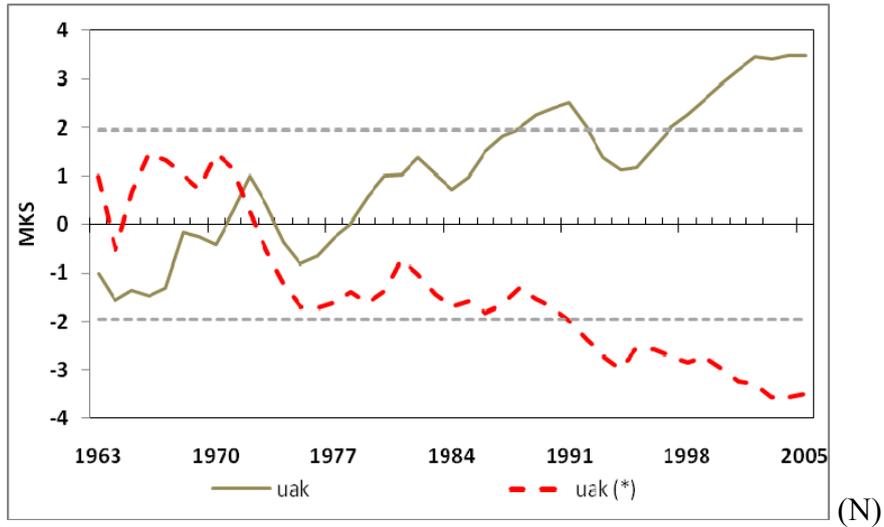


Figura 128. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. N) Río Piedras y Ñ) San Juan

Aplicando los mismos métodos, se hizo un análisis de las tendencias de temperatura media mensual para cada estación de la isla. Observando los resultados obtenidos hasta ahora con la temperatura media, no es sorprendente que casi todos los meses en todas las estaciones también muestren tendencias de aumento en la temperatura media y que la mayoría de ellos obtengan valores estadísticamente significativos (tablas 50 y 51). La estación de Dos Bocas, curiosamente, refleja tendencias regresivas en todos los meses. También destaca la estación Pico del Este, que en 11 de los 12 meses del año registró una tendencia regresiva de la temperatura.

Tabla 50. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) entre tiempo y temperatura media mensual.

ESTACIONES	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Adjuntas Substation	0.34	0.31	0.32	<i>0.45</i>	0.33	0.26	0.37	0.32	0.37	0.27	0.21	0.29
Cayey	0.08	-0.07	-0.25	-0.20	0.03	0.24	0.14	0.08	-0.04	-0.13	0.16	-0.07
Coloso	0.22	0.28	0.24	0.24	0.23	0.27	0.18	0.17	0.29	0.24	0.17	0.19
Corozal Substation	<i>0.44</i>	0.20	0.23	0.34	<i>0.44</i>	<i>0.49</i>	0.62	0.64	0.66	0.53	0.59	0.42
Dos Bocas	-0.14	-0.29	-0.35	-0.25	-0.30	-0.17	-0.30	-0.32	-0.16	-0.17	-0.43	-0.32
Fajardo	0.30	0.14	0.01	0.18	0.03	0.22	0.40	-0.03	0.26	0.22	0.37	0.19
Gurabo Substation	0.09	-0.03	-0.05	0.07	0.38	0.39	0.39	0.50	0.30	0.23	0.22	0.05
Isabela Substation	0.25	0.33	0.28	0.30	0.38	0.50	0.37	0.50	0.43	0.44	0.31	0.38
Juncos ISE	<i>0.37</i>	<i>0.37</i>	<i>0.42</i>	<i>0.42</i>	<i>0.41</i>	<i>0.49</i>	<i>0.53</i>	0.50	0.53	0.47	0.29	0.29
Lajas Substation	0.19	0.06	0.15	0.30	0.31	0.32	0.45	0.50	0.42	0.34	0.29	0.28
Manatí	0.09	0.05	-0.04	0.05	0.14	0.25	0.17	0.15	0.11	0.06	0.18	0.20
Mayaguez City	0.58	0.47	0.38	0.23	0.30	0.36	0.55	0.52	0.60	0.64	0.65	0.60
Pico del Este	-0.12	-0.09	-0.13	-0.07	-0.28	-0.10	-0.32	-0.25	-0.20	-0.17	-0.09	0.07
Ponce	0.35	0.16	0.12	0.24	0.25	0.39	0.38	0.51	0.36	0.27	0.30	0.28
Río Piedras	<i>0.43</i>	0.28	<i>0.37</i>	<i>0.47</i>	<i>0.43</i>	<i>0.53</i>	<i>0.53</i>	0.59	0.67	0.47	0.36	0.39
San Juan WSFO	0.35	<i>0.39</i>	<i>0.44</i>	<i>0.50</i>	0.60	<i>0.57</i>	<i>0.46</i>	<i>0.56</i>	<i>0.61</i>	<i>0.49</i>	<i>0.42</i>	0.34

N- valores carentes de significación estadística. Negritas: Correlación significativa al nivel de 0.05.

Negritas/Cursivas: Correlación significativa al nivel de 0.01.

Tabla 51. El estadístico Mann-Kendall entre tiempo y temperatura media mensual.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Adjuntas Substation	13.3	15.7	12.4	16.3	12.5	10.4	15.9	15.7	17.3	12.5	8.7	13.9
Cayey	3.4	-1.1	-5.7	-4.0	1.3	5.9	4.5	4.3	-1.8	-4.7	5.2	-2.4
Coloso	15.3	18.7	19.6	15.7	13.3	16.8	10.7	9.8	19.4	16.7	10.9	11.9
Corozal Substation	27.0	13.8	15.0	19.7	28.5	30.5	40.6	52.9	51.7	37.2	44.8	28.7
Dos Bocas	-10.4	-15.4	-19.9	-8.9	-17.9	-11.0	-21.3	-18.5	-14.7	-13.4	-24.3	-20.0
Fajardo	14.8	6.9	0.2	8.5	0.1	12.7	20.2	-2.0	13.4	10.9	19.8	10.6
Gurabo Substation	4.8	-1.1	-4.3	3.3	20.4	20.8	22.2	28.4	19.6	13.9	13.1	0.5
Isabela Substation	16.6	21.1	17.5	18.7	22.9	37.1	24.6	39.2	36.5	31.9	20.9	25.6
Juncos ISE	23.6	25.7	29.3	25.6	26.4	33.7	35.9	34.3	41.8	32.4	17.5	16.1
Lajas Substation	9.7	1.8	5.7	13.3	14.6	16.0	22.4	23.9	19.6	20.8	27.7	14.1
Manatí	5.2	2.0	-3.1	2.7	6.4	12.4	8.2	7.7	5.5	3.4	8.9	9.9
Mayaguez City	37.9	34.7	29.3	17.1	14.4	16.6	28.1	35.7	40.8	37.8	39.1	44.7
Pico del Este	-4.4	-4.1	-2.7	-2.3	-11.1	-3.5	-13.0	-9.6	-7.1	-5.0	-3.0	1.5
Ponce	20.0	9.9	6.7	13.3	15.4	22.6	20.0	29.1	21.3	15.6	17.4	16.7
Río Piedras	21.4	15.1	18.1	18.8	18.5	22.7	30.9	28.4	38.6	23.9	16.5	17.3
San Juan WSFO	16.4	19.1	22.9	22.9	29.6	25.7	18.9	25.9	27.8	20.9	18.5	17.3

Negritas: $|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

Los resultados de ambos análisis estadísticos aplicados a las temperaturas máximas y mínimas anuales, reflejan una fuerte tendencia positiva de la temperatura con excepción de algunas estaciones como Cayey, Pico del Este y Dos Bocas (tablas 52 y 53). Estas tres estaciones han mostrado tendencias regresivas en la temperatura media anual, la máxima anual, la mínima y en casi todos los meses del año.

Tabla 52. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y el estadístico Mann-Kendall entre tiempo y temperatura máxima anual.

ESTACIONES	Rho de Spearman	Significación Estadística	S de (MK)	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Adjuntas Substation	0.35	*	181	5.8	Si 0.0001
Cayey	0.14	N	123	5.1	Si 0.0001
Coloso	0.30	*	318	18.5	Si 0.0001
Corozal Substation	0.57	**	650	37.9	Si 0.0001
Dos Bocas	-0.34	**	-380	-18.7	Si 0.0001
Fajardo	0.29	*	243	16.6	Si 0.0001
Gurabo Substation	0.42	**	364	28.5	Si 0.0001
Isabela Substation	0.49	**	602	37.2	Si 0.0001
Juncos ISE	0.52	**	653	37.6	Si 0.0001
Lajas Substation	0.46	**	305	22.5	Si 0.0001
Manatí	0.30	*	244	13.5	Si 0.0001
Mayaguez City	0.72	**	718	48.0	Si 0.0001
Pico del Este	-0.11	N	-46	-3.8	Si 0.0001
Ponce	0.52	**	489	27.4	Si 0.0001
Río Piedras	0.59	**	378	29.3	Si 0.0001
San Juan WSFO	0.58	**	563	25.7	Si 0.0001

N- valores carentes de significación estadística. * Correlación significativa al nivel de 0.05.

** Correlación significativa al nivel de 0.01.

Tabla 53. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y el estadístico Mann-Kendall entre tiempo y temperatura mínima anual.

ESTACIONES	Rho de Spearman	Significación Estadística	S de (MK)	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Adjuntas Substation	0.26	N	124	5.7	Si 0.0001
Cayey	-0.10	N	-66	-3.3	Si 0.0003
Coloso	0.25	N	348	18.6	Si 0.0001
Corozal Substation	0.31	*	347	22.7	Si 0.0001
Dos Bocas	-0.30	*	-413	-19.6	Si 0.0001
Fajardo	0.16	N	118	6.9	Si 0.0001
Gurabo Substation	-0.01	N	-11	-0.8	No
Isabela Substation	0.24	N	283	14.3	Si 0.0001
Juncos ISE	0.40	**	513	28.4	Si 0.0001
Lajas Substation	-0.02	N	-22	-1.88	Si 0.0301
Manatí	0.08	N	55	3.4	Si 0.0003
Mayaguez City	0.51	**	648	36.3	Si 0.0001
Pico del Este	-0.18	N	-84	-6.6	Si 0.0001
Ponce	0.15	N	187	10.2	Si 0.0001
Río Piedras	0.33	*	240	17.0	Si 0.0001
San Juan WSFO	0.33	*	315	15.5	Si 0.0001

$|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

No obstante, con estos resultados se demuestra nuevamente que las temperaturas medias, máximas y mínimas anuales están en aumento a escala insular. Como se puede observar en las tablas 52 y 53, no solo ha incrementado la temperatura máxima anual sino que también la mínima ha mostrado un aumento significativo en la mayoría de las estaciones.

Aplicando MKS para la temperatura máxima anual, se pueden confirmar las tendencias encontradas en los estadísticos anteriores en todas las estaciones (Fig. 129). Además, de

las 16 estaciones, en 14 de ellas se pudo identificar el comienzo del incremento de la temperatura máxima anual alcanzando valores significativos en algunas. En muchas de ellas, concuerda el año de inicio de la temperatura máxima anual con el año de inicio de la temperatura media anual.

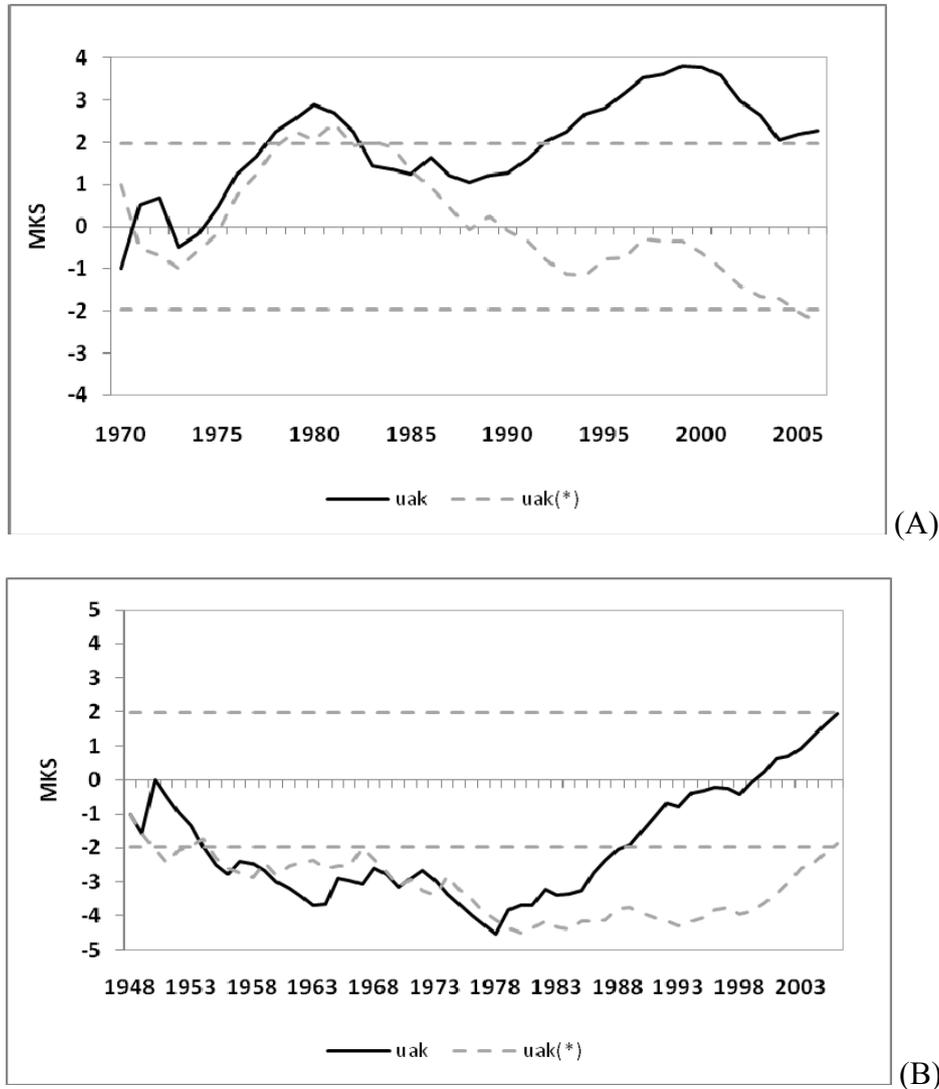
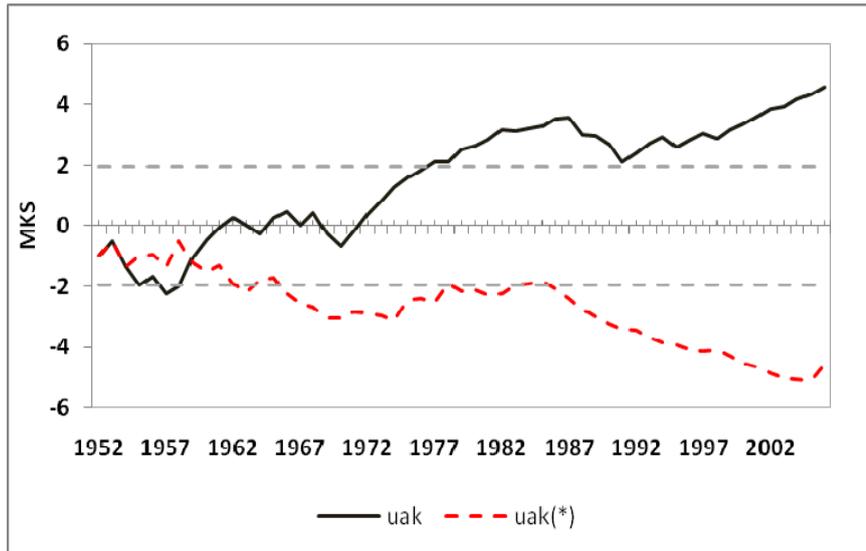
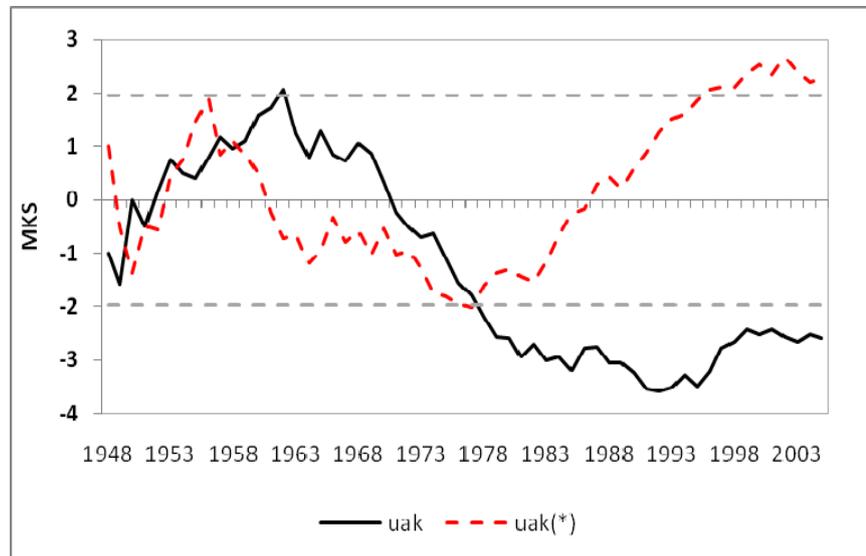


Figura 129. Mann-Kendall secuencial. Temperatura Máxima Anual. Línea azul (uak) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (uak^*) serie temporal inversa. A) Adjuntas Substation y B) Coloso.

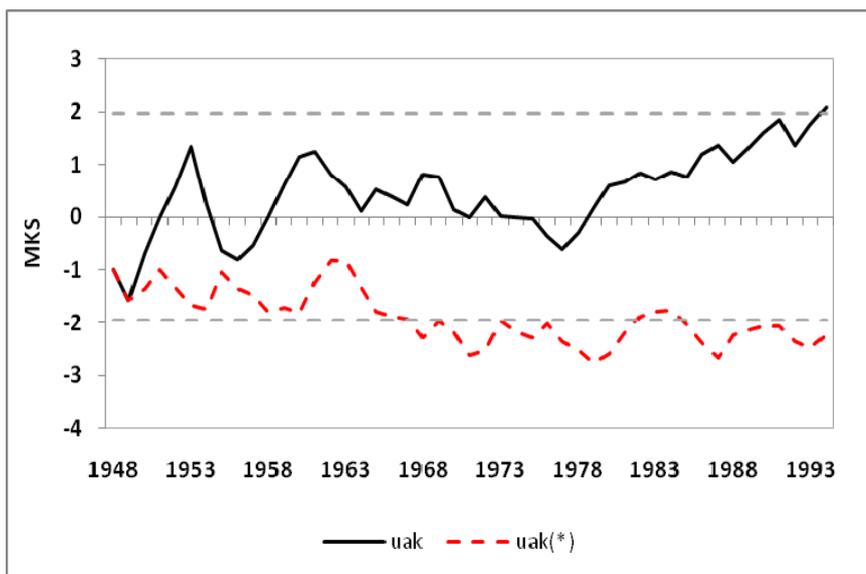
Vale mencionar la estación de Dos Bocas, puesto que de las tres estaciones que mostraron tendencias regresivas con las temperaturas, esta ha sido la única donde se ha podido identificar el año de inicio con Mann-Kendall Secuencial (Figs. 130-133).



(A)

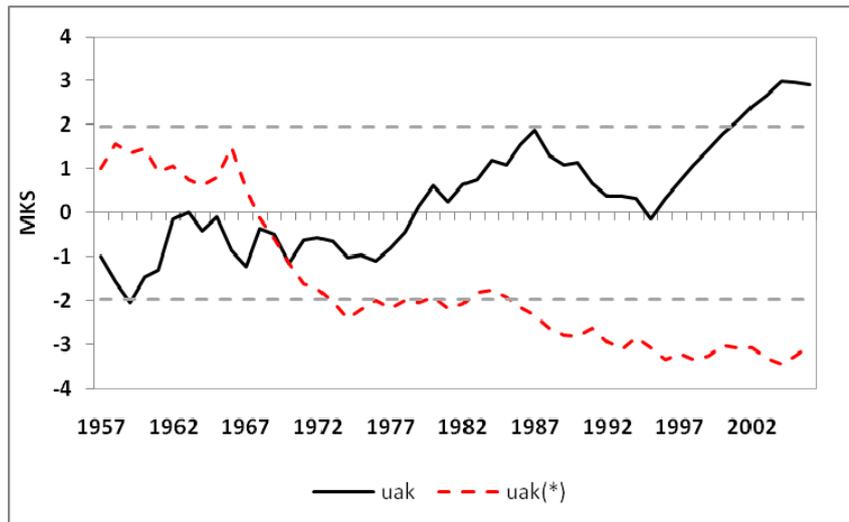


(B)

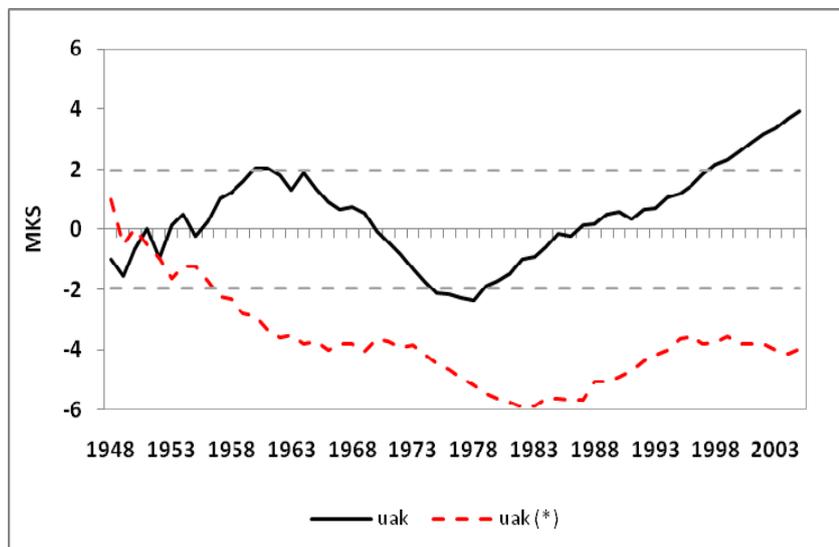


(C)

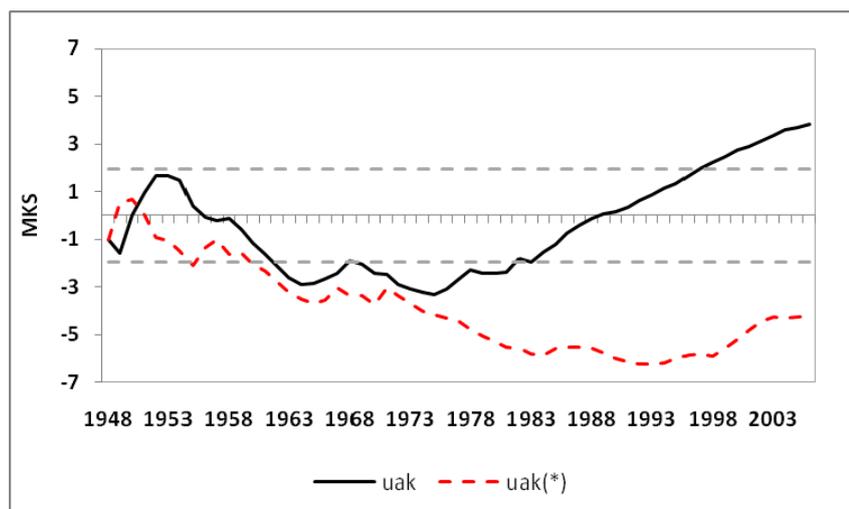
Figura 130. Mann-Kendall secuencial. Temperatura Máxima Anual. Línea azul (uak) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (uak^*) serie temporal inversa. A) Corozal Substation, B) Dos Bocas y C) Fajardo.



(A)

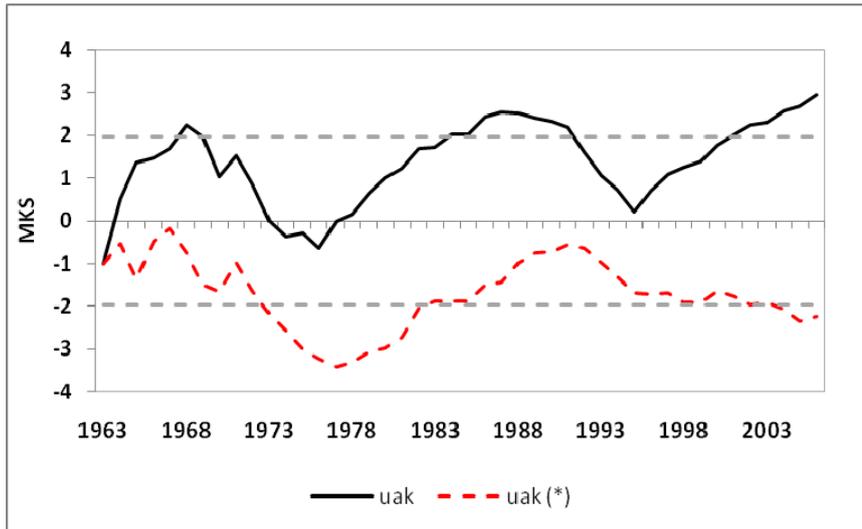


(B)

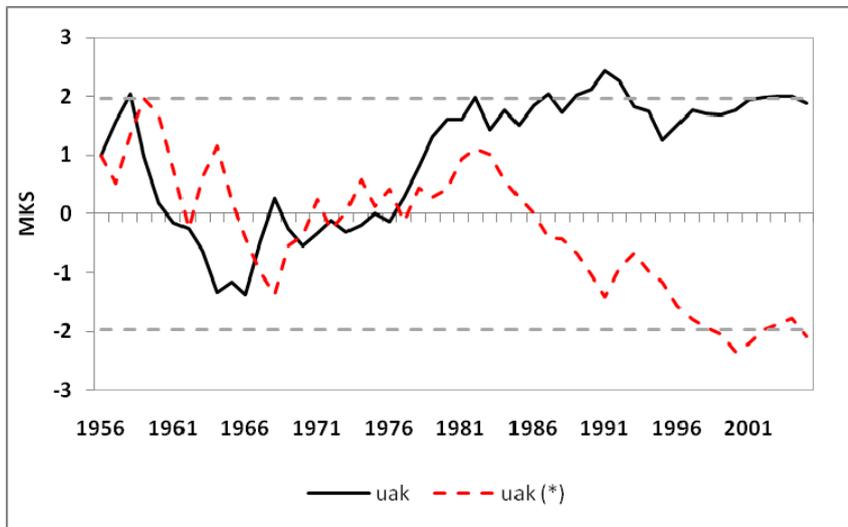


(C)

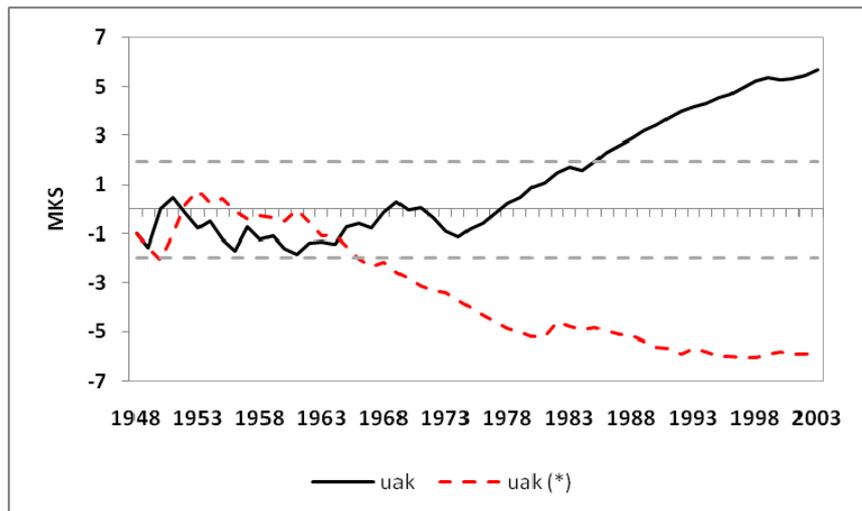
Figura 131. Mann-Kendall secuencial. Temperatura Máxima Anual. Línea azul (uak) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (uak^*) serie temporal inversa. A) Gurabo Substation, B) Isabela Substation y C) Juncos.



(A)

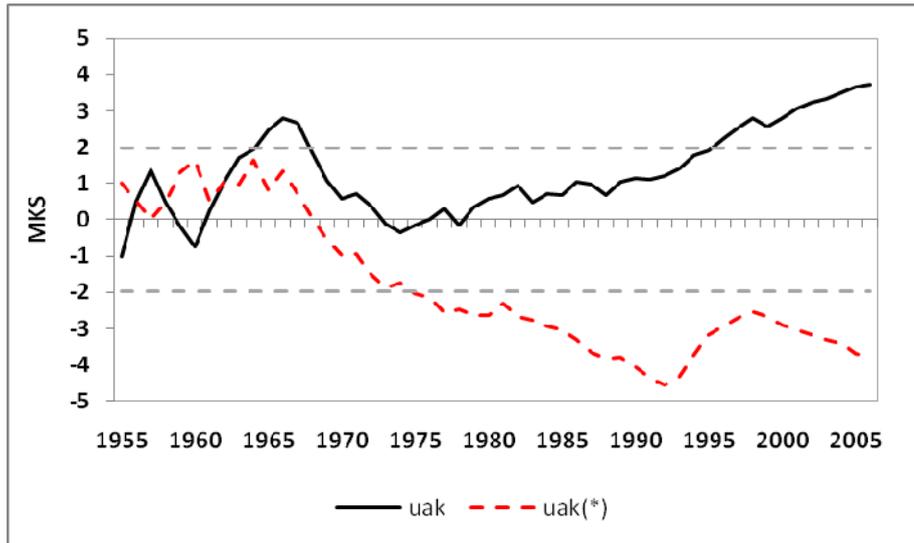


(B)

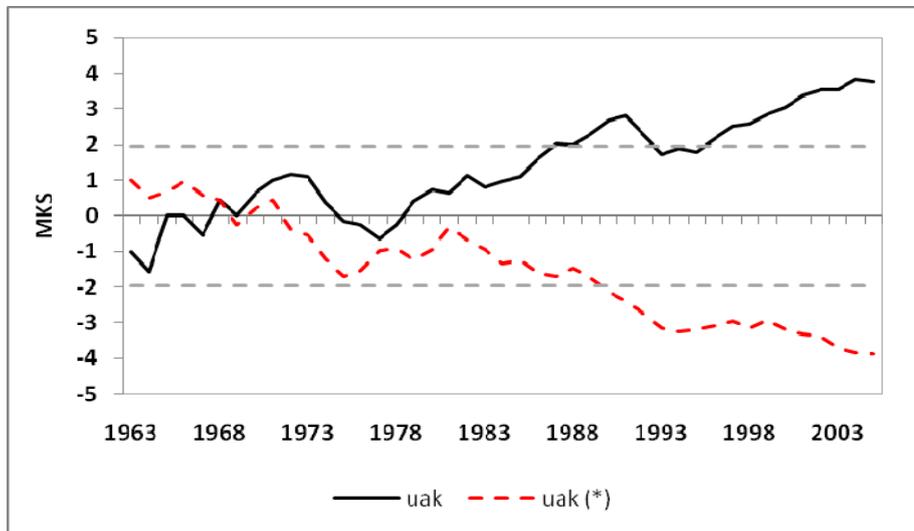


(C)

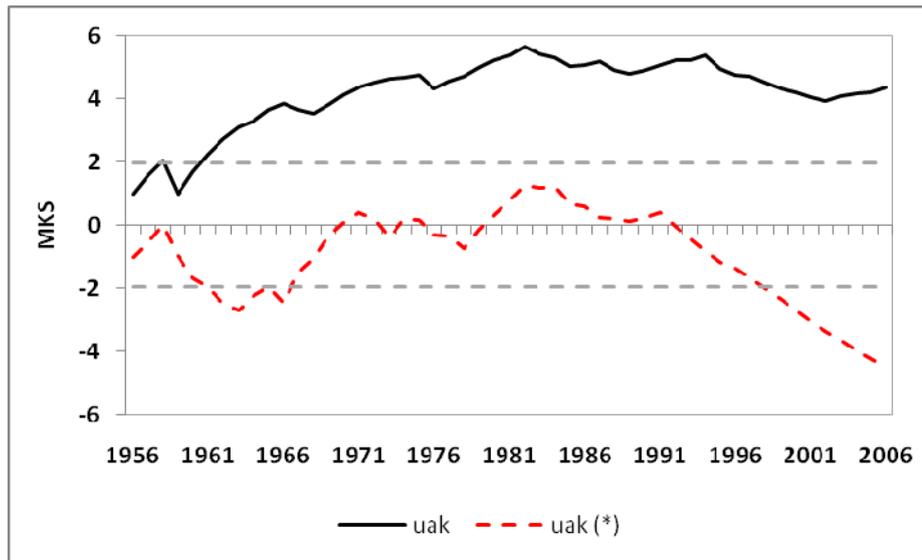
Figura 132. Mann-Kendall secuencial. Temperatura Máxima Anual. Línea azul (uak) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (uak^*) serie temporal inversa. A) Lajas Substation, B) Manatí y C) Mayagüez.



(A)



(B)



(C)

Figura 133. Mann-Kendall secuencial. Temperatura Máxima Anual. Línea azul (*uak*) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (*uak**) serie temporal inversa. A) Ponce, B) Río Piedras y C) San Juan.

Aunque se entiende que el aumento en la temperatura puede ser resultado de actuaciones locales como la expansión urbanística (Tayanç y Toro, 1997), estas tendencias en las temperaturas de Puerto Rico al parecer también responden a un patrón global observado en distintas partes del planeta (Bonfils et al. 2007. Gallo, 1999). Según Bonfils et al. (2007) entre 1951-1999, en California encontraron un patrón consistente de incremento en la temperatura media anual. Las tendencias detectadas no solo responden a la temporada de invierno sino que también se han observado en primavera y verano.

En el Caribe, Centella et al. (1999) mencionan que en la isla de Cuba la temperatura media anual ha incrementado 0.5°C y han identificado las décadas más calurosas en 1980 y mediados de 1990. En muchas de las estaciones en Puerto Rico el año 1998 se identificó como uno de los más cálidos. En las islas de Trinidad y Tobago un estudio ha evidenciado el incremento de 1.5°C de la temperatura media entre 1946-1995 (Singh, 1997).

Vose et al. (2005) encontraron que de manera general, las temperaturas a escala global (máximas y mínimas) entre 1950-2004 incrementaron ($0.14-0.20^{\circ}\text{C}$) desde mediados de 1970 hasta el presente. En este análisis destaca que dentro de los patrones globales de aumento en las temperaturas quedan excluidos el norte de Perú, norte de Argentina, el noroeste de Australia y parte del Océano Pacífico norte. Queda establecido que la mitad del siglo XX ha mostrado un ligero incremento de las temperaturas en ciertas partes del planeta, siendo más intenso en unos lugares que en otros.

8. CARACTERÍSTICAS Y ANÁLISIS DE TENDENCIAS HIDROLÓGICAS



Salto Curet. Maricao, PUERTO RICO

8. CARACTERÍSTICAS Y ANÁLISIS DE TENDENCIAS HIDROLÓGICAS

8.1 Características Hidrológicas: Cuenca Río Grande de Arecibo, Río Tanamá

Para el análisis hidrológico de esta cuenca se utilizó la estación hidrológica USGS 50028000 Río Tanamá NR Utuado, ubicada en el municipio de Utuado (Fig. 134). El Río Tanamá cuenta en esa estación con un caudal medio de 1.38 m³/s y una aportación media anual de 43.5 hm³ (Foto 1).

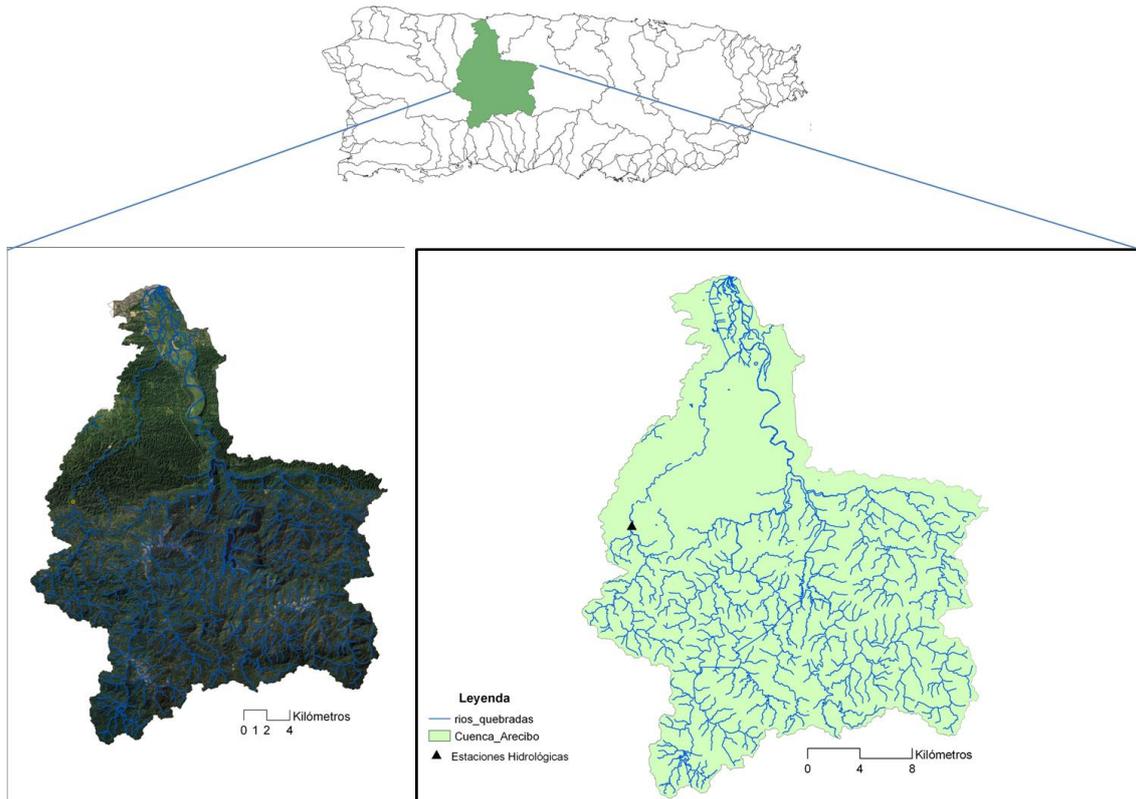


Figura 134. Cuenca Río Grande de Arecibo y ubicación de estación hidrológica 50028000 Río Tanamá NR Utuado.

El río muestra un régimen pluvial-tropical con dos estaciones, una seca y otra con caudal abundante. Presenta una disminución progresiva en el caudal al comienzo del año hidrológico que dura hasta la primavera (Fig. 135). 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.



Foto 1. Río Tanamá, en Arecibo.

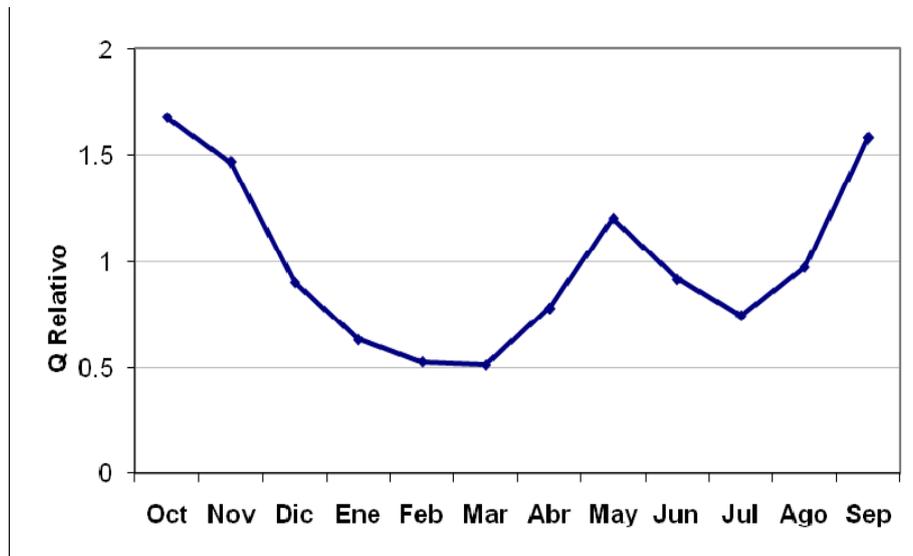


Figura 135. Caudal Relativo. Río Tanamá (1960-2004).

En relación a los caudales mensuales, octubre es el mes que presenta valores más altos ($2.31 \text{ m}^3/\text{s}$) y marzo es el que menos muestra ($0.71 \text{ m}^3/\text{s}$). Los caudales mínimos se encuentran en los meses de invierno y los máximos en los meses de verano y otoño (tabla 54). Los meses de primavera muestran una variabilidad más alta, y abril es el que presenta el valor más elevado con 76% de coeficiente de variación (Fig. 136), mientras febrero es el de menor variabilidad (31%).

Tabla 54. Datos de Caudal (Q) medio, caudal relativo, coeficiente de variación (CV) y caudal específico. Río Tanamá (1960-2004)

Periodo	Q Medio (m ³ /seg)	Q Relativo	Q Especifico l/s/km ²	C.V.%
Anual	1.38	1.00	13.13	27.9
Octubre	2.31	1.68	22.04	44.0
Noviembre	2.02	1.47	19.31	45.6
Diciembre	1.24	0.90	11.83	46.1
Enero	0.87	0.63	8.28	36.9
Febrero	0.73	0.53	6.93	31.4
Marzo	0.71	0.51	6.74	47.5
Abril	1.07	0.78	10.23	76.4
Mayo	1.66	1.20	15.79	69.9
Junio	1.26	0.92	12.02	49.4
Julio	1.03	0.74	9.78	39.0
Agosto	1.34	0.97	12.77	41.8
Septiembre	2.18	1.58	20.79	51.4

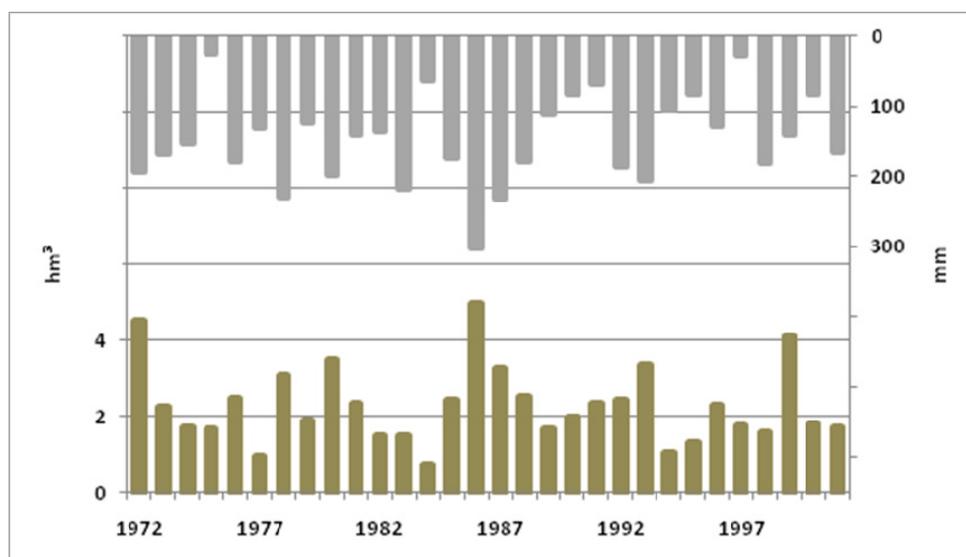


Figura 136. Aportación abril y precipitación. Cuenca Río Grande de Arecibo.

El Río Tanamá muestra un coeficiente de variación diario muy alto, de 139.3%. Para ratificar la alta variabilidad que presenta este río, cabe mencionar el valor registrado en 1998 con el huracán *Georges*. El 21-22 de septiembre de 1998, el huracán *Georges* había pasado por el centro de la isla de Puerto Rico (Fig. 137). Este huracán categoría 3, sostenía vientos medios de 185 km/hora y atravesó la isla de este oeste. El caudal diario máximo del Río Tanamá mostró valores de 92.31 m³/s el 22 de septiembre de 1998 (Fig. 138), 62 veces superior a la media.

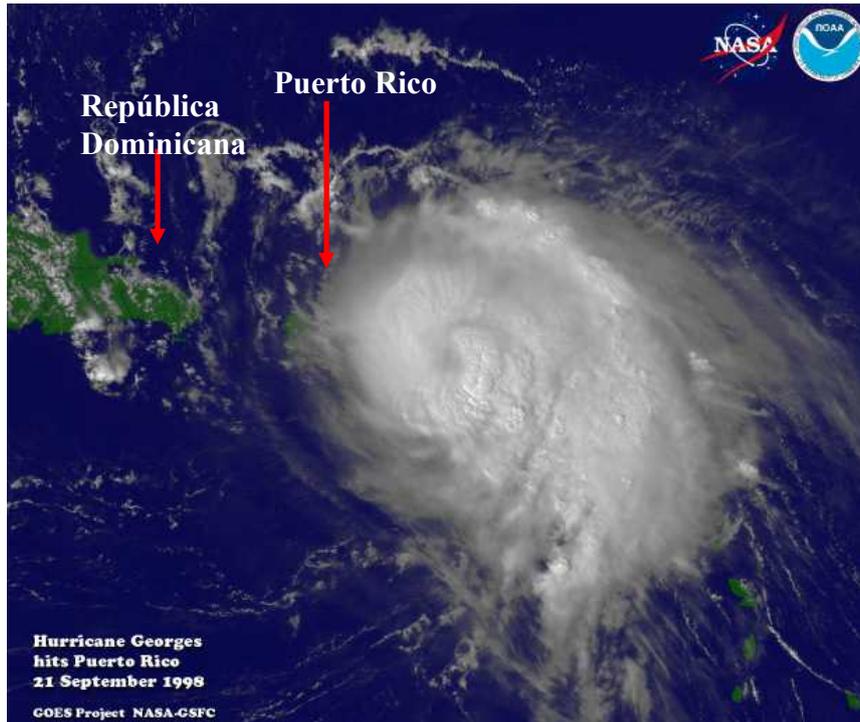


Figura 137. Huracán *Georges* al paso por la isla de Puerto Rico 21-22 de septiembre de 1998.
Fuente: NASA

Por otro lado, el 15 de agosto de 1994, el río registró valores de $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$, 9 veces por debajo de la media. El valor mínimo de caudal diario coincide con el año más seco encontrado en los datos de precipitación.

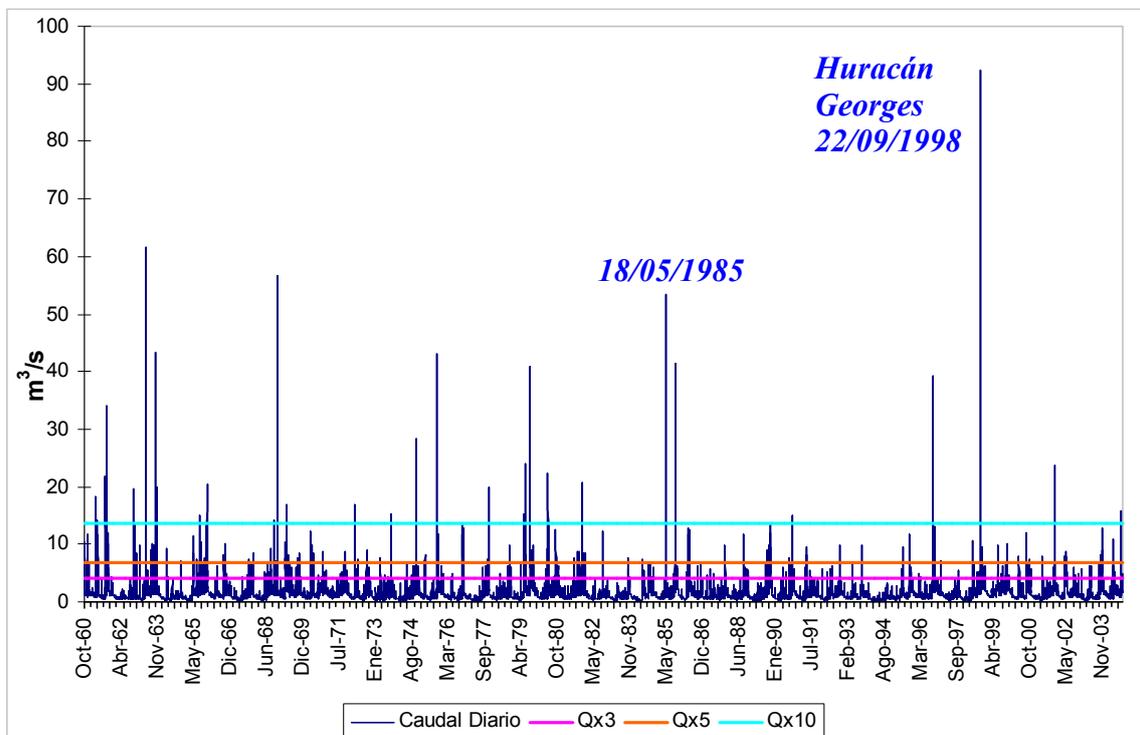


Figura 138. Caudales diarios y sus coeficientes Qx3, Qx5, Qx10 del caudal medio en el periodo hidrológico de 1960-2004. Río Tanamá

El caudal medio diario es de 1.38 m³/s. De 16071 episodios registrados (Fig. 139), desde 1960 hasta 2004, el 30.1% (4835 episodios) supera el caudal medio. Así, surgen 583 episodios (3.6%) que triplican el caudal medio, 192 episodios (1.2%) que lo quintuplican y 36 episodios (0.2%) que alcanzan superarlo por diez. En la gran mayoría de los casos, el 99.5%, el caudal diario se encuentra entre 0 y 10 m³/s. Sólo el 0.5% restante varía entre 11 y 100 m³/s.

En la figura 54, se observa la distribución de frecuencia de caudal del Río Tanamá donde 15996 episodios sobre 16071 se encuentran entre 0 y los 10 m³/s. Esto significa una gran mayoría, alcanzando el 99.5% de las ocasiones. Sólo 75 episodios (0.5%) superan los 10 m³/s de los cuales 58 episodios (77.3%) se encuentran entre los 11 y los 20 m³/s.

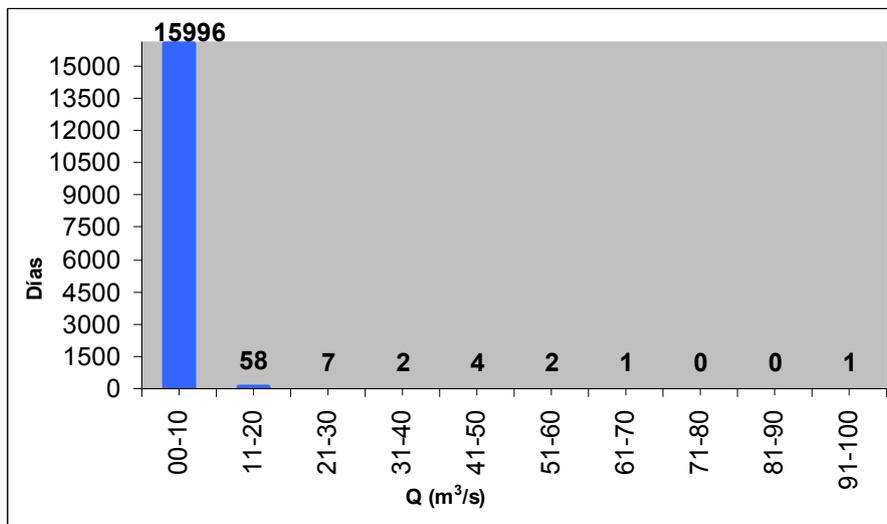


Figura 139. Distribución de Frecuencias de los caudales diarios. Río Tanamá (1960-2004)

El río registra una variabilidad anual de 28 %. Los coeficientes de variación anuales no muestran una tendencia con Rho Spearman ($r_s = 0.05$). El año 1963 mostró la menor variabilidad anual, con un 17 % y la más alta fue en 1994, con un 64 % (Fig. 140).

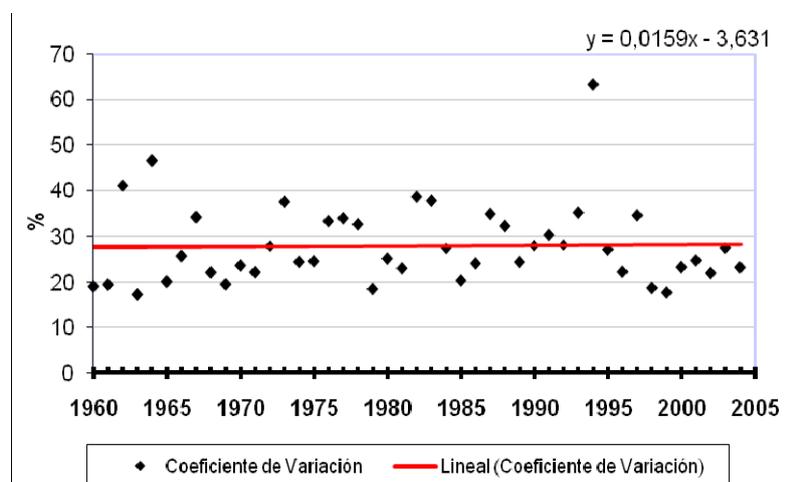


Figura 140. Coeficiente de variación anual. Río Tanamá (1960-2004)

El Río Tanamá tiene una aportación media anual de 43.5 hm³ (tabla 55). En 1963 se dio la aportación anual máxima con 64.9 hm³, un 33% por encima de la media anual. La aportación media anual mínima se registró en el 1994 con 17.7 hm³ (59% por debajo de la media).

Octubre fue el mes que mostró una aportación máxima con 6.08 hm³ y la mínima se presenta en el mes de marzo con 1.86 hm³. Los valores máximos de aportación mensual se encuentran en septiembre de 1998 (mes que pasaba el huracán *Georges* por la isla) con 14.94 hm³, triplicando el valor promedio del mes de septiembre, seguido por el mes de octubre (14.48 hm³). Los valores más bajos se observan en julio de 1994, con una aportación de 0.68 hm³ mensual, muy por debajo de la mitad del valor medio.

Tabla 55. Valores Característicos de la aportación media anual y mensual. Río Tanamá (1960-2004)

	Media (hm ³)	Mediana (hm ³)	Desv. Estad.	Mínimo (hm ³)	Máximo (hm ³)
Anual	43.19	42.77	11.12	17.75	64.93
Octubre	6.08	5.70	2.67	1.89	14.48
Noviembre	5.33	4.56	2.43	1.87	11.84
Diciembre	3.26	2.78	1.50	1.34	8.98
Enero	2.29	2.01	0.84	1.09	5.28
Febrero	1.91	1.84	0.60	0.99	3.78
Marzo	1.86	1.68	0.88	0.82	5.30
Abril	2.82	2.31	2.16	0.72	11.26
Mayo	4.36	3.38	3.05	0.92	14.37
Junio	3.32	2.87	1.64	1.16	8.73
Julio	2.70	2.58	1.05	0.68	4.89
Agosto	3.52	3.13	1.47	1.19	8.21
Septiembre	5.74	4.98	2.95	1.86	14.94

8.1.1 Tendencias. Río Tanamá

La aportación anual del Río Tanamá muestra grandes fluctuaciones y una irregularidad constante en su serie de registros (Fig. 141). Un primer ciclo va desde 1967 hasta 1972 con una variabilidad del 21%. Luego iría otro gran ciclo del 1987 hasta 1995 con una variabilidad del 22% y luego el último que va desde 1998 hasta 2004 con un 15% de variabilidad. Sin embargo, del 2001 al 2004 se observa una cierta regularidad en el tiempo con una variabilidad que apenas alcanza el 9%. Estas fluctuaciones muestran, en cierta manera, los periodos secos y húmedos de toda la serie.

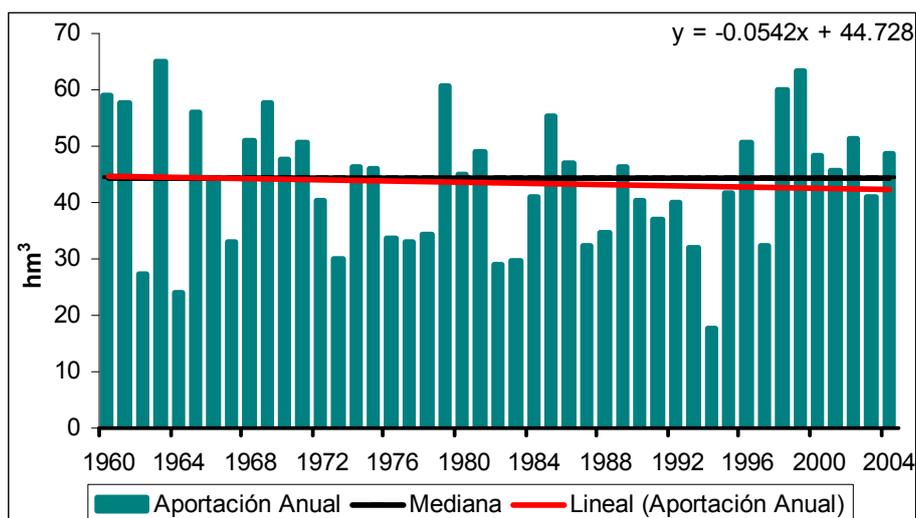


Figura 141. Aportación Anual, representación de la mediana y línea de tendencia. Río Tanamá (1960-2004)

El cálculo de Rho de Spearman para cuantificar la tendencia apunta un valor de $r_s = -0.05$. Igualmente, cuando se aplica este estadístico para cuantificar las tendencias mensuales se dan valores algo más representativos, aunque todos carecen de significación estadística (tabla 56). No obstante, con MK se han confirmado los patrones en casi todos los meses, con excepción de noviembre, marzo agosto y septiembre que no ha sido posible identificar evolución anual. Los cuatro meses juntos representan el 38% del agua que corre por el cauce. Por otro lado los meses de octubre, mayo y junio (que entre ellos contribuyen con 31%), han expresado un incremento anual mientras diciembre, enero, febrero, abril y julio (que simbolizan el restante 30% del agua) han mostrado una disminución para los años de análisis.

Tabla 56. Coeficiente de Correlación entre tiempo y aportación mensual y anual. Río Tanamá (1960-2004)

	Rho Spearman	Significación Estadística	MK	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Anual	-0.05	N	-38	-2.88	Si 0.002
Octubre	0.17	N	92	7.20	Si 0.0001
Noviembre	-0.01	N	-7	-0.57	No
Diciembre	-0.07	N	-58	-3.76	Si 0.001
Enero	-0.04	N	-35	-2.34	Si 0.009
Febrero	-0.07	N	-46	-2.98	Si 0.001
Marzo	-0.04	N	-20	-1.31	No
Abril	-0.05	N	-34	-2.14	Si 0.0162
Mayo	0.16	N	108	6.48	Si 0.0001
Junio	0.07	N	28	2.20	Si 0.0139
Julio	-0.14	N	-94	-6.98	Si 0.0001
Agosto	-0.01	N	12	0.78	No
Septiembre	0.02	N	2	0.20	No

N= valores no significativos. $|Z| > 1.645$ se rechaza hipótesis nula de no tendencia. Valor $p < 0.05$ se rechaza hipótesis nula de no tendencia.

El cálculo del estadístico Mann-Kendall (MK) confirma la tendencia regresiva que muestra Rho Spearman (tabla 37). MK obtiene un valor de -38 y de acuerdo a los

resultados obtenidos del estadístico $|Z| > 1.645$, se rechaza la hipótesis nula de no tendencia. De esta forma, se afirma entonces que existe una tendencia regresiva en la aportación anual del Río Tanamá. Sin embargo, no fue posible identificar el inicio de la misma con MKS.

En cuanto a los caudales máximos del río Tanamá, se han podido detectar varias tendencias (tabla 57). Se observa que MK expresa un ligero patrón a la disminución y que diez de los doce meses con valores regresivos obtuvieron resultados significativos con este mismo análisis. Cabe señalar que el mes de enero es el único que presenta un aumento en los caudales máximos entre 1960-2004.

Tabla 57. Coeficiente de Correlación entre tiempo y caudal máximo mensual y anual. Río Tanamá (1960-2004).

	Rho Spearman	Significación Estadística	MK	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Anual	-0.12	N	-63	-4.97	Si 0.0001
Octubre	-0.02	N	-25	-1.75	Si 0.04
Noviembre	-0.17	N	-113	-7.14	Si 0.0001
Diciembre	-0.05	N	-18	-1.16	No
Enero	0.14	N	84	6.00	Si 0.0001
Febrero	-0.07	N	-52	-3.2	Si 0.0007
Marzo	-0.01	N	9	0.44	No
Abril	-0.10	N	-42	-2.56	Si 0.005
Mayo	0.15	N	105	6.10	Si 0.0001
Junio	-0.11	N	-56	-4.18	Si 0.0001
Julio	-0.10	N	-57	-3.33	Si 0.0004
Agosto	-0.12	N	-72	-4.26	Si 0.0001
Septiembre	-0.12	N	-77	-5.15	Si 0.0001

N= valores no significativos

$|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

8.2 Características Hidrológicas: Cuenca Río Grande de Manatí

Para el análisis hidrológico de la Cuenca del Río Grande de Manatí se utilizó la estación de USGS 50035000 Río Grande de Manatí, ubicada en el municipio de Ciales (Fig. 142 y Foto 2). Este río cuenta con un caudal medio de 6.99 m³/s y una aportación media anual de 220 hm³.

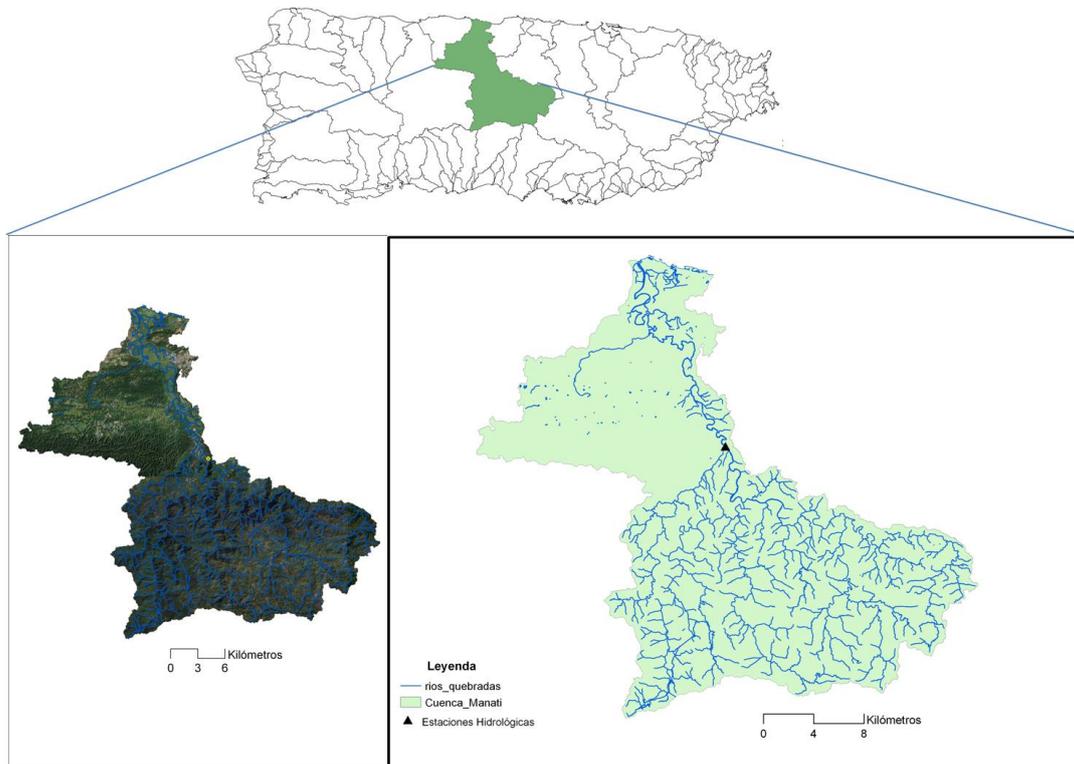


Figura 142. Cuenca Río Grande de Manatí y ubicación de la estación de USGS 50035000 Río Grande de Manatí, PR, ubicada en el municipio de Ciales.

El río registra un régimen pluvial-tropical con dos estaciones, una seca y otra húmeda divididas por un pico entre ellas en el mes de mayo (Fig. 143). Su régimen, como se esperaba, también coincide con el del Río Tanamá, donde se mostraba un aumento en los meses de marzo hasta mayo con un descenso de las mismas en los meses de junio y julio. El mes más seco es el mes de julio y su pico máximo es alcanzado en el mes de octubre.



Foto 2. Río Grande de Manatí en Ciales.

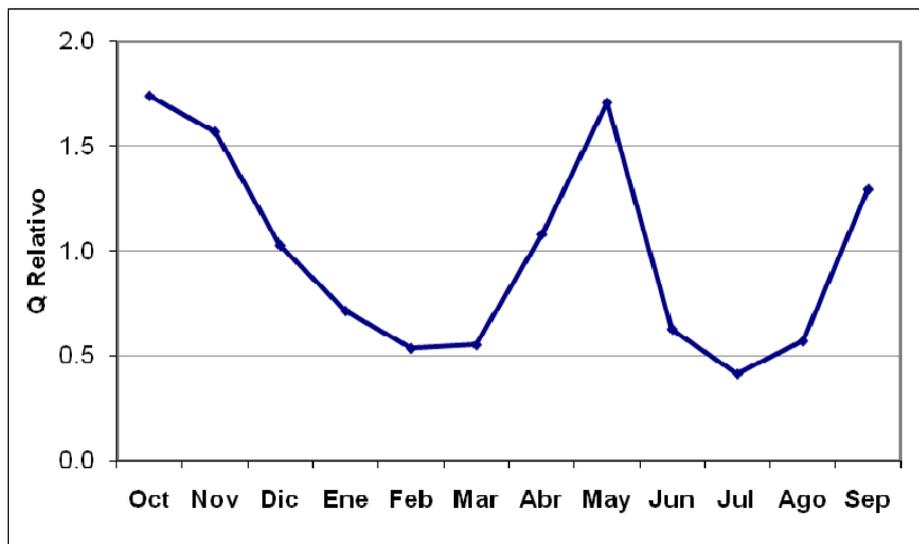


Figura 143. Caudal Relativo. Río Grande de Manatí (1960-2004).

En este río, todos los meses muestran una variabilidad alta, con un coeficiente de variación por encima del 60 %, (tabla 58). Octubre es el mes que presenta el caudal medio más alto con $12.1 \text{ m}^3/\text{s}$ y una variabilidad de 99 %. Le sigue mayo que cuenta con $11.9 \text{ m}^3/\text{s}$ y una variabilidad de 107 % (Fig. 144), siendo el segundo mes de mayor variación detrás de agosto con 123%. Julio es el mes que muestra menos caudal con $2.9 \text{ m}^3/\text{s}$ y un coeficiente de variación de 65 %. Febrero y julio son los que muestran la variabilidad más baja con 55 % y 65 %, respectivamente.

Tabla 58. Datos de Caudal (Q) medio, caudal relativo, coeficiente de variación (CV) y caudal específico. Río Grande de Manatí (1960-2004)

Periodo	Q Medio (m ³ /seg)	Q Relativo	Q Especifico ls/km ²	C.V.%
Anual	6.99	1.00	11.49	59.7
Octubre	12.14	1.74	19.96	99.3
Noviembre	11.00	1.57	18.00	73.7
Diciembre	7.20	1.03	11.78	97.6
Enero	5.00	0.71	8.21	65.7
Febrero	3.74	0.54	6.16	55.1
Marzo	3.90	0.55	6.35	71.0
Abril	7.53	1.08	12.38	84.3
Mayo	11.91	1.70	19.58	107.8
Junio	4.40	0.63	7.20	77.1
Julio	2.90	0.41	4.76	65.2
Agosto	4.00	0.57	6.55	123.8
Septiembre	9.04	1.29	14.86	84.8

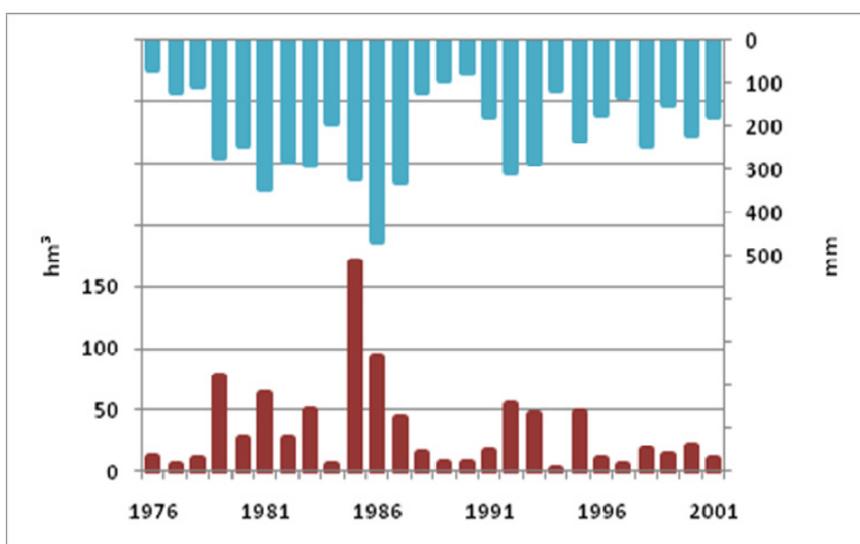


Figura 144. Aportación del mes de mayo y precipitación media. Cuenca Río Grande de Manatí.

El Río Grande de Manatí muestra un coeficiente de variación diario altísimo, con un 298%. 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. Esta misma fecha destacó también en el Río Tanamá como se observó anteriormente en la figura 137. Además, el 9 de octubre de 1970 se registró un caudal máximo de 690 m³/s y el 7 de octubre de 1985 se registraron 750 m³/s en el Río Grande de Manatí. Estos son caudales extremadamente altos, ya que si se comparan con la fecha del huracán *Georges* el 22 de septiembre de 1998, en este río sólo se registraron 286 m³/s. Esto significa que no sólo los huracanes que azotan la isla son los fenómenos que pueden llegar a generar tanta escorrentía, sino que las vaguadas y/o cualquier tipo de depresión tropical, aunque no alcancen la categoría de tormenta o huracán, pueden producir niveles altos de caudal.

Sin embargo, huracán *Hortense* (Fig. 145), aunque fue huracán categoría 1 al pasar por Puerto Rico con vientos máximos sostenidos de 130 km/hora, es muy recordado por las

lluvias intensas que descargó en la isla. El ojo del huracán tocó tierra en Puerto Rico el día 10 de septiembre de 1996 y en el Río Grande de Manatí se registraron caudales de 747 m³/s (Fig. 146).

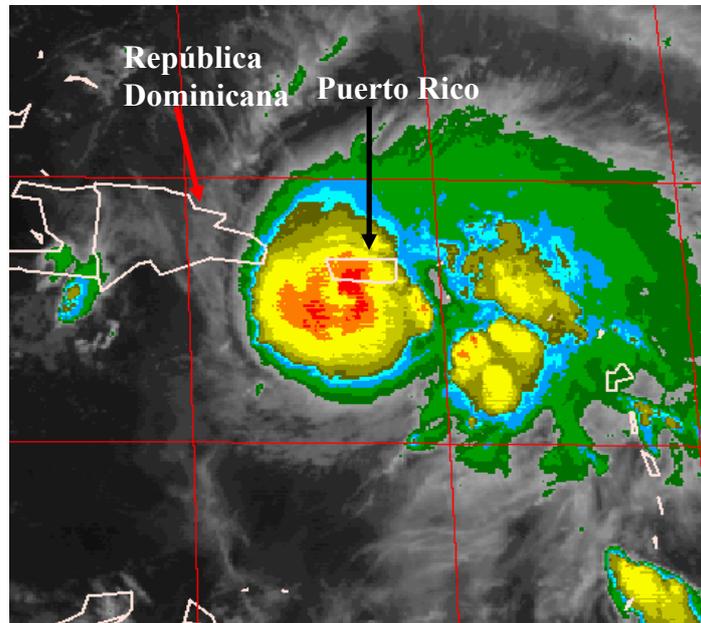


Figura 145. Huracán *Hortense* al paso por la isla de Puerto Rico. 10 de septiembre de 1996. Fuente: NOAA

El caudal mínimo diario se registró el 5 de agosto de 1994. Nuevamente coincide con el año de sequía más intensa detectado para el periodo de análisis, encontrado con el río anterior y con los datos de precipitación.

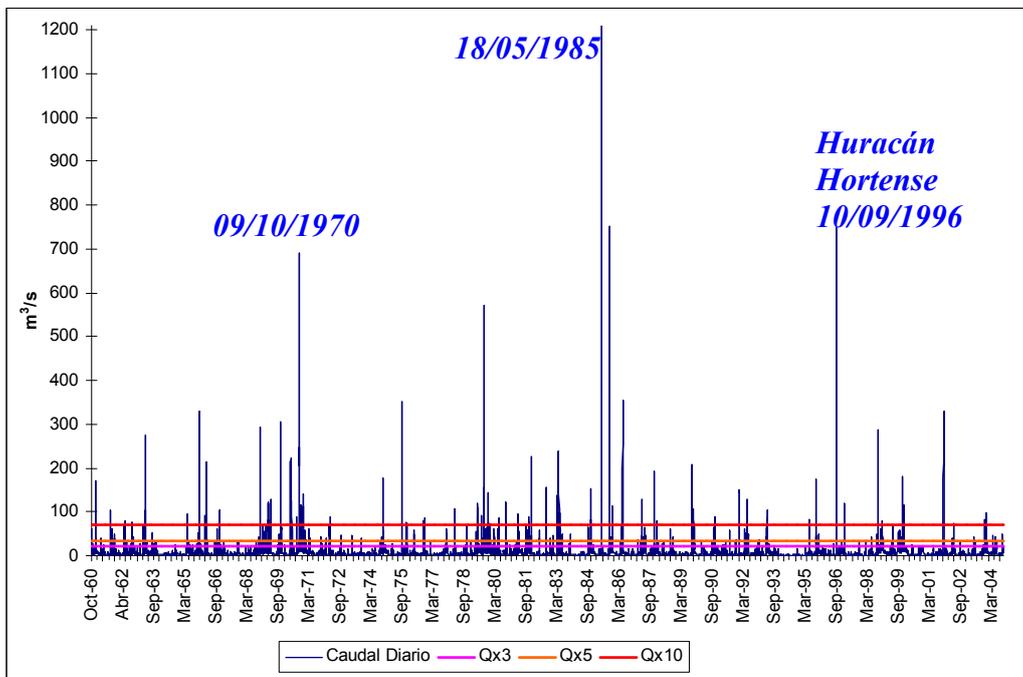


Figura 146. Caudales diarios y sus coeficientes Qx3, Qx5, Qx10 del caudal medio en el periodo hidrológico de 1960-2004. Río Grande de Manatí.

El estudio abarca 16071 episodios de análisis, igual que el Río Tanamá, desde el 1 de octubre de 1960 hasta el 30 de septiembre de 2004. Sólo 3380 días (21% de los casos) superan el caudal medio diario. Se encuentra que 845 episodios triplican ($Q_{x3}= 20.8 \text{ m}^3/\text{s}$) el caudal medio diario, un 5.3% de los casos (Fig. 147). Sólo 380 episodios quintuplican ($Q_{x5}= 34.6 \text{ m}^3/\text{s}$) el caudal medio diario, 2.4% de los casos y 124 casos lo superan por diez ($Q_{x10}= 69.2 \text{ m}^3/\text{s}$), 0.8% de los episodios.

Una gran mayoría de los casos (13904 episodios) se encuentran entre 0 y $10 \text{ m}^3/\text{s}$: esto representa un 86.6% (Fig. 60). El 7.9% de los casos se encuentra entre los 11 y $20 \text{ m}^3/\text{s}$. En resumen, 15218 episodios se encuentran dentro de 0 y $130 \text{ m}^3/\text{s}$, un 94.7% de los casos.

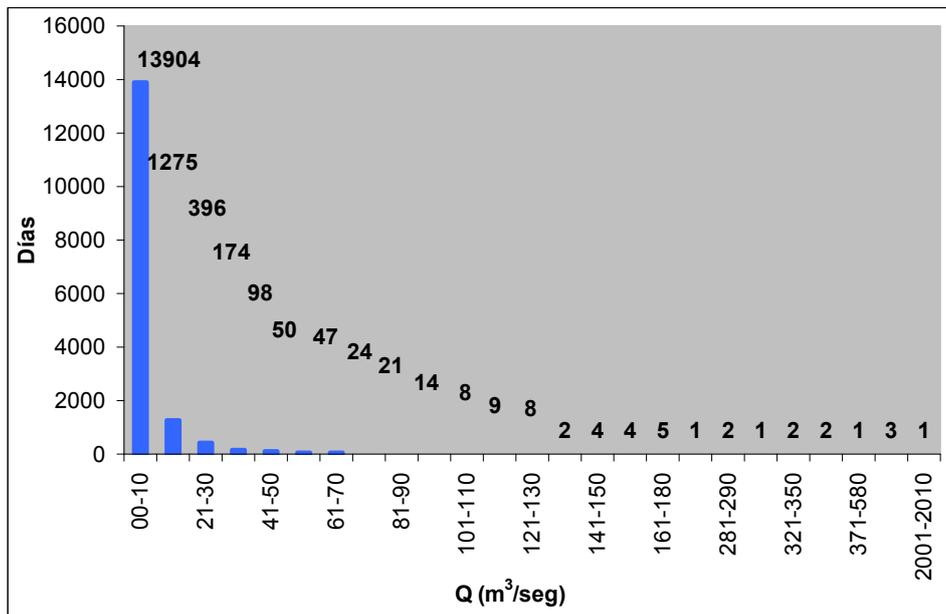


Figura 147. Distribución de Frecuencias de los caudales diarios. Río Grande de Manatí (1960-2004)

El río tiene una aportación media anual de 220.5 hm^3 (tabla 59). La aportación anual máxima se dio en 1970 con 506.9 hm^3 , un 57% por encima de la media anual para este periodo de estudio. La mínima registró valores de 32.7 hm^3 en el 1994: esto significa el 14.8% de la media anual. Los meses de octubre y mayo son los meses de mayor aportación media mensual con 31.9 hm^3 y 31.3 hm^3 respectivamente. Los valores mínimos de la aportación media mensual los presenta el mes de julio con 7.6 hm^3 .

Tabla 59. Valores Característicos de la aportación media anual y mensual. Río Grande de Manatí (1960-2004)

	Media (hm ³)	Mediana (hm ³)	Desv. Estad. (hm ³)	Mínimo (hm ³)	Máximo (hm ³)
Anual	220.5	200.8	102.7	32.7	506.9
Octubre	31.9	23.1	31.7	5.0	180.1
Noviembre	28.8	21.7	21.2	2.6	76.5
Diciembre	18.8	12.2	18.4	2.2	96.4
Enero	13.1	11.3	8.6	1.9	40.9
Febrero	9.8	8.9	5.4	3.5	31.5
Marzo	10.1	7.8	7.2	2.2	35.5
Abril	19.8	14.3	16.7	2.1	87.3
Mayo	31.3	14.7	33.8	2.2	170.5
Junio	11.5	7.9	8.9	1.3	36.8
Julio	7.6	6.6	5.0	1.1	32.6
Agosto	10.4	7.8	13.0	2.0	90.2
Septiembre	23.8	15.8	20.1	1.7	96.3

El Río Grande de Manatí cuenta con una variabilidad anual inter-mensual del 60 %. La variabilidad más alta se mostró en 1994, con 313 %, seguido por el año 1964 con 121 %. En 1979 se obtuvo el coeficiente de variación menor con un 21%.

En relación con la variabilidad anual en este río, se ha detectado una cierta tendencia progresiva en el tiempo y además, muestra un coeficiente de correlación positivo ($r_s = 0.15$) aunque carente de significación estadística (Fig. 148). De este análisis se deduce que la variabilidad anual ha ido en aumento con los años.

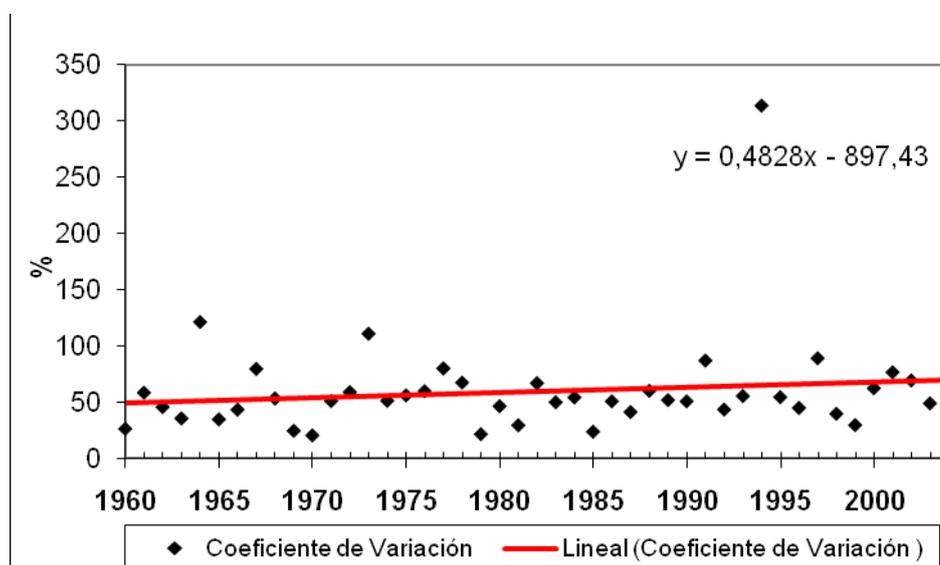


Figura 148. Coeficiente de variación anual. Río Grande de Manatí (1960-2004)

8.2.1 Tendencias. Río Grande de Manatí

El Río Grande de Manatí muestra una tendencia negativa (1.6 hm³/año) a partir del análisis de regresión (Fig. 149) al igual que con Rho Spearman, donde presenta un valor $r_s = -0.15$, aunque no alcanza la significación estadística. Además, presenta con claridad fluctuaciones anuales para el periodo de estudio de 1960-2004. De 1971-1978, se observa que los valores obtenidos se mantienen por debajo de la mediana. Entre 1988-1997 (10 años), sólo dos de estos años superaron la mediana, por lo que se puede considerar también como un periodo seco.

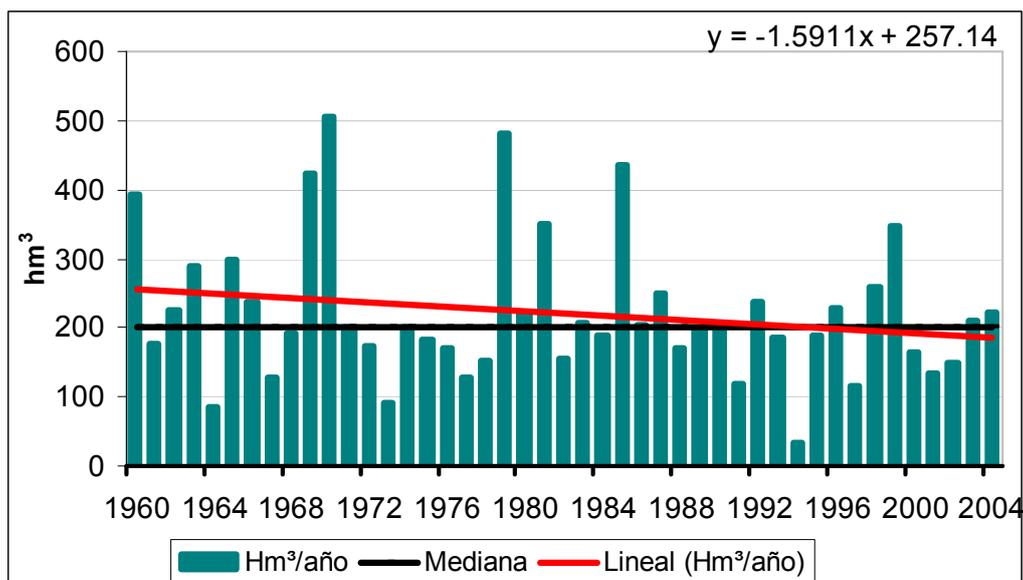


Figura 149. Aportación Anual, representación de la mediana y línea de tendencia. Río Grande de Manatí (1960-2004)

Al aplicar el coeficiente de correlación RS para el análisis de tendencia mensual (tabla 40), se ha detectado que la mayoría expresa valores negativos con excepción de mayo ($r_s = 0.02$) y septiembre ($r_s = 0.11$). La aportación de este último representa el 11% del agua que corre anualmente por este río. Esto supone que los meses que han expresado una disminución anual en los volúmenes de agua, juntos contribuyen el 60%.

Los resultados obtenidos con el estadístico MK comprueban la tendencia de la aportación en el Río Grande de Manatí. El resultado obtenido fue -96 y supera el valor de $|Z| = 1.645$, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula de no tendencia (tabla 60). Igual que en el caso de la cuenca anterior, el análisis estadístico ha certificado la existencia de una disminución en la aportación anual del Río Grande de Manatí, aunque con MKS no fue posible identificar el comienzo de la misma.

Tabla 60. Coeficiente de Correlación entre tiempo y aportación mensual y anual. Río Grande de Manatí (1960-2004)

	Rho Spearman	Significación Estadística	MK	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Anual	-0.15	N	-96	-5.77	Si 0.0001
Octubre	-0.49	N	-84	-7.21	Si 0.0001
Noviembre	-0.03	N	-20	-1.52	No
Diciembre	-0.19	N	-138	-9.61	Si 0.0001
Enero	-0.13	N	-86	-6.57	Si 0.0001
Febrero	-0.11	N	-68	-4.70	Si 0.0001
Marzo	-0.18	N	-126	-7.48	Si 0.0001
Abril	-0.11	N	-64	-4.61	Si 0.0001
Mayo	0.02	N	8	0.52	No
Junio	-0.04	N	-38	-2.58	Si 0.0049
Julio	-0.21	N	-132	-8.82	Si 0.0001
Agosto	-0.23	N	-142	-8.45	Si 0.0001
Septiembre	0.11	N	72	5.78	Si 0.0001

N= valores no significativos

$|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

Analizando la evolución de los caudales máximos anuales y mensuales, se observa que, aunque a escala anual el río muestra una ligera tendencia positiva y seis de los doce meses muestran tendencias regresivas. Ejemplo de ello es el mes de octubre (Fig. 150) que obtuvo con Rho Spearman ($r_s = -0.28$) y MK valores negativos, siendo significativos con este último (tabla 61).

Tabla 61. Coeficiente de Correlación entre tiempo y caudal máximo mensual y anual. Río Grande de Manatí (1960-2004)

	Rho Spearman	Significación Estadística	MK	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Anual	0.10	N	29	1.75	Si 0.040
Octubre	-0.28	N	-133	-9.62	Si 0.0001
Noviembre	-0.03	N	31	2.36	Si 0.009
Diciembre	-0.18	N	-91	-6.40	Si 0.0001
Enero	-0.06	N	6	0.50	No
Febrero	0.02	N	52	3.27	Si 0.0001
Marzo	-0.16	N	-47	-2.78	Si 0.002
Abril	-0.24	N	-100	-7.24	Si 0.0001
Mayo	0.01	N	30	1.86	Si 0.03
Junio	-0.02	N	23	1.62	No
Julio	-0.26	N	-131	-9.36	Si 0.0001
Agosto	-0.14	N	-30	-1.80	Si 0.0001
Septiembre	-0.10	N	91	6.90	Si 0.0001

N= valores no significativos

$|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

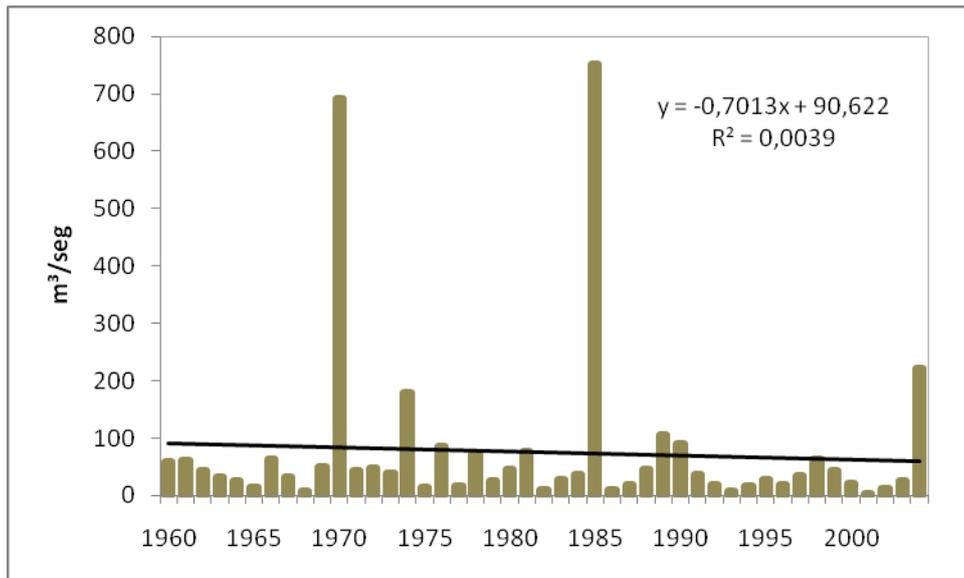


Figura 150. Evolución del caudal máximo mensual en el mes de octubre. Río Grande de Manatí.

8.3 Características Hidrológicas: Cuenca Río Culebrinas.

Para el análisis hidrológico de la Cuenca del Río Culebrinas se utilizó la estación de USGS 50147800 Río Culebrinas, ubicada en el municipio de Moca. Este río cuenta con un caudal medio de 8.47 m³/s y una aportación media anual de 267 hm³ (Fig. 151 y Foto 3).

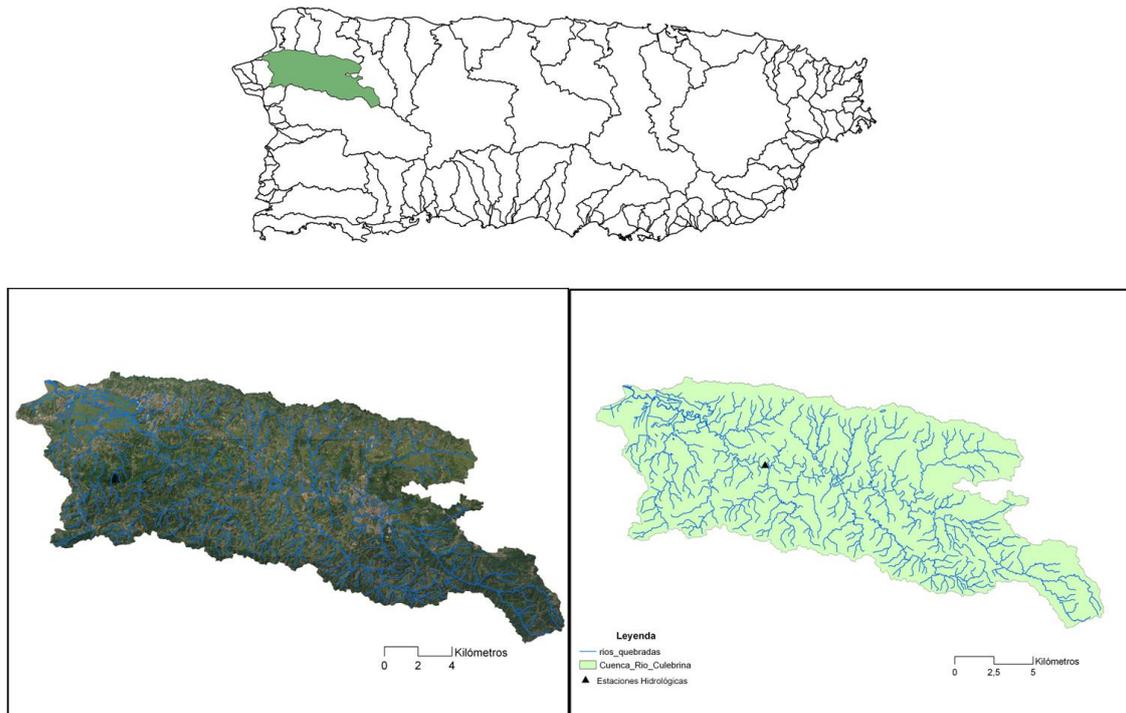


Figura 151. Cuenca Río Culebrinas y ubicación de la estación de USGS 50147800 Río Culebrinas PR, ubicada en el municipio de Moca.

Este río tiene un régimen pluvial-tropical con dos estaciones, una seca y otra húmeda, divididas por un pico entre ellas en el mes de mayo (Fig. 152). No es de sorprender que su comportamiento también coincida con los dos ríos anteriores y los que se describirán más adelante. El mismo, muestra una disminución acompañada de su caudal a partir de octubre (mes en el que el caudal medio mensual es más elevado) hasta alcanzar sus valores mínimos para la época de estiaje en el mes de febrero (Fig. 152). Posteriormente muestra un ligero aumento en el mes de marzo que continua hasta alcanzar su pico en mayo, disminuyendo su caudal en los meses de junio y julio, donde luego agosto y septiembre reflejan un aumento. El mes más seco es febrero mientras que el mes más húmedo es octubre.



Foto 3. Río Culebrinas en Moca.

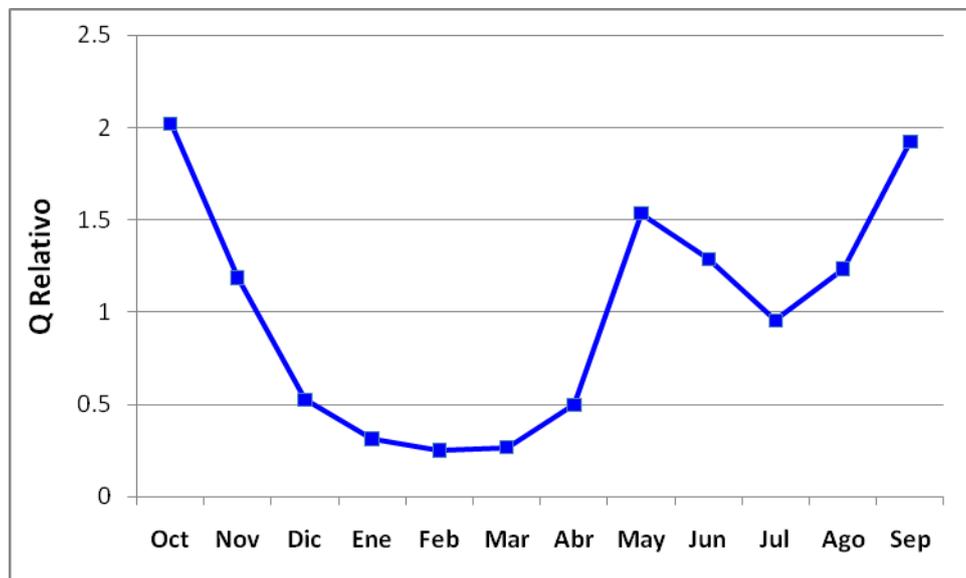


Figura 152. Caudal Relativo Río Culebrinas 1967-2007.

Con excepción del mes de octubre (40%), siendo el mes más caudaloso, todos los demás meses muestran una variabilidad por encima del 50%. Los meses de invierno y primavera, son los que han reflejado un coeficiente de variación más elevado (>70%), alcanzando en marzo un 94 % de coeficiente de variación (tabla 62 y figura 153). Los meses de otoño y verano registran un coeficiente de variación alto (<70%).

Tabla 62. Datos de Caudal (Q) medio, caudal relativo, coeficiente de variación (CV) y caudal específico. Río Culebrinas (1967-2007)

Periodo	Q Medio (m ³ /seg)	Q Relativo	Q Especifico ls/km ²	C.V.%
Anual	8.47	1.00	31.76	23.0
Octubre	17.13	2.02	64.22	39.8
Noviembre	10.05	1.18	37.69	55.3
Diciembre	4.45	0.52	16.69	70.4
Enero	2.66	0.31	9.99	81.9
Febrero	2.12	0.25	7.98	79.8
Marzo	2.25	0.26	8.46	93.9
Abril	4.21	0.49	15.79	86.6
Mayo	13.00	1.53	48.76	78.3
Junio	10.90	1.28	40.87	53.5
Julio	8.08	0.95	30.31	59.5
Agosto	10.46	1.23	39.25	52.4
Septiembre	16.31	1.92	61.16	55.9

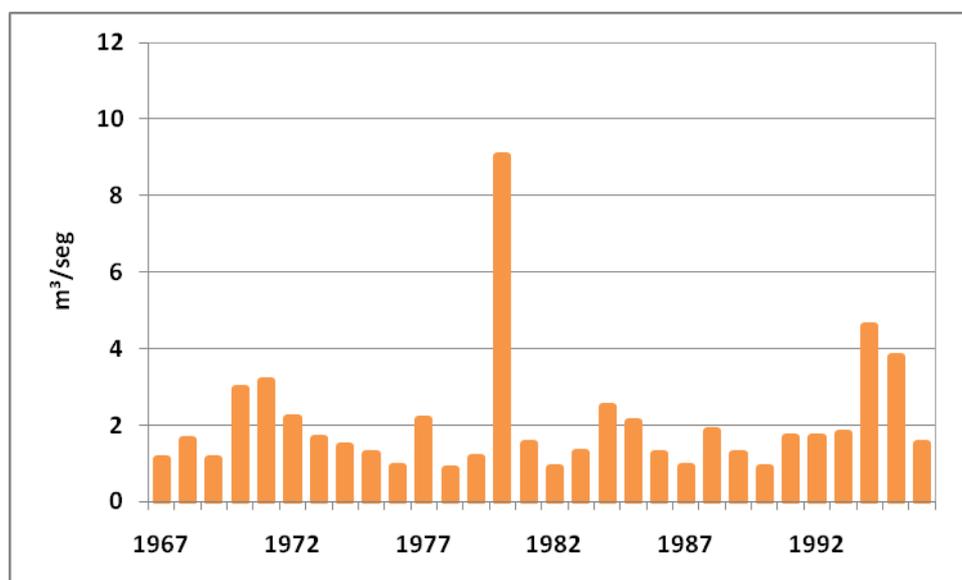


Figura 153. Caudal medio del mes de marzo. Cuenca Río Culebrinas.

El coeficiente de variación diario del Río Culebrinas alcanza un valor muy alto, 203%. Siendo el caudal medio de 8.47 m³/s, el diario máximo alcanzó valores de 481 m³/s el 22 de septiembre de 1998, 57 veces por encima de la media. Esa misma fecha ha sido destacada en el Río Tanamá, día y año en que pasó el huracán *Georges* sobre la isla de Puerto Rico. El 21 de octubre de 1972 también se registraron valores de caudal considerablemente altos con 377 m³/s (Fig. 154) El caudal diario mínimo fue registrado el día 16 de abril de 1979 con 0.54 m³/s, unas 15 veces aproximadamente por debajo la media.

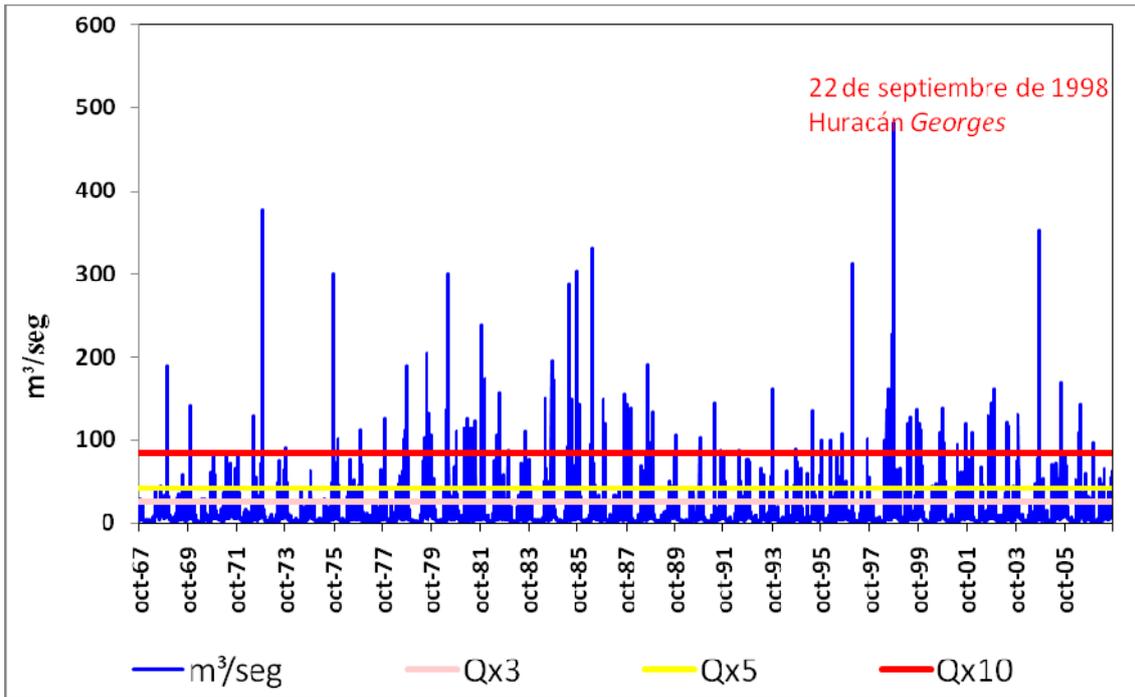


Figura 154. Caudales diarios y sus coeficientes Qx3, Qx5, Qx10 del caudal medio en el periodo hidrológico de 1967-2007. Río Culebrinas.

Este río se analizó desde el 1 de octubre de 1967 hasta el 30 de septiembre de 2007 (14610 días de registro de caudal). Sobre este total de episodios registrados, 11167 días (76.4%) se mantuvieron por debajo del caudal medio y 3443 (23.6%) por encima del mismo. Como se observa en la figura 155, solo en 895 (6.1%) ocasiones el caudal medio fue triplicado (Qx3), mientras que en 453 episodios (3.1%) fue quintuplicado (Qx5) y solo en 137 (0.9%) ocasiones el caudal medio fue superado por 10 (Qx10).

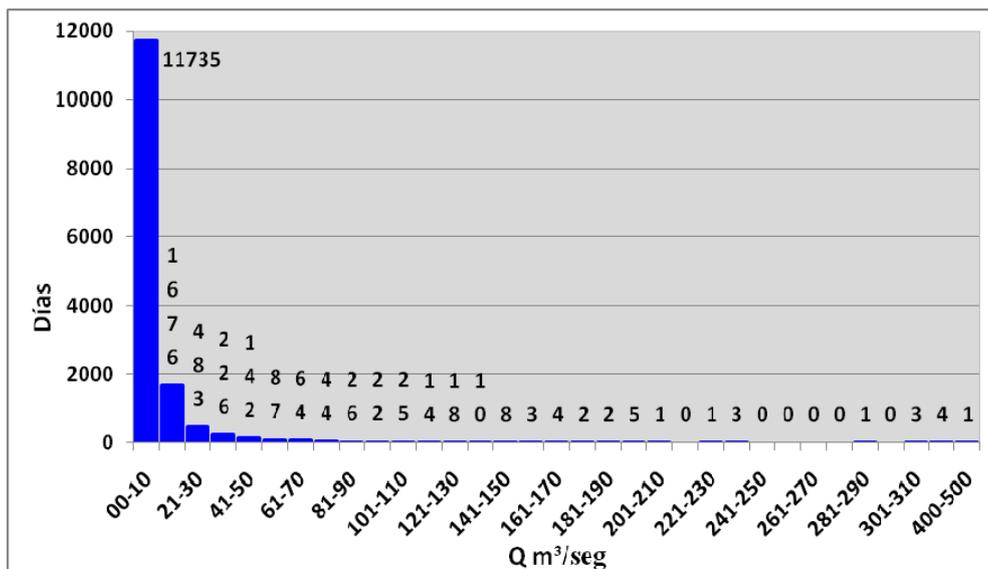


Figura 155. Distribución de Frecuencias de los caudales diarios. Río Culebrinas (1967-2007).

Como se pudo observar en la figura 155, del número total de días analizados, por encima del 90% de los episodios se encuentran entre los 0-20 m³/s, de los cuales 11735 días se mantienen entre 0-10 m³/s y 1676 días se mantuvieron entre 11-20 m³/s. El 10% restante de los días analizados se reparten entre 21-481 m³/s.

Este río tiene una aportación media anual de 267.2 hm³ (tabla 63) siendo los meses de octubre y septiembre los de mayor aportación, alcanzando 45 hm³ y 43 hm³ respectivamente. Los meses de febrero y marzo son los de menor aportación con valores de 5.6 hm³ y 5.9 hm³ cada uno. La aportación anual máxima se observó en el año hidrológico 1985/86 con 405.2 hm³, 66% por encima de la media. La aportación mínima fue registrada para el año 1976/77 con 159 hm³, casi un 59% menos de la aportación media.

Tabla 63. Valores Característicos de la aportación media anual y mensual. Río Culebrinas (1967-2007)

	Media (hm ³)	Mediana (hm ³)	Desv. Estad. (hm ³)	Mínimo (hm ³)	Máximo (hm ³)
Anual	267.23	229.0	58.5	159.16	405.24
Octubre	45.02	42.11	17.92	17.20	80.81
Noviembre	26.43	21.46	14.61	8.03	59.44
Diciembre	11.70	9.14	8.24	5.36	46.91
Enero	7.01	5.46	5.74	3.81	39.46
Febrero	5.59	4.22	4.47	2.75	27.64
Marzo	5.93	4.04	5.57	2.26	25.14
Abril	11.07	6.72	9.58	1.97	46.22
Mayo	34.18	29.17	26.76	7.19	152.83
Junio	28.65	26.72	15.32	5.44	57.50
Julio	21.25	17.44	12.64	4.97	63.01
Agosto	27.51	24.51	14.42	8.89	71.04
Septiembre	42.88	37.97	23.96	10.77	122.60

El Río Culebrinas muestra una variabilidad anual del 23%, alcanzando el coeficiente de variación máximo en el año 1976 con 37% y el mínimo en el año 1985 con 14%.

En cuanto a la evolución de la variabilidad anual del Río Culebrinas, se ha observado una ligera tendencia negativa tanto en el análisis de Rho Spearman ($r_s = -0.17$), como en el análisis de regresión (Fig. 156). Con estos resultados respecto al coeficiente de variación observado, se podría mencionar que la variabilidad de este río ha ido disminuyendo ligeramente con el pasar de los años.

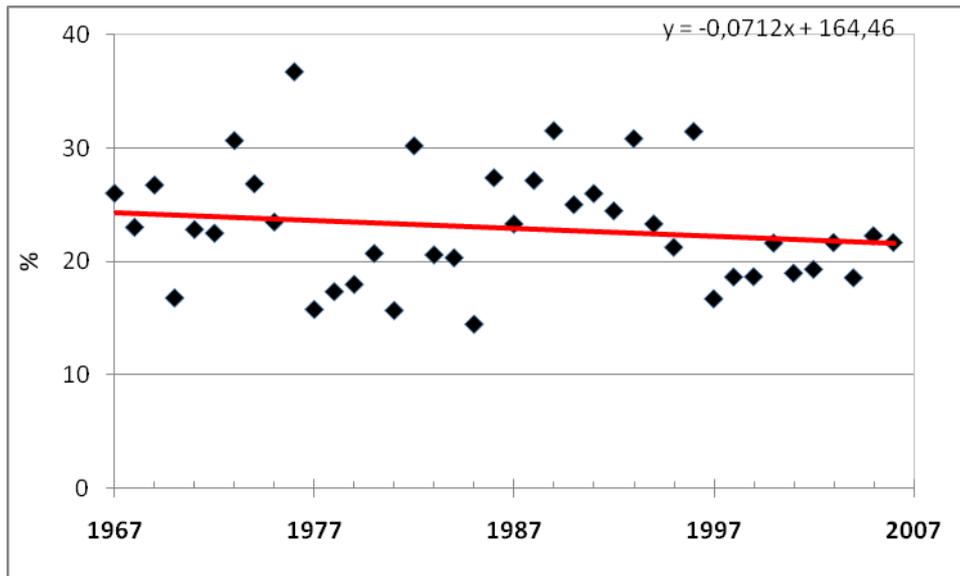


Figura 156. Coeficiente de variación anual. Río Culebrinas (1967-2007).

8.3.1 Tendencias. Río Culebrinas

Contrario a lo observado en los dos anteriores (Río Tanamá y Río Grande de Manatí), este río ha mostrado una ligera tendencia positiva en los volúmenes de agua anual ($0.6 \text{ hm}^3/\text{año}$). Con el estadístico Rho Spearman, mostró valores de $r_s = 0.17$, aunque sin alcanzar la significación estadística. Este resultado fue confirmado con el análisis de MK donde obtuvo 76, con un valor de Z que permitió rechazar la hipótesis nula de no tendencia para un nivel de 0.05. Igualmente, se puede observar en el análisis de regresión donde muestra una leve pendiente positiva (Fig. 157).

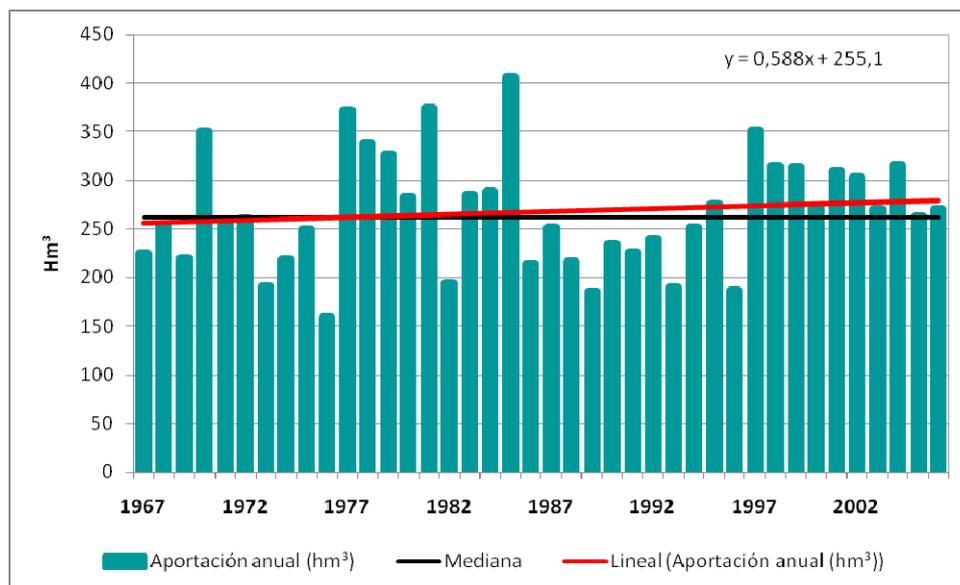


Figura 157. Aportación Anual, representación de la mediana y línea de tendencia. Río Culebrinas 1967-2007.

Referente a la aportación mensual en el Río Culebrinas, 5 meses obtuvieron valores negativos y 7 mostraron valores positivos (tabla 64). Ninguno de los resultados obtenidos en la aportación mensual, con el estadístico Rho Spearman alcanzó valores significativos.

De entre los meses que mostraron una disminución de la aportación, se encuentran octubre (siendo el mes de mayor caudal y que contribuye con un 17%), noviembre, febrero, junio y julio. Estos cinco meses contribuyen al río con 48% de la aportación anual. Los siete meses restantes, han expresado un incremento de su aportación entre 1967-2007. Con el análisis de MK, se confirman todas las tendencias observadas en el Río Culebrinas, y además todos los meses obtuvieron valores de $Z > |1.645|$. En este río tampoco ha sido posible identificar con MKS el año exacto del inicio de la tendencia.

Tabla 64. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y estadístico Mann-Kendall entre tiempo y aportación mensual y anual. Río Culebrinas (1967-2007).

	Rho Spearman	Significación Estadística	MK	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Anual	0.17	N	76	5.36	Si (0.0001)
Octubre	-0.03	N	-57	-4.45	Si (0.0001)
Noviembre	-0.09	N	-65	-4.87	Si (0.0001)
Diciembre	0.10	N	49	3.68	Si (0.0001)
Enero	0.11	N	75	5.00	Si (0.0001)
Febrero	-0.05	N	-28	-2.10	Si (0.018)
Marzo	0.12	N	53	3.82	Si (0.0001)
Abril	0.29	N	155	10.62	Si (0.0001)
Mayo	0.17	N	89	6.18	Si (0.0001)
Junio	-0.14	N	-81	-6.56	Si (0.0001)
Julio	-0.24	N	-115	-7.75	Si (0.0001)
Agosto	0.26	N	129	8.82	Si (0.0001)
Septiembre	0.14	N	67	5.64	Si (0.0001)

N= valores no significativos

$|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

En cuanto a la aportación anual y mensual de este río, se observó que, al contrario que los otros casos, éste muestra un ligero aumento en el volumen de agua que discurre. Más aún, se observan tendencias positivas en los caudales máximos anuales y mensuales (tabla 64). A escala mensual, seis de los doce meses muestran incremento en el volumen de agua de los cuales y dos alcanzan la significación estadística con el RS (tabla 64 y Fig. 157), mientras con MK podemos rechazar la hipótesis nula de no tendencia en todos ellos. Ejemplo de incremento en los caudales máximos son septiembre y agosto, que según el análisis de regresión aumentan $1.4 \text{ m}^3/\text{año}$ (Figs. 158 y 159). Además, los mismos meses que expresaron una disminución en la cantidad de agua entre 1967-2007, también mostraron una tendencia regresiva de los caudales máximos (tabla 65).

Tabla 65. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y estadístico Mann-Kendall entre tiempo y caudal máximo mensual y anual. Río Culebrinas (1967-2007).

	Rho Spearman	Significación Estadística	MK	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Anual	0.06	N	31	2.06	Si 0.0197
Octubre	-0.07	N	-53	-3.38	Si (0.0001)
Noviembre	-0.08	N	-38	-2.70	Si (0.0001)
Diciembre	0.13	N	62	4.63	Si (0.0001)
Enero	0.19	N	117	7.32	Si (0.0001)
Febrero	-0.15	N	-76	-5.82	Si (0.018)
Marzo	0.04	N	18	1.60	No
Abril	0.23	N	123	9.60	Si (0.0001)
Mayo	0.35	*	181	12.41	Si (0.0001)
Junio	-0.09	N	-56	-4.30	Si (0.0001)
Julio	-0.12	N	-76	-5.00	Si (0.0001)
Agosto	0.40	*	203	14.58	Si (0.0001)
Septiembre	0.16	N	75	6.63	Si (0.0001)

N= valores no significativos. * Correlación significativa al nivel de 0.05.

$|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

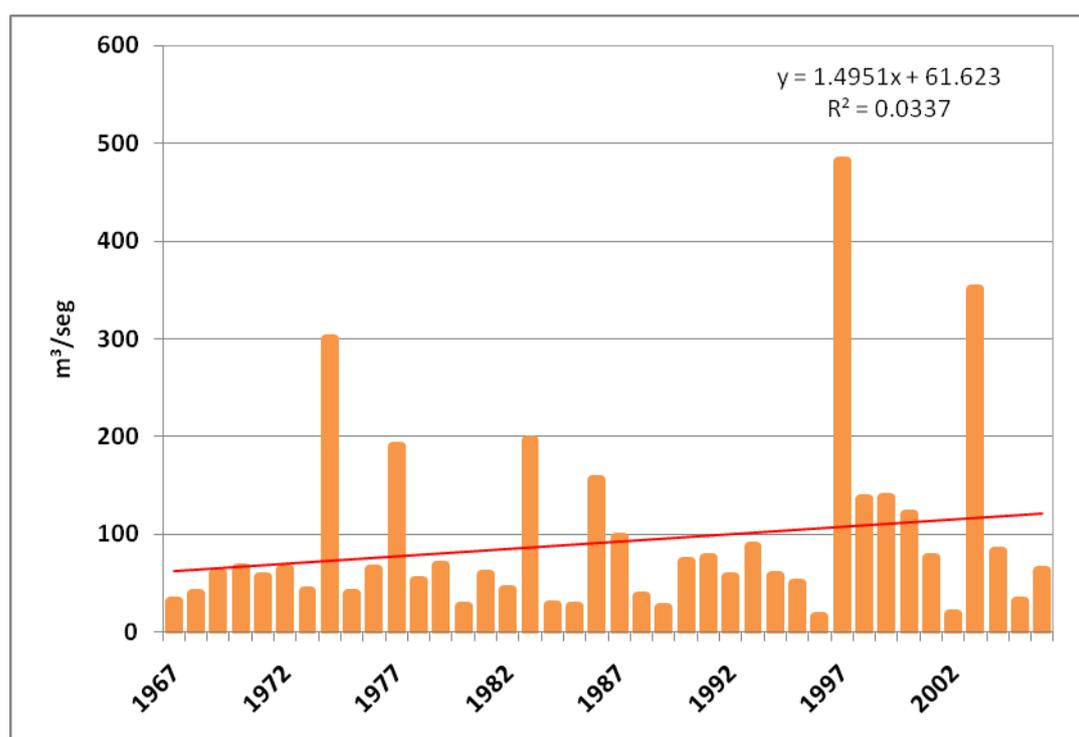


Figura 158. Evolución del caudal máximo mensual en el mes de septiembre. Río Culebrinas

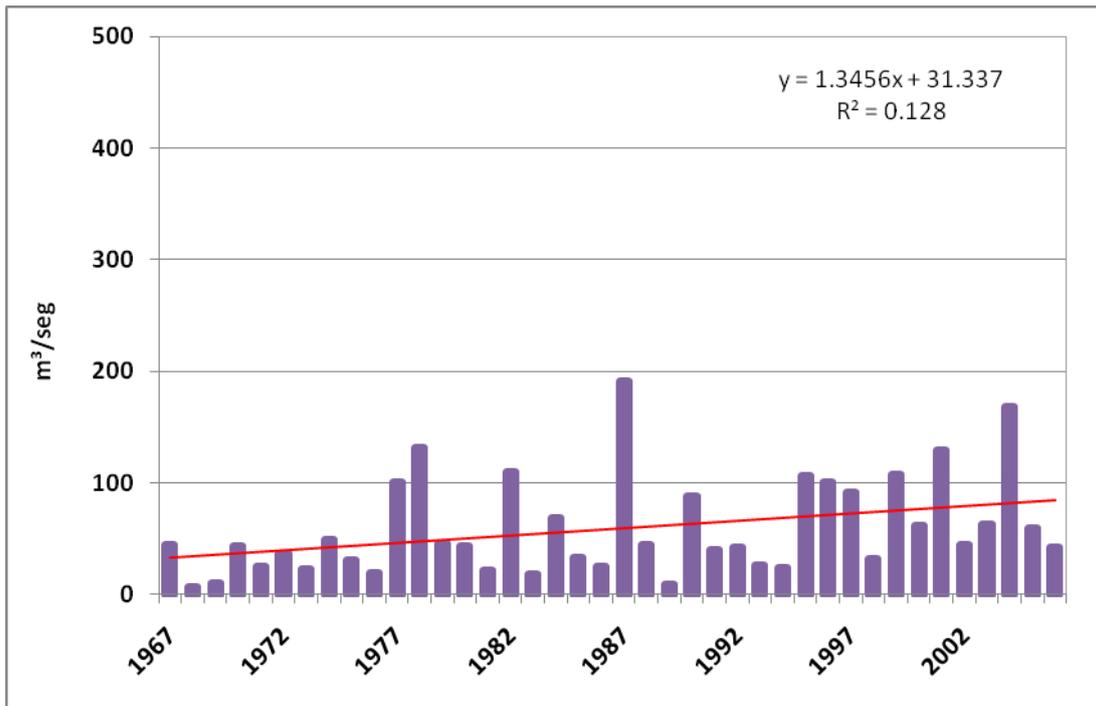


Figura 159. Evolución del caudal máximo mensual en el mes de agosto. Río Culebrinas

8.4 Características Hidrológicas. Río Fajardo

Para analizar esta cuenca se utilizó la estación del USGS 50071000 Río Fajardo, ubicada en el mismo municipio de Fajardo (Fig. 160 y Foto 4). Este río cuenta con un caudal medio de $1.86 \text{ m}^3/\text{s}$, similar al río Tanamá ($1.38 \text{ m}^3/\text{s}$) y una aportación anual de 58.5 hm^3

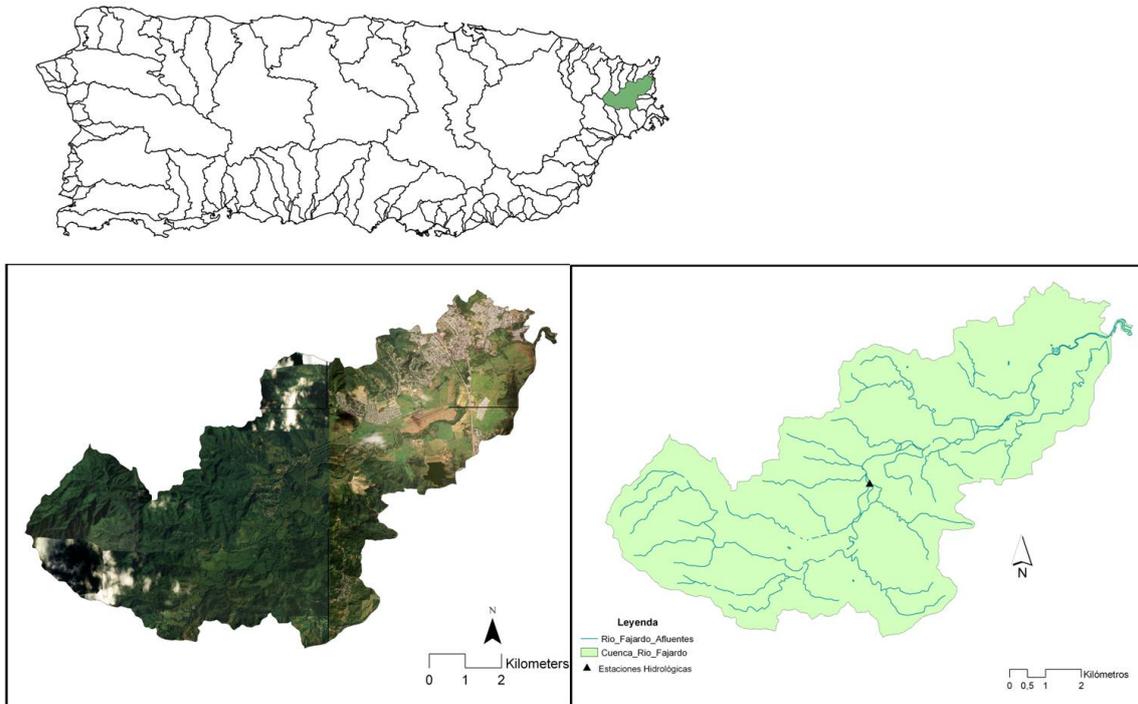


Figura 160. Cuenca Río Fajardo y ubicación de la estación del USGS 50071000 Río Fajardo, ubicada en el mismo municipio de Fajardo.

Como no es de sorprender por su ubicación geográfica, este río muestra un régimen pluvial-tropical (como los cauces anteriores) con dos estaciones, una seca y otra húmeda, mostrando dos picos máximos, uno en noviembre y otro en mayo. Luego de octubre (comienzo del año hidrológico), alcanza el caudal máximo en noviembre seguido de una disminución de las aguas hasta alcanzar el caudal mínimo en época de estiaje para el mes de marzo (Fig. 161). Al igual que los ríos anteriores, muestra un ligero aumento en abril hasta alcanzar un pico en mayo, disminuyendo nuevamente en junio y julio.



Foto 4. Río Fajardo, en Fajardo.

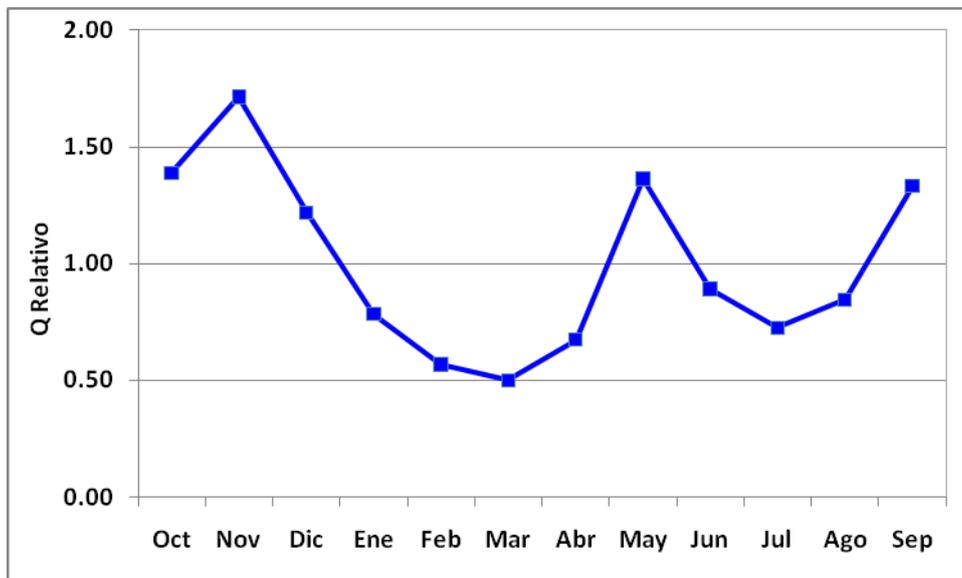


Figura 161. Caudal Relativo. Río Fajardo 1961-2007.

Todos los meses muestran un coeficiente de variación que supera el 60%, mientras que el coeficiente anual del río apenas alcanza el 38% (tabla 66). Los meses de mayo y septiembre destacan con una variabilidad por encima del 80% (Fig. 162). Febrero y agosto son los que menos variabilidad han mostrado con 48% y 52% respectivamente.

Tabla 66. Datos de Caudal (Q) medio, caudal relativo, coeficiente de variación (CV) y caudal específico. Río Fajardo 1961-2007

Periodo	Q Medio (m ³ /seg)	Q Relativo	Q Especifico ls/km ²	C.V.%
Anual	1.86	1.00	27.36	38.2
Octubre	2.58	1.39	38.01	67.7
Noviembre	3.18	1.71	46.90	69.3
Diciembre	2.26	1.22	33.35	66.8
Enero	1.45	0.78	21.44	57.0
Febrero	1.05	0.57	15.50	48.1
Marzo	0.93	0.50	13.67	70.8
Abril	1.25	0.67	18.44	65.9
Mayo	2.53	1.36	37.31	82.7
Junio	1.65	0.89	24.36	63.9
Julio	1.35	0.73	19.84	57.7
Agosto	1.57	0.84	23.11	51.6
Septiembre	2.47	1.33	36.43	89.1

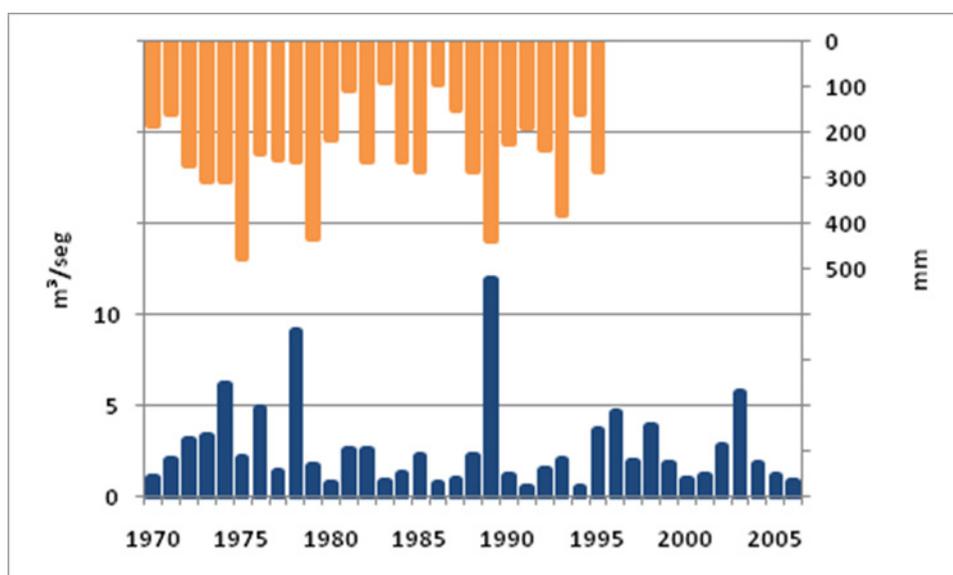


Figura 162. Caudal medio de septiembre y precipitación media. Cuenca Río Fajardo

La variabilidad diaria, para los 16801 episodios registrados entre 1961-2007, es muy alta, con un 230%. El caudal no destaca en ninguna de las fechas anteriormente mencionadas para los otros casos estudiados, en cuanto a caudal máximo diario. Por el contrario, se ha observado una nueva fecha importante en cuanto a cantidad de agua que discurrió en la región, el 18 de septiembre de 1989. Para esa fecha quedó registrado el paso del Huracán *Hugo* por la región este de la isla con vientos sostenidos de 140 millas por hora (225 km/h, categoría 4), sin apenas afectar la región oeste de la isla de Puerto Rico, de tal forma que no se registran estas fechas en los ríos anteriores (Fig. 163).



Figura 163. Huracán Hugo antes de pasar por la isla de Puerto Rico.

Con un caudal medio de $1.85 \text{ m}^3/\text{s}$, el 18 de septiembre de 1989 dicho río registró caudales de $264 \text{ m}^3/\text{s}$, esto es igual a discurrir 143 veces el caudal medio (Fig. 164). El caudal mínimo fue de $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ registrado en varios años y meses distintos, entre ellos diciembre de 1992, febrero, marzo y abril de 1994. El caudal medio de este río se vio triplicado (Qx3) en 1033 ocasiones, en 515 hechos fue quintuplicado (Qx5) y solo 157 veces se vio multiplicado por 10.

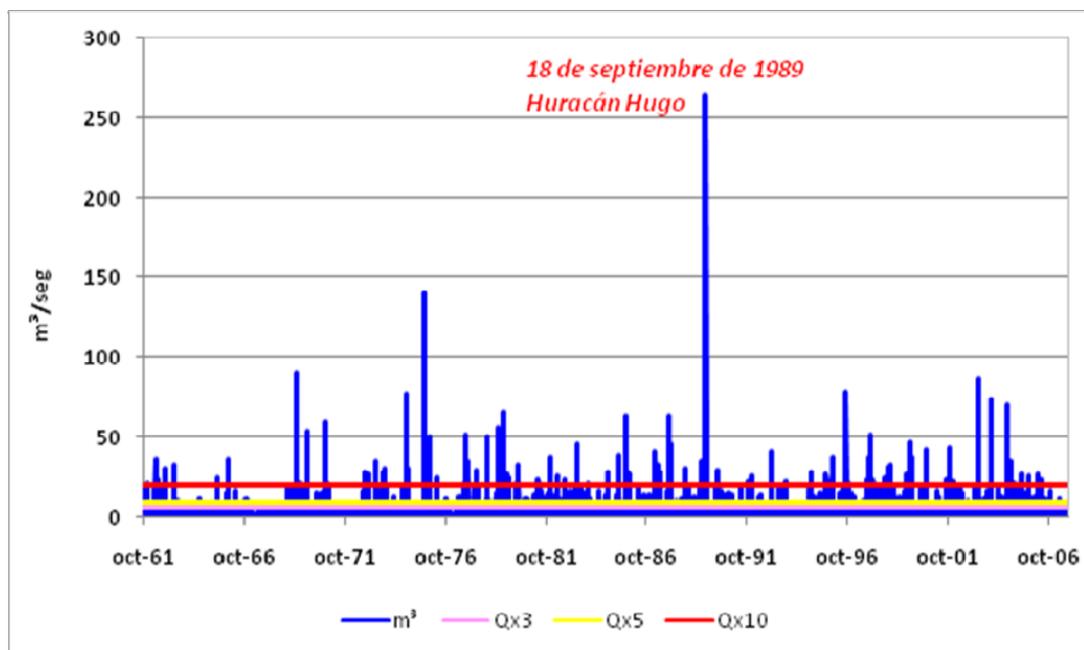


Figura 164. Caudales diarios y sus coeficientes Qx3, Qx5, Qx10 del caudal medio en el periodo hidrológico de 1961-2007. Río Fajardo

De los 16801 días registrados por la estación de aforo en el Río Fajardo, en 16291 episodios (97%) el caudal se mantuvo entre los $0-10 \text{ m}^3/\text{s}$, dejando solo un 3% restante entre $11-264 \text{ m}^3/\text{s}$. De este 3%, la mayoría (356 episodios) de los casos se mantuvieron entre $11-20 \text{ m}^3/\text{s}$, 96 días entre $21-30 \text{ m}^3/\text{s}$ y 27 ocasiones entre los $41-140 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig.

165). Solo dos episodios se observan aislados, 140.7 m³/s el 16 de septiembre de 1975 y el 18 de septiembre de 1989 con 264 m³/s.

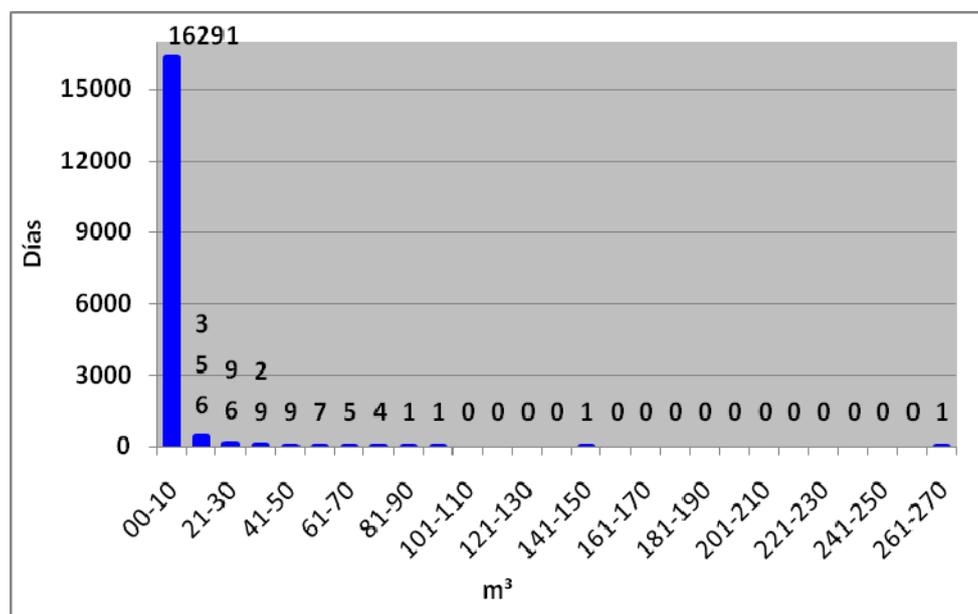


Figura 165. Distribución de Frecuencias de los caudales diarios. Río Fajardo 1961-2007.

El Río Fajardo tiene una aportación media anual de 58.5 hm³ con los meses de octubre y noviembre como protagonistas, con 6.8 hm³ y 8.4 hm³ respectivamente. Entre ambos meses representan el 26% de la aportación anual. El mes de marzo destaca por la poca aportación, como se observa en la tabla 67. Esto representa solo el 4% de la aportación anual.

La aportación anual máxima fue registrada en el año 1978/79 con 124 hm³, 47% por encima de la media, mientras que la aportación mínima se encontró en el 1994/95 con 17.1 hm³, 29% por debajo de la media.

Tabla 67. Valores Característicos de la aportación media anual y mensual. Río Fajardo 1961-2007

	Media (hm ³)	Mediana (hm ³)	Desv. Estad. (hm ³)	Mínimo (hm ³)	Máximo (hm ³)
Anual	58.55	47.00	19.6	17.06	124.38
Octubre	6.78	5.48	4.59	1.42	19.38
Noviembre	8.36	6.42	5.80	1.90	24.38
Diciembre	5.95	4.66	3.97	1.11	17.60
Enero	3.82	3.17	2.18	1.16	11.18
Febrero	2.76	2.55	1.33	0.80	5.99
Marzo	2.44	2.04	1.72	0.49	8.09
Abril	3.29	2.85	2.17	0.30	9.57
Mayo	6.65	4.72	5.50	1.32	29.72
Junio	4.34	3.61	2.77	0.74	12.33
Julio	3.54	3.06	2.04	0.79	9.81
Agosto	4.12	3.56	2.12	0.72	11.80
Septiembre	6.50	4.87	5.79	1.41	31.34

El Río Fajardo, con un coeficiente de variación anual de 38%, manifestó la variabilidad máxima en el año 1994 con 114%. El mínimo se observó en la década de los 70 (1978), cuando apenas alcanzó un 15%. Conjuntamente la variabilidad anual mostró una ligera tendencia positiva tanto con el análisis de regresión (Fig. 166) como con el Rho Spearman (0.14).

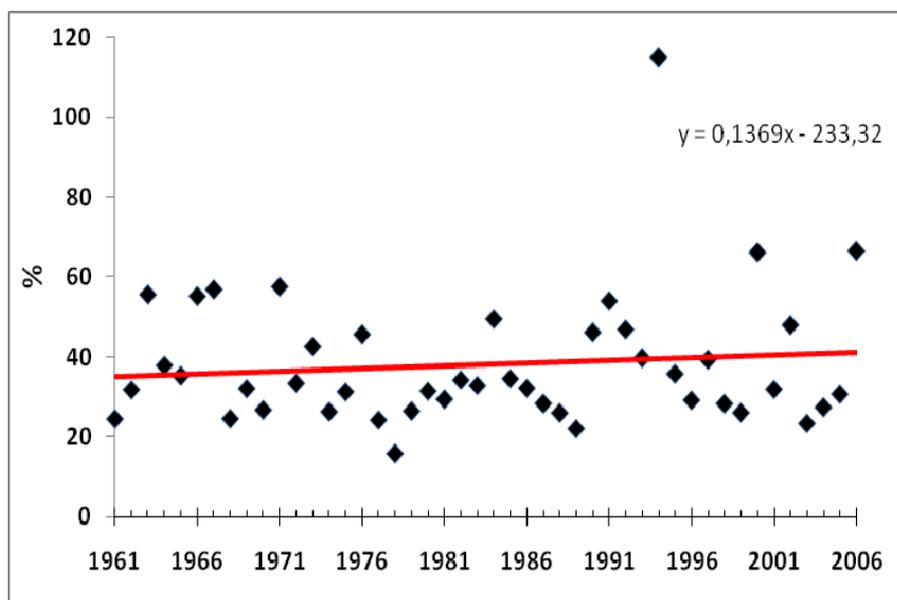


Figura 166. Coeficiente de variación anual. Río Fajardo 1961-2007

8.4.1 Tendencia. Río Fajardo.

Este río, aunque mostró una ligera línea de tendencia negativa en la aportación anual con el análisis de regresión (Fig. 167), la misma no pudo ser confirmada con ninguno de los otros estadísticos aplicados a la serie (Rho Spearman, MK y SMK). Si bien se obtuvieron valores negativos con todos los estadísticos, ninguno de sus resultados exponen valores significativos que permitan rechazar la hipótesis nula de no tendencia. Por otro lado, sí se establecieron tendencias significativas cuando se aplicaron las mismas pruebas para observar la evolución de cada mes (tabla 68).

Se han identificado tendencias de disminución en los volúmenes de agua en 9 de los 12 meses, la suma de todos juntos aportan el 80% del agua anual a este río. El mes de noviembre ha sido la única excepción, pues ha mostrado un aumento con valores $Z > |1.645|$. El mismo es el de mayor representatividad y contribuye con 14% de la aportación anual. Enero y abril, con una aportación que refleja el 12% del agua, no expresan tendencias claras.

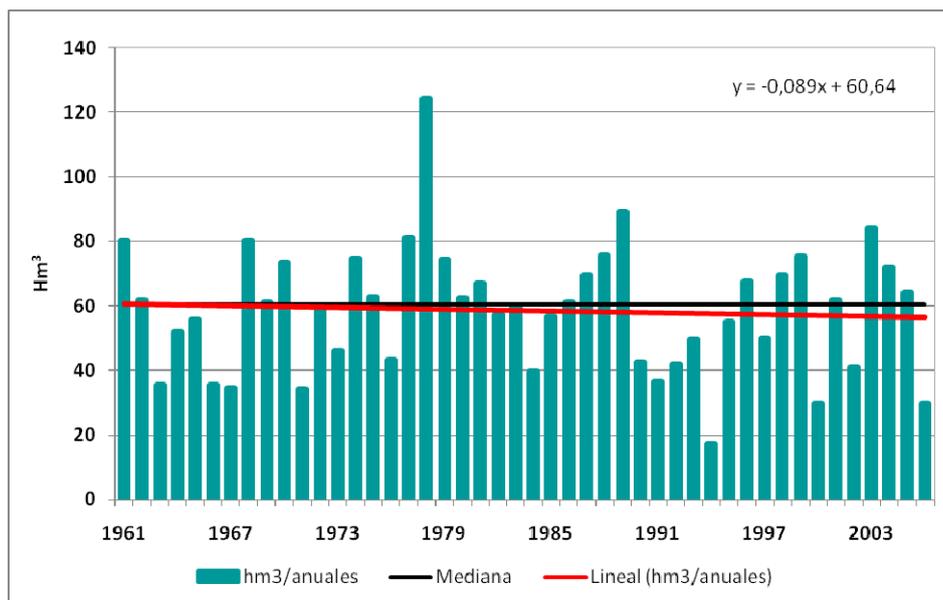


Figura 167. Aportación Anual, representación de la mediana y línea de tendencia. Río Fajardo 1961-2007.

Tabla 68. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y estadístico Mann-Kendall entre tiempo y aportación mensual y anual. Río Fajardo 1961-2007

	Rho Spearman	Significación Estadística	MK	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Anual	-0.02	N	-19	-1.29	No
Octubre	-0.07	N	-38	-3.45	Si (0.0003)
Noviembre	0.16	N	112	8.22	Si (0.0001)
Diciembre	-0.07	N	-44	-2.74	Si (0.0034)
Enero	0.03	N	10	0.85	No
Febrero	-0.10	N	-52	-3.72	Si (0.0001)
Marzo	-0.18	N	-108	-7.72	Si (0.0001)
Abril	-0.01	N	-16	-1.10	No
Mayo	-0.05	N	-58	-3.51	Si (0.002)
Junio	-0.09	N	-60	-3.47	Si (0.0003)
Julio	-0.24	N	-162	-10.60	Si (0.0001)
Agosto	-0.21	N	-162	-12.53	Si (0.0001)
Septiembre	-0.04	N	-22	-1.68	Si (0.0464)

N= valores no significativos

$|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

No se puede establecer un patrón con el caudal medio anual del Río Fajardo, aunque se detectaron incrementos y disminuciones en la cantidad de agua de algunos meses. Además, cuando se analizan los caudales máximos anuales y mensuales se observa un aumento de los mismos (tabla 69). Ocho de los doce meses muestran tendencias positivas con valores significativos en el análisis de MK (noviembre, enero, febrero, abril, mayo, junio, agosto y septiembre). Destaca el mes de enero (Fig. 168) por ser el único que obtuvo valores estadísticamente significativos con el Rho Spearman.

Tabla 69. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y estadístico Mann-Kendall entre tiempo y caudal máximo mensual y anual. Río Fajardo 1961-2007

	Rho Spearman	Significación Estadística	MK	Z	Rechazo de hipótesis nula para $p < 0.05$
Anual	0.12	N	80	5.00	SI
Octubre	0.02	N	27	1.56	No
Noviembre	0.20	N	145	10.23	Si (0.0001)
Diciembre	-0.03	N	-13	-0.91	No
Enero	0.38	*	260	21.27	Si (0.0001)
Febrero	0.05	N	36	2.68	Si (0.003)
Marzo	0.01	N	10	0.71	No
Abril	0.11	N	80	4.73	Si (0.0001)
Mayo	0.10	N	44	2.36	Si (0.002)
Junio	0.16	N	107	6.36	Si (0.0001)
Julio	0.02	N	-3	-0.27	No
Agosto	0.12	N	78	5.75	Si (0.0001)
Septiembre	0.17	N	119	7.80	Si (0.0001)

N= valores no significativos. * Correlación significativa al nivel de 0.05.

$|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

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

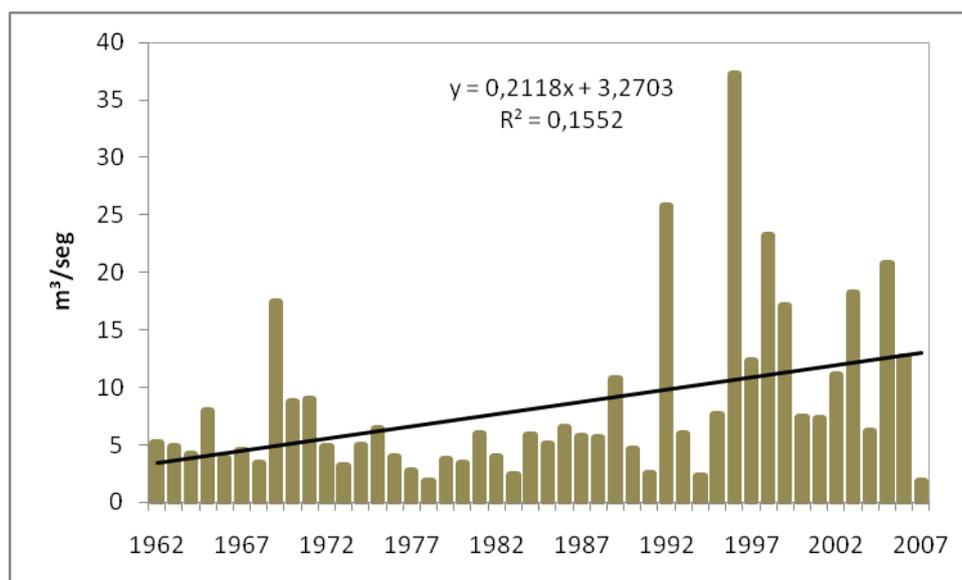


Figura 168. Evolución del caudal máximo mensual en el mes de enero. Río Fajardo

Son muchos investigadores los que se han dado la tarea de investigar que ocurre con los recursos hídricos superficiales en un intervalo de años y también identificar influencias en el comportamiento hidrológico (Lins y Slack, 1999; García Ruíz et al. 2001; Gallart y Llorens, 2003; Pagano y Garen, 2004; 2005; Martínez-Fernández et al. 2005; Oudin et al. 2008; Ceballos-Barbancho et al. 2007; Krakauer y Fung, 2008;). McBean y Mootie (2008), detectaron que en los Grandes Lagos de EEUU, los caudales de ciertos ríos han aumentado como resultado directo de un incremento en la precipitación, aunque muchos otros factores no fueron tomados en consideración. Por otro lado, un estudio realizado en las grandes planicies de EEUU (Oklahoma, Nebraska, Arkansas) menciona que hubo un aumento en los caudales, sin embargo estos han sido enormemente

desproporcionados en comparación con las tendencias de la precipitación (Garbrecht et al. 2004). Un aumento del 12% en la precipitación generó un aumento del 64% en los caudales. Esto, según Garbrecht et al. (2004), deja espacio para analizar las otras variables relacionadas con los recursos hídricos (uso de suelo, cubierta vegetal, tipos de suelos, etc.). Variaciones y tendencias fueron encontrados en los aportes de la cuenca media del Río Grande en México, donde aumentó la superficie urbana del 13% al 20% (Carlón Allende y Mendoza, 2007).

Pagano y Garen (2005) estudiaron las tendencias, la variabilidad y la persistencia de los caudales de varios ríos en EEUU occidental. No obstante, no fue posible detectar evolución en los ríos estudiados. Por otro lado, encontraron que entre 1930-1950 fue un periodo de baja variabilidad, y que los flujos eran consistentemente normales hasta 1970. Hubo un corto periodo húmedo entre 1983-1986 seguido por una sequía desde 1987-1994. Aún siendo esta región muy predecible según los autores, estas oscilaciones se pueden ver influenciadas por el fenómeno El Niño y las transformaciones del paisaje que no fueron objetos de estudio.

Una investigación llevada a cabo con 1000 estaciones hidrológicas en EEUU concluyó que no existe un patrón único, sino que detectaron periodos de sequías (1930, 1950-1960) y periodos húmedos en la década de 1970 y 1980 (Krakauer y Fung, 2008). A escala de toda la serie encontraron un ligero aumento lineal entre 1925-1994 de la cantidad de agua que discurre por los cauces siendo más significativo desde 1970 y sin tendencia alguna entre 1994-2007.

9. TRANSFORMACIÓN PAISAJÍSTICA Y CAMBIOS DE USO DE SUELO EN LA ISLA DE PUERTO RICO



Cuenca Río Grande de Arecibo, PUERTO RICO

9. TRANSFORMACIÓN PAISAJÍSTICA Y CAMBIOS DE USO DE SUELO EN LA ISLA DE PUERTO RICO

9.1 Población, paisaje y usos de suelo

Al comienzo del siglo XVI, se estima que en la isla de Puerto Rico el bosque era la cubierta vegetal mayoritaria y alcanzaba 850 mil hectáreas aproximadamente (USDA, 1982). Al comienzo de la llegada de los españoles a las costas de la isla en 1492, se inicia una nueva era de inmigración y aumento demográfico (Fig. 169), principalmente de europeos y posteriormente de casi todas las partes del mundo. Estos cambios demográficos y políticos dirigieron la orientación de los usos del suelo en la isla durante los últimos 500 años. Las nuevas políticas económicas de España aplicadas a Puerto Rico estaban dirigidas al cultivo intensivo de café, caña de azúcar (en menor grado) y otros productos menores. Desde la época colonial, el crecimiento poblacional de la isla no ha mermado, aún cuando existen grandes olas migratorias desde y hacia los EEUU (Fig. 170).

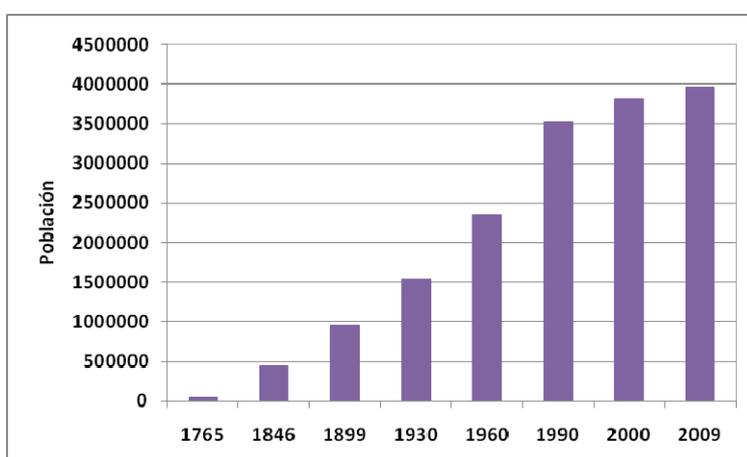


Figura 169. Aumento poblacional en la isla de Puerto Rico. Fuente: Ayala, 1996.

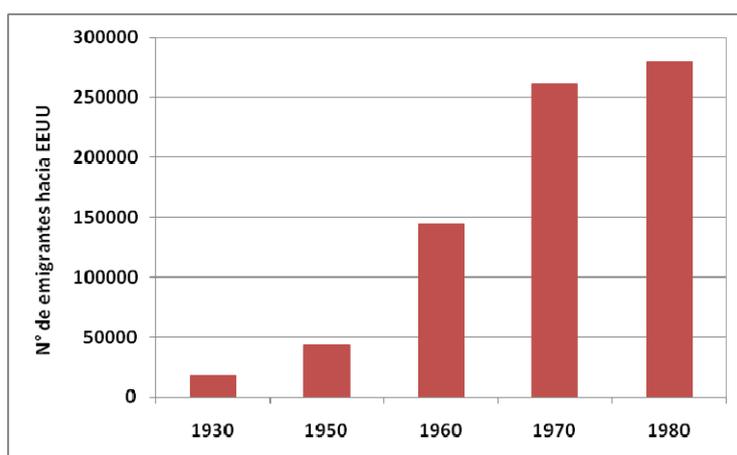


Figura 170. Migración de puertorriqueños hacia Estados Unidos. Fuente: Ayala, 1996.

Las migraciones puertorriqueñas internas y hacia los Estados Unidos continental comenzaron tan temprano como en 1917, aunque no llegaron a ser tan drásticas como en 1930-1939 con un promedio de 1800 personas al año que salían hacia EEUU y en la década 1950-59 cuando 43000 personas por año abandonaban el país (Ayala, 1996). De esta manera hubo 46826 personas que dejaron la isla solo en la década de los años 50, 144724 lo hicieron en la década del 60, 261000 en los años 70 y 280000 en los 80 (Ayala, 1996).

Aunque el café había llegado a Puerto Rico en 1755 (Imus, 1955), no es hasta el siglo XIX, cuando comienzan las haciendas de gran tamaño y cuando la siembra de café toma auge, llegando a ser tan representativa que comenzó con 7000 hectáreas y llegó a ocupar 77000 hectáreas del territorio insular (Fig. 169). No obstante, la práctica agrícola en los cultivos de café no parecía ser la más adecuada, según varios estudios de la época (Naley, 1955). Entre algunos de los problemas identificados en la siembra de café, pertinentes a este trabajo, era que se daba en pendientes entre el 40-60% y esto fomentaba una erosión completa de la capa superficial del suelo. Otro de los grandes problemas era que en el café de sombra se permitía que se formaran cubiertas extremadamente densas, alterando la fotosíntesis de la planta, disminuyendo la producción y fomentando la propagación de enfermedades en los cultivos (Imus, 1955).

La transición política (de España a EEUU) tuvo un impacto negativo en una las actividades principales económicas de la isla, el cultivo de café para exportación (Ayala, 1996). La entrada libre de impuesto de la caña de azúcar al mercado norteamericano promovió el crecimiento de la industria azucarera, seguido por el tabaco, otro de los productos protegido por EEUU. Estos cambios al monocultivo vinieron acompañados de cambios en la estructura social y distribución poblacional de las áreas rurales (Ayala, 1996).

Esta época de la actividad agrícola, como principal fuente de ingreso y empleo durante décadas en la isla y que perduró así hasta principios del S. XX, fomentó un intenso proceso de deforestación en las tierras de Puerto Rico. Estos cambios forestales han sido bien documentados por diversos autores debido a su magnitud, su importancia ecológica, su impacto económico y poblacional (Murphy, 1916; Wadsworth, 1950; USDC, 1913; USDA, 1982, 1997). Según Murphy (1916), en el año 1500, la isla contaba con unas 850 mil ha de bosque (95% de la superficie del país), en el año 1828 fueron reducidas a 587 mil ha según Wadsworth (1950) y en 1899 sólo quedaban 182 mil ha (Fig. 171).

Entre 1916 y 1931 en Puerto Rico se estimó que la cubierta forestal cubría unas 82 mil ha (USDA, 1982), algo más del 6% de la superficie del país. Con estos estudios previos, se observa una clara tendencia a la disminución de la cubierta forestal bien acusada que tuvo sus inicios en la época de la colonización y se mantuvo hasta casi mediados del S.XX.

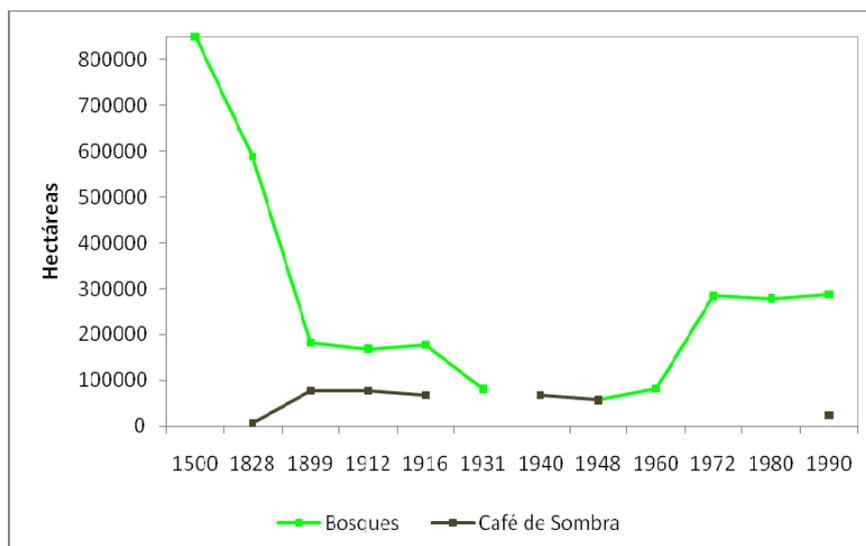


Figura 171. Evolución de la cubierta forestal en la isla de Puerto Rico. Fuente: Murphy, 1916; Wadsworth, 1950; USDC, 1913; USDA, 1982, 1997.

Algunos estudios (Birdsey y Weaver, 1990) estiman que a principios del siglo XX, el 80% de la masa forestal de la isla había sido devastada (Fig. 172 y Fotos 5-6). No obstante, la tasa de deforestación también se redujo o se estabilizó a comienzos del siglo XX. Esta presión sobre la tierra ocurre cuando la población seguía en aumento, existía un gran porcentaje de desempleo y a la vez ocurría la transición a una nueva política económica norteamericana. La década de los 50 marcó el inicio del periodo de la recuperación forestal en la isla, ya que el abandono de las tierras de cultivos dio paso a la sucesión natural y al bosque secundario (USDA, 1997).

Los cambios drásticos de gobierno en la isla, la falta de incentivos económicos para el sector agrícola y otros diversos asuntos, fomentaron la caída directa de dicha actividad, dando paso a un abandono de las tierras, que luego da paso a una intensa recuperación forestal, llegando a las 287 mil ha de bosque en 1990 (USDA, 1997). Según el USDA (2003) el bosque en la isla ha aumentado un 57% desde el abandono del sector agrícola.

Entre los años 1945-1950, el gobierno adquirió terrenos, con la intención de reforestar, proteger las cuencas hidrográficas y conservar el suelo, sin embargo no se conoce con exactitud la cantidad de hectáreas que se reforestaron en ese periodo (Imus, 1955). Además, en la década de los años 70, el gobierno se dio a la tarea de reforestar unas 11200 hectáreas de bosque, mientras se estima que la empresa privada reforestó otras 27000 hectáreas (USDA, 1982). Aunque se reconocen los innumerables beneficios del bosque (control de cantidad y calidad de agua, recreación, madera, investigaciones y refugio para la vida silvestre) y muchos estudios confirman el aumento de las masas forestales (Helmer et al. 2002; Martinuzzi et al. 2007; Lugo y Helmer, 2003), aún se desconoce la envergadura que pudo haber alcanzado dicha política de reforestación en toda la isla. Entre las especies más plantadas en esa década se encuentra el pino Caribeño (*Pinus caribaea* Morelet), la caoba (*Swietenia macrophylla* King y *S. mahagoni* Jacq.), el eucalipto (*Eucalyptus robusta* J.E. Smith) y la teca (*Tectona grandis*) (USDA, 1982). La superficie forestal al día de hoy abarca seis bosques distintos, el Bosque Seco Sub-tropical, Bosque Húmedo Sub-tropical, Bosque Muy Húmedo Sub-tropical y Bosque Pluvial Tropical, Bosque Muy Húmedo Montano y Bosque Pluvial Montano Bajo.

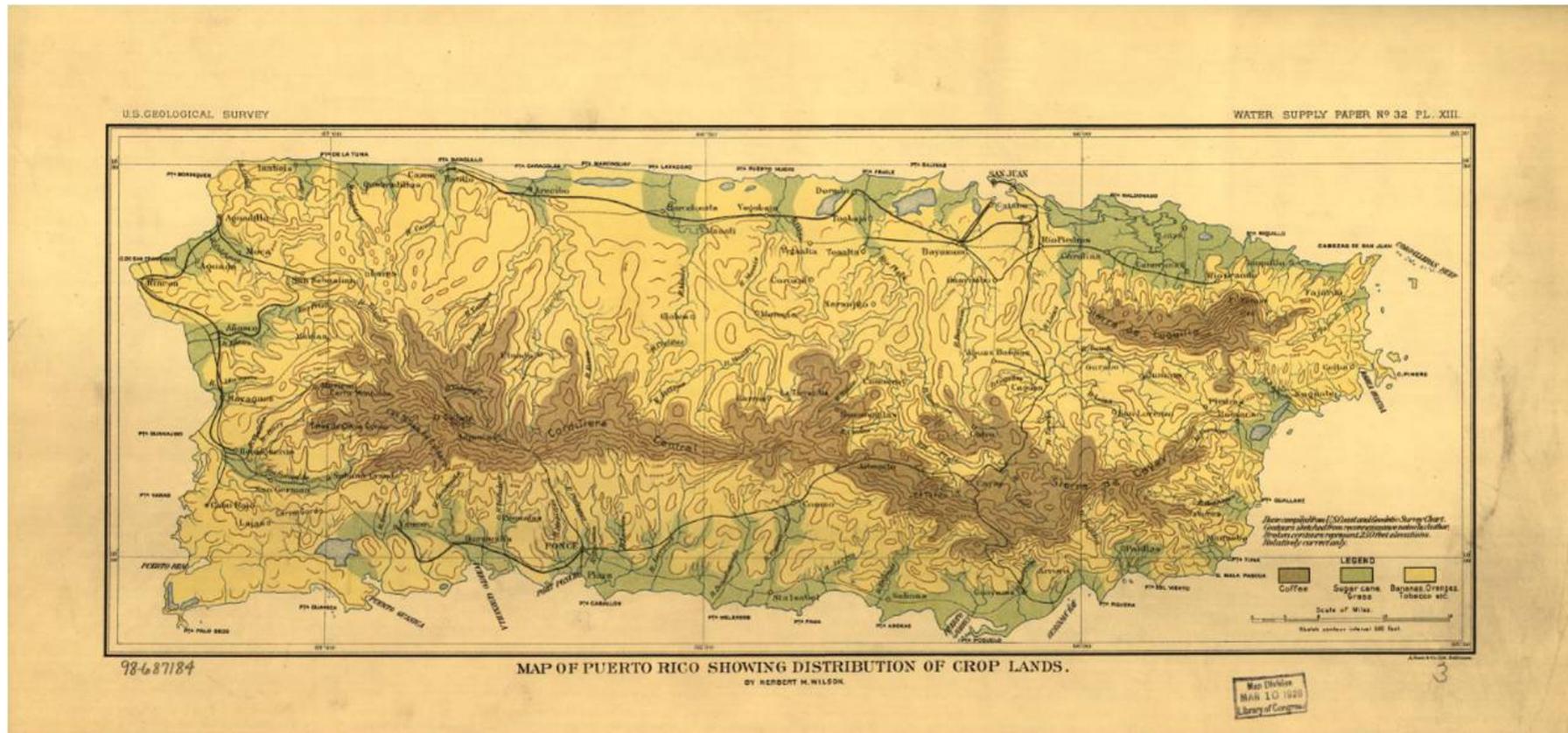


Figura 172. Mapa de la distribución de las tierras de cultivo en la isla de Puerto Rico en 1928. “American Memory Collection Web Site of the Library of Congress, Washington”



Foto 5. Finca de Tabaco en el municipio de Cayey. Puerto Rico. Principios del siglo XX.
Fuente: "American Memory Collection Web Site of the Library of Congress, Washignton".



Foto 6. Finca de Tabaco en el municipio de Barranquitas, Puerto Rico. Principios del siglo XX.
Fuente: "American Memory Collection Web Site of the Library of Congress, Washignton".

9.1.1 Cuenca Río Grande de Arecibo.

Los usos de suelo predominantes en la cuenca son los bosques y los pastos. Entre ambos representan un 52% seguido de la agricultura con un 42%, con predominio del cultivo de café y otros frutos menores (DRNA, 2005b). No obstante, el cultivo de café de sombra, en relación con los procesos hidrológicos y la cubierta de terreno, podría ser considerado como bosque (Foto 7). Los humedales son frecuentes también en áreas cercanas a la costa. Aunque los municipios que se encuentran en la cuenca han ido creciendo en población, la expansión urbana representa sólo un 4% del territorio en la cuenca (USGS, 1996). Este crecimiento es más acentuado en los municipios costeros (Arecibo).



Foto 7. Siembra de café sin sombra en Maricao, Puerto Rico.

Con la llegada de las empresas y las fábricas farmacéuticas (1960) a la isla, en especial a los municipios de Arecibo y Manatí en la costa norte centro, se dio una migración desde el campo a las ciudades. Surge un flujo de población hacia los municipios costeros como se había mencionado anteriormente. El municipio que cuenta con más población es Arecibo (municipio costero), triplicando el número de habitantes en comparación con los otros (tabla 70). La cuenca alberga una población que alcanza los 100 mil habitantes (Fig. 173) incluyendo las zonas urbanas de distintos municipios que se encuentran dentro de la misma: Adjuntas, Jayuya, algunos sectores de Utuado y Arecibo (USGS, 1996). La población de la cuenca ha ido en aumentando progresivamente. Además, la población total, contando las áreas limítrofes a la cuenca, alcanza 172 mil habitantes.

Tabla 70. Área y Población (N° de habitantes) por municipios de la cuenca del Río Grande de Arecibo. Fuente. NCEEUU y JP (2006).

Municipio	km ²	1970	1980	1990	2000	2005	% Rural 2000	% Urbana 2000
Adjuntas	173.8	18691	18786	19451	19143	N/A	42.9	57.1
Jayuya	115.5	13588	14722	15527	17318	N/A	65.8	34.2
Arecibo	443.5	73468	86766	93385	100131	102986	8.5	91.5
Utuaado	297.8	35494	34505	34980	35336	N/A	33.5	66.5

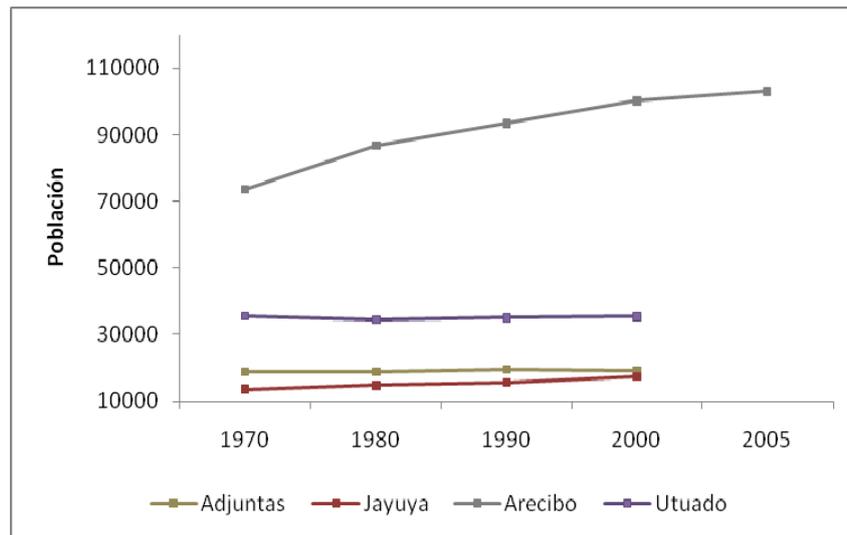


Figura 173. Evolución de la población en los municipios de la Cuenca del Río Grande de Arecibo. Fuente: NCEEUU y JP (2006).

En el municipio costero de Arecibo la manufactura alcanzaba el 13% del empleo en 2002. También se observa que por encima del 90% de la población de dicho municipio costero vive en zonas urbanas (Fig.174). Con la excepción del municipio de Jayuya, en todos los demás, la mayor fuente de ingreso es la agricultura y la administración pública.

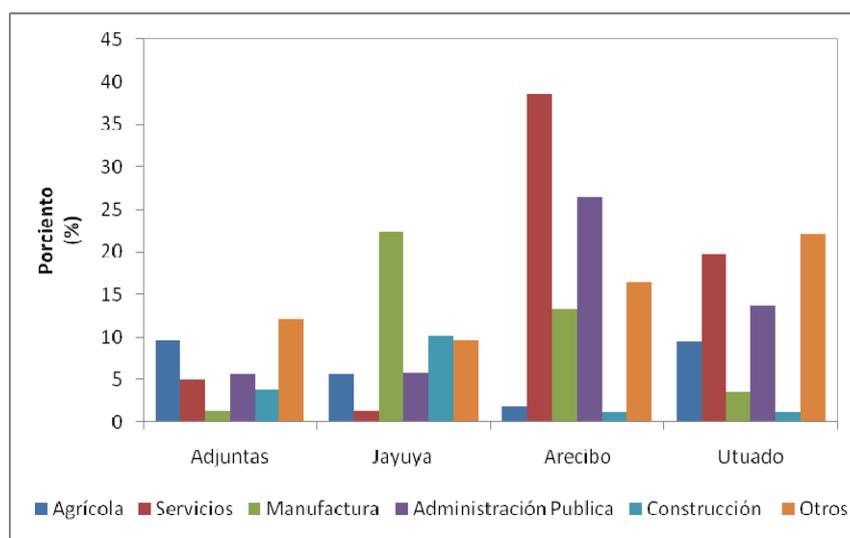


Figura 174. Porcentaje de sectores económicos por municipios para el 2002. Cuenca Río Grande de Arecibo. Fuente. JP (2006). Otros: comercio, transporte y almacenamiento, finanzas bienes raíces y seguros, y minería.

En la cuenca del Río Grande de Arecibo se ha calculado en este trabajo el área que ocupaba cada uso de suelo en distintos años con el objeto de tener una información comparable y analizar la evolución. El área total de la cuenca es de 665 km². En el año 1951 se observó que aproximadamente 49 km² (7%) eran utilizado para cultivos con vegetación leñosa (palmas de cocos, café, bananas, plátanos, cítricos y mango) en la parte alta de la cuenca y en la parte baja cultivos de herbáceas (caña de azúcar, heno, piña, maíz entre otros). La ocupación forestal alcanzaba un 28% (183 km²), los pastos y arbustos un 25% (tabla 71). Cabe señalar que el área ocupada por el cultivo de café de sombra era cerca del 37%. Tomando en consideración que este tipo de cultivo se mezclaba con el bosque u otros cultivos de mayor tamaño, podemos decir que el área forestal alcanzaba el 60%.

La política de reforestación del gobierno en los años 70 pareció rendir frutos en la década de los años 90, donde se refleja un aumento en las masas forestales alcanzando a ocupar el 47% de la cuenca y disminuyendo la superficie de café. En el nuevo milenio (2007), un 50% aproximadamente de la cuenca está cubierto por bosques, 19% pastos y arbustos, 3% urbano y 1% agrícola (Figs. 175, 176, 177, 178, 179). En dicho año, se ha encontrado que un 25% de la cuenca estaba cultivada con café de sombra ubicado en el área sur de la misma.

Tabla 71. Usos de suelo y cubierta de terrenos (km²) en la Cuenca del Río Grande de Arecibo

Año	Usos	Agrícola		Forestal		Pastos y Arbustos		Urbano		Cafetales		Área Total
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	
1951		49.4	7.4	183.7	27.6	165.8	24.9	16.1	2.4	250.0	37.7	665 km ²
1971		27.8	4.2	227.7	34.2	150.2	22.6	19.0	2.8	241.1	36.3	665 km ²
1994		12.0	1.8	312.0	46.9	122	18.3	21.0	3.1	196.0	29.4	665 km ²
2007		8.4	1.3	337.5	50.7	125.6	18.9	22.7	3.4	170.1	25.5	665 km ²

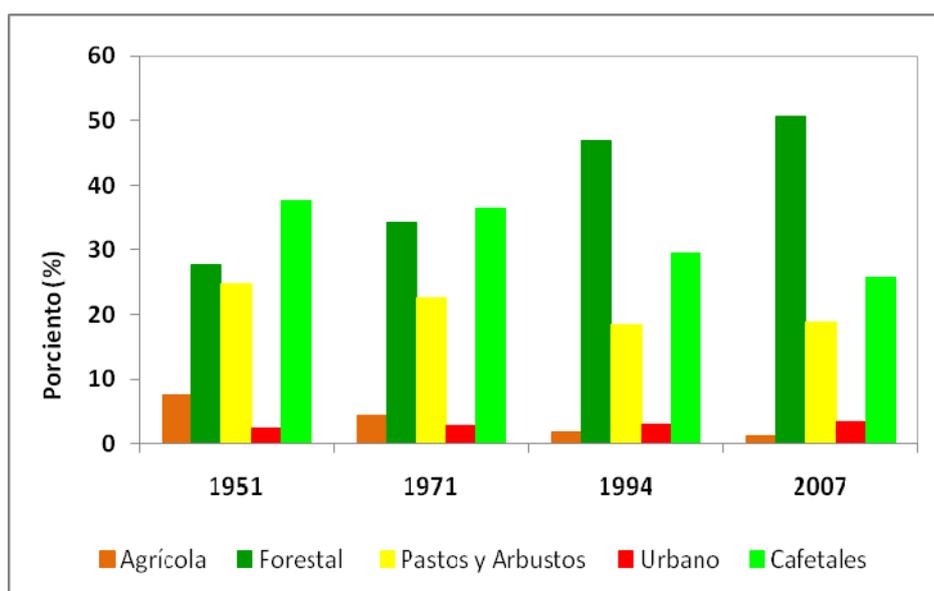


Figura 175. Evolución de la cobertura vegetal y usos de suelo en los últimas décadas. Cuenca Río Grande de Arecibo

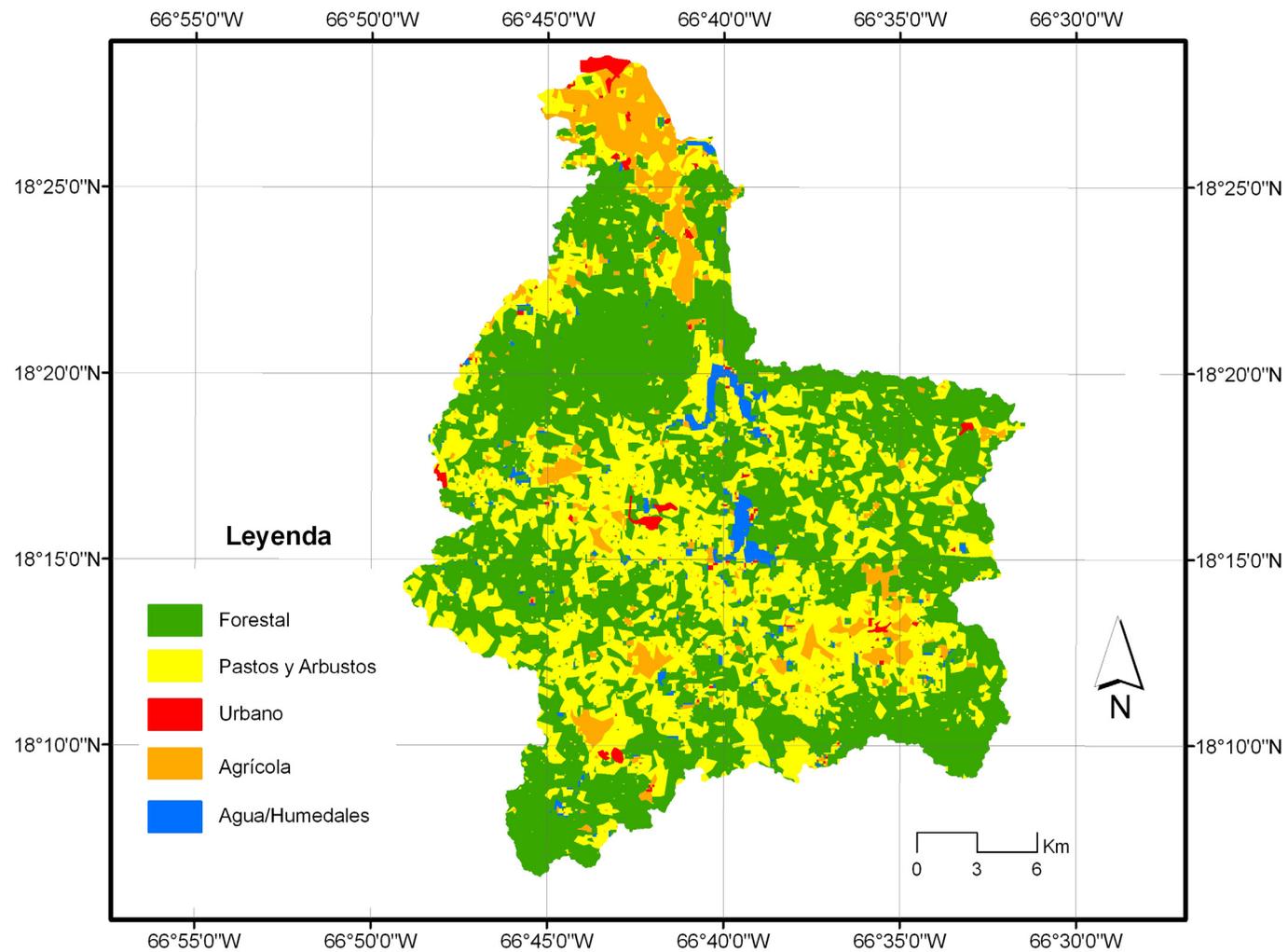


Figura 176. Cubierta de terreno y usos de suelo 1951. Cuenca Río Grande de Arecibo.

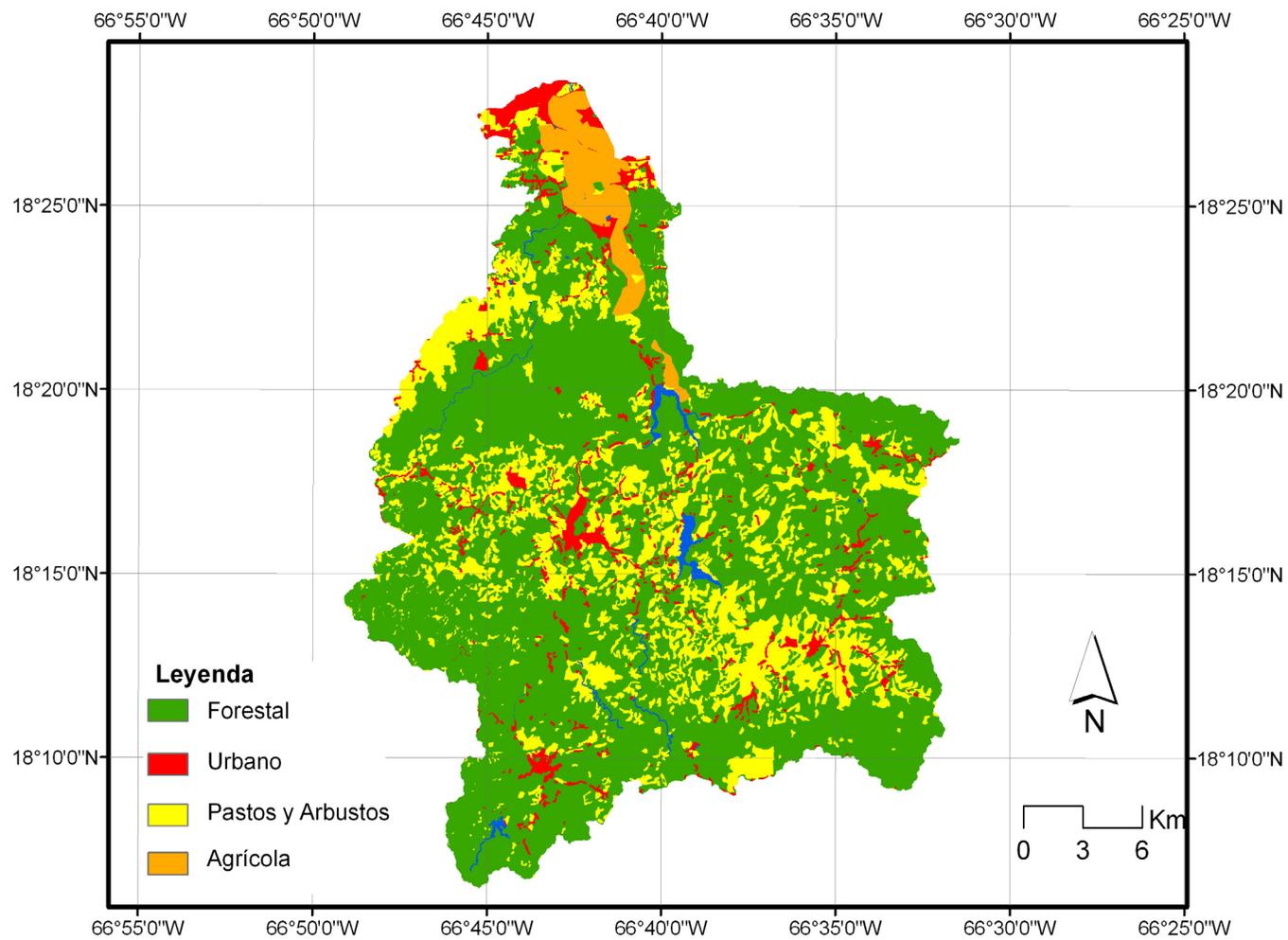


Figura 177. Cubierta de terreno y usos de suelo 1971. Cuenca Río Grande de Arecibo.

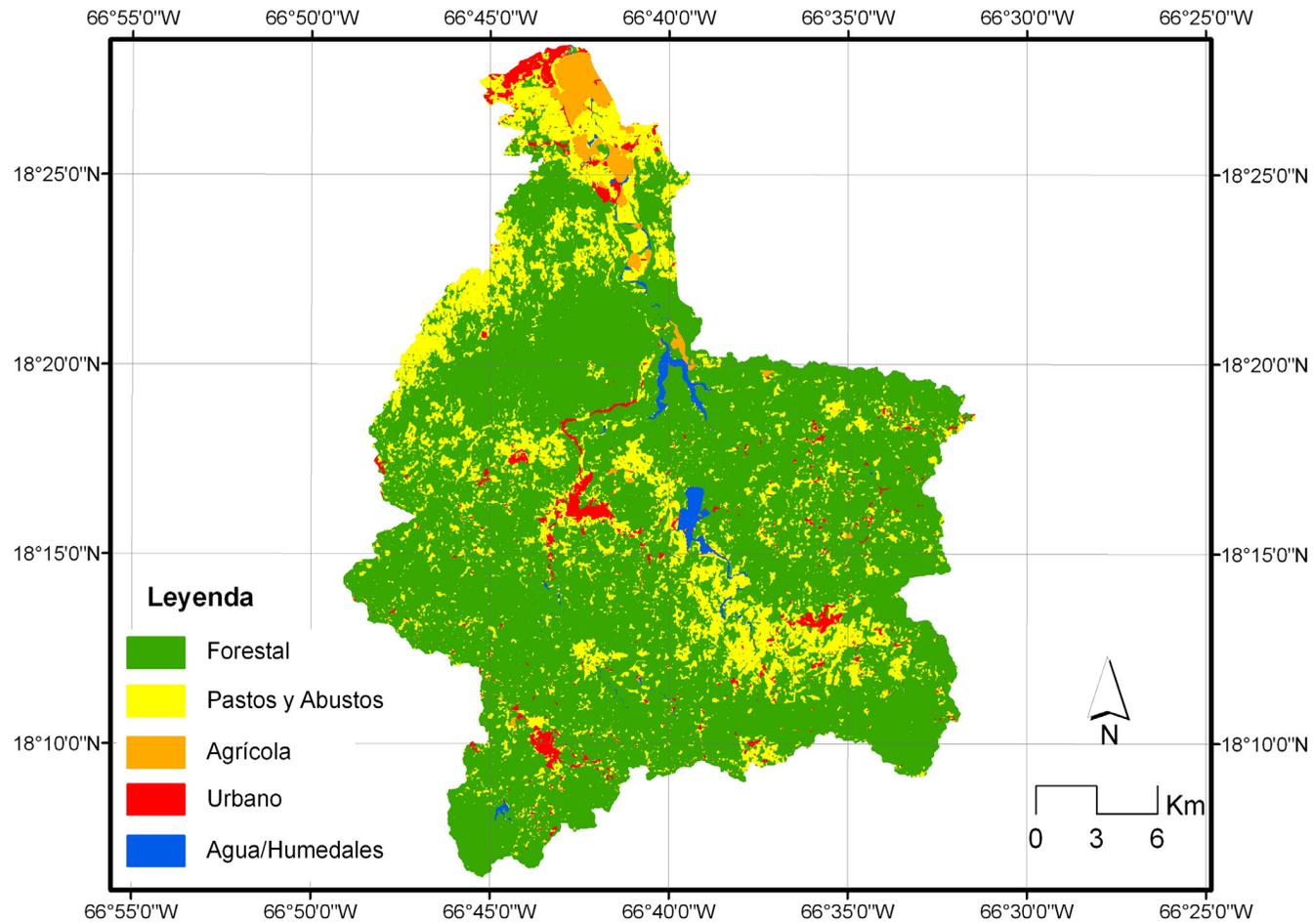


Figura 178. Cubierta de terreno y usos de suelo 1994. Cuenca Río Grande de Arecibo.

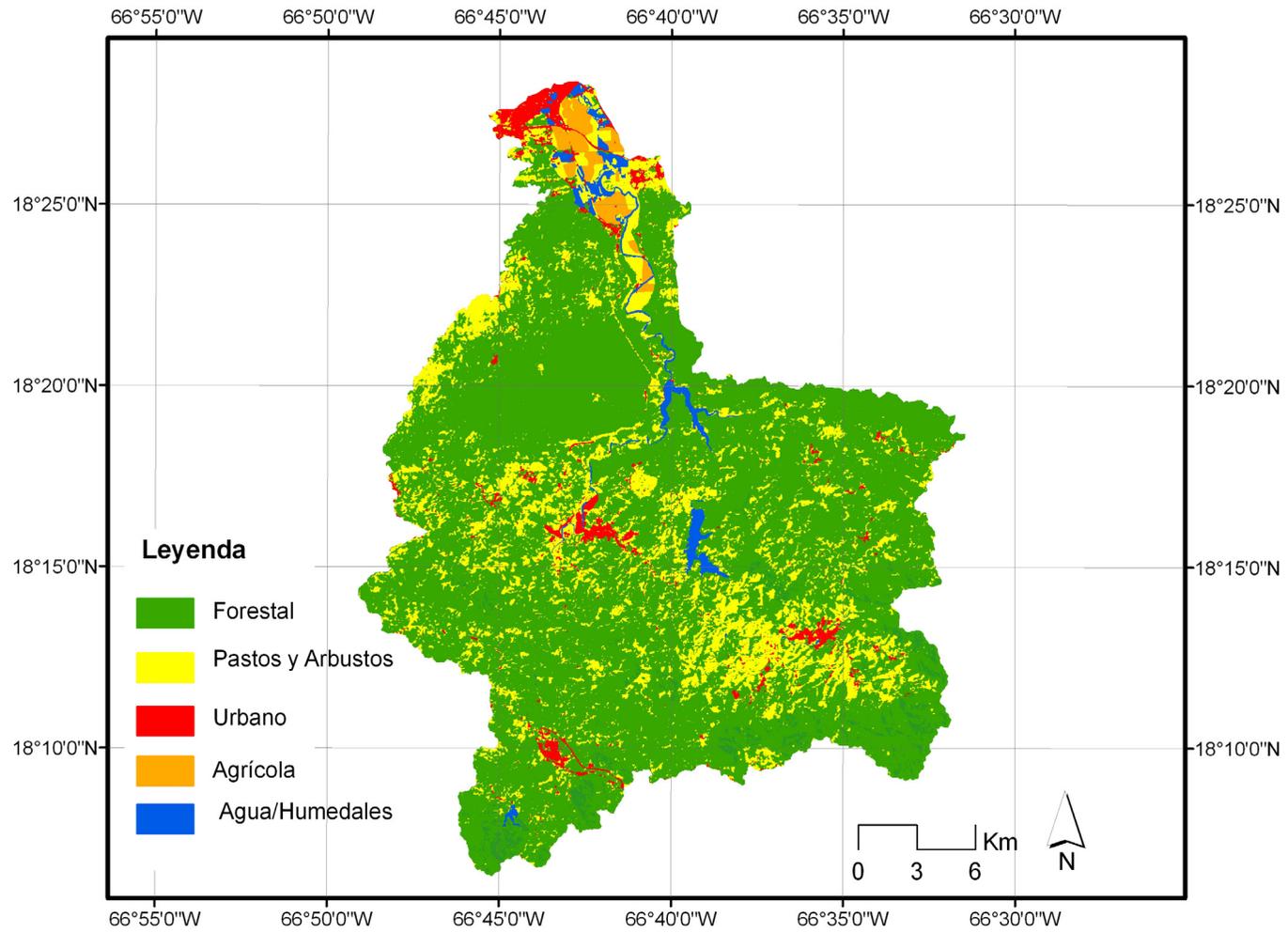


Figura 179. Cubierta de terreno y usos de suelo 2007. Cuenca Río Grande de Arecibo.

9.1.2 Cuenca Río Grande de Manatí

Según el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (2005b), los usos del suelo son diversos, pero principalmente abundan los pastos y los bosques, con un 80% de ocupación. Las zonas agrícolas representan un 19% del uso del suelo, no obstante, debido a los tipos de cultivos que se siembran en la cuenca alta (aguacates, café de sombra, plátanos) algunos usos agrícolas se contaron como forestal o pastos y arbustos en cuanto a cubierta de terreno y procesos hidrológicos se refieren (Foto 8). En áreas más baja de la cuenca actualmente se realiza otro tipo de siembra y cultivo (papas, ñame, batata, yuca y piña) que requiere movimiento de terreno y en ciertas temporadas el suelo permanece desnudo (Foto 9). Las zonas urbanas cuentan con un 5% de terreno ocupado. Al igual que la cuenca del Río Grande de Arecibo, esta cuenta con áreas industriales en el área norte.



Foto 8. Llanuras aluviales del Río Grande de Manatí. Barrio Montebello, Manatí. Finca de ganado para leche.



Foto 9. Siembra de tubérculos (ñame y batata, entre otros) en el municipio de Manatí, Puerto Rico.

El mismo patrón de distribución poblacional que ocurrió en toda la isla, se vio reflejado en ambas cuencas de la región hidrográfica Cibuco-Guajataca. Con la entrada de las fábricas norteamericanas, se abandonaron las tierras de cultivo. Sucedió un flujo migratorio del campo a la ciudad y, en este caso, de los municipios ubicados más cerca de la Cordillera Central a los municipios costeros donde se ubican los mayores centros industriales, en especial hacia el municipio de Manatí (Fig. 180). Como se puede observar en la tabla 72, el municipio costero de Manatí es el que alberga un mayor número de habitantes. Florida fue declarado municipio en 1970 entre barrios anteriormente pertenecientes a Barceloneta y Arecibo.

La cuenca del Río Grande de Manatí cuenta con más población que la Cuenca del Río Grande de Arecibo y contiene 9 municipios en su territorio. Albergaba una población aproximada de 127800 habitantes para el 2004. No obstante, con toda la población limítrofe de la cuenca, alcanzan 236 mil habitantes.

El sector de manufactura se concentró en los municipios costeros de Barceloneta y Manatí generando cerca del 60% y el 37% del empleo respectivamente en el 2002 al igual que el sector servicio (JP, 2006). También se pudo observar en la tabla anterior que la gran mayoría de la población de los municipios costeros en esta cuenca, Manatí, Barceloneta y Florida, habita en zonas urbanas. Con excepción de Florida, los municipios del interior como Orocovis, Morovis, Ciales, Barranquitas y Corozal son los que presentan más dependencia de la administración pública y con menos manufactura (Fig. 181).

Tabla 72. Área y población (N° de habitantes) por municipio en la Cuenca del Río Grande de Manatí. Fuente: NCEEUU y JP (2006)

Municipio	Km. ²	1970	1980	1990	2000	2005	% Rural 2000	% Urbana 2000
Orocovis	164.9	20201	19332	21158	23844	N/A	72.8	27.2
Barranquitas	88.7	20118	21639	25605	28909	N/A	4.3	95.7
Morovis	100.8	19059	21142	25288	29965	N/A	7.6	92.4
Florida	39.4	N/A	7232	8689	12367	13706	17.6	82.4
Ciales	66.8	15595	16211	18084	19811	N/A	27.4	72.6
Jayuya	115.5	13588	14722	15527	17318	N/A	34.2	65.8
Corozal	110.3	24545	28221	33095	36867	N/A	4.7	95.3
Manatí	183.0	30559	36562	38692	45409	47818	7.3	92.7
Barceloneta	80.0	20792	18942	20947	22322	22698	1.3	98.7

N/A no hay datos disponible

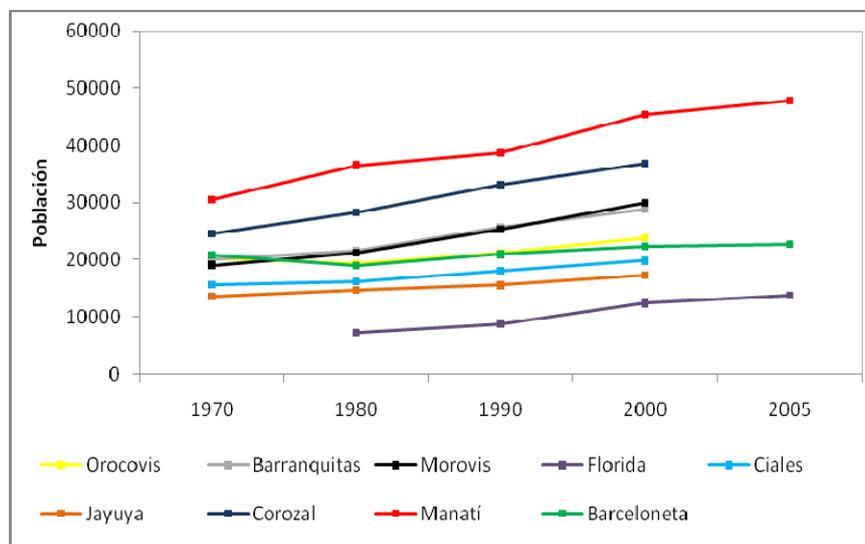


Figura 180. Evolución de la población en los municipios de la Cuenca del Río Grande de Manatí. Fuente: NCEEUU y JP (2006)

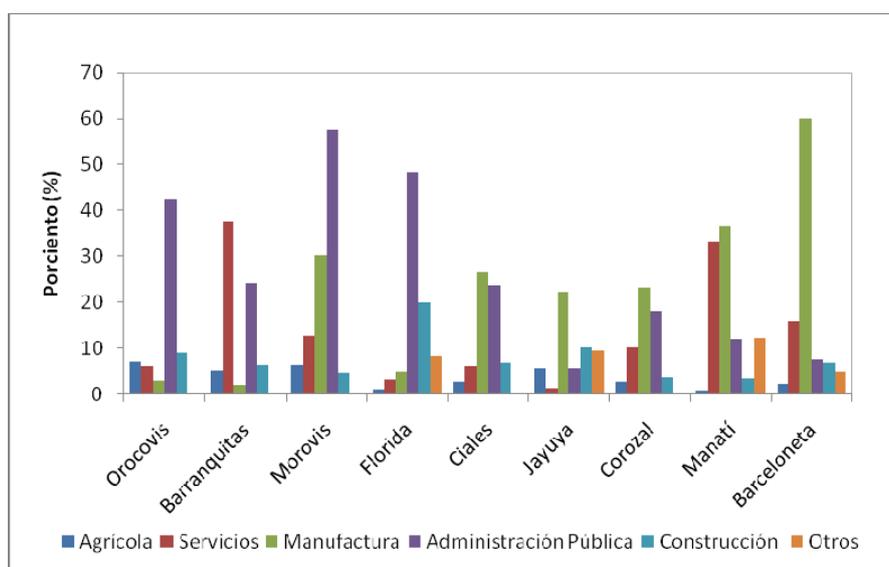


Figura 181. Porcentaje de sectores económicos por municipios para el 2002. Cuenca del Río Grande de Manatí. Fuente: JP (2006)

El área total de la Cuenca del Río Grande de Manatí es de 608 km² y en el año 1951 aproximadamente 51 km² (8%) eran utilizados para cultivos similares a los de la cuenca del Río Grande de Arecibo. La superficie forestal era un poco más alta que la cuenca anterior, con 37%, los pastos y arbustos otro 36%, y el café alcanzaba solo el 14% (tabla 73).

Entrada la década del 90, se refleja un aumento en las masas forestales alcanzando a ocupar el 41% de la cuenca, manteniendo la misma superficie de café, disminuyendo la superficie de pastos y arbustos. En la década del 2000, un 54% aproximadamente de la cuenca estaba cubierto por bosques, 30% pastos y arbustos, 5% urbano y 1% agrícola (Figs. 182, 183, 184, 185 y 186).

Tabla 73. Usos de suelo y cubierta de terrenos (km²) en la Cuenca del Río Grande de Manatí

Año	Usos	Agrícola		Forestal		Pastos y Arbustos		Urbano		Cafetales		Área Total
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	
1951		51.4	8.4	222.2	36.6	221.5	36.4	25.4	4.2	86.5	14.2	(608 km ²)
1971		45.9	7.5	231.2	38.0	228.7	37.6	28	4.6	73.0	12.0	(608 km ²)
1994		28.8	4.7	250.0	41.1	224.0	36.8	29	4.8	72.0	11.8	(608 km ²)
2007		9.1	1.5	325.3	53.5	181.0	29.8	30.3	5	48.2	7.9	(608 km ²)

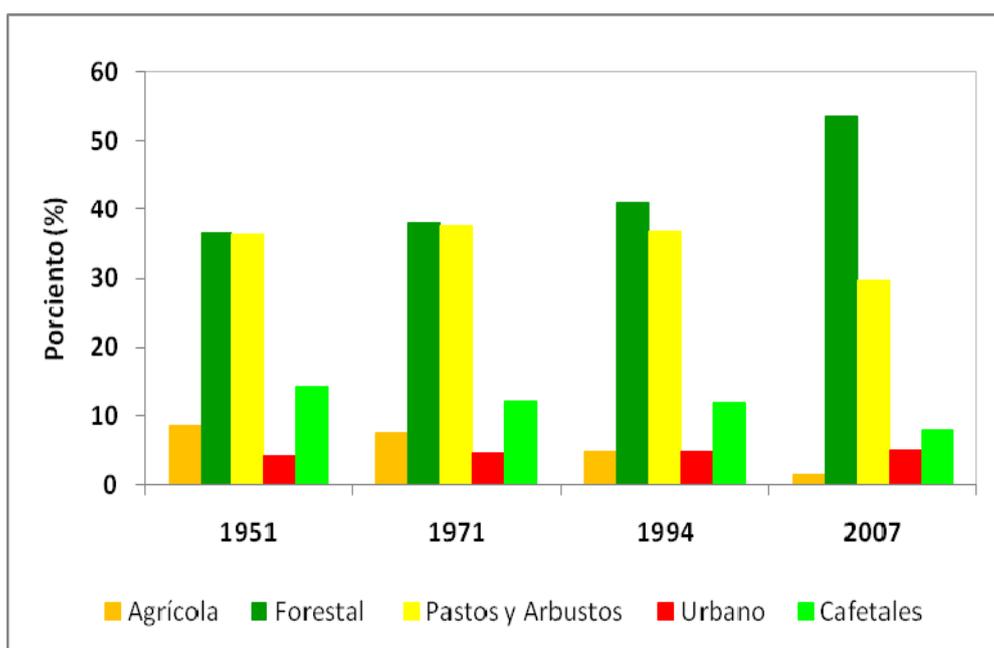


Figura 182. Evolución de la cobertura vegetal y usos de suelo en los últimas décadas. Cuenca Río Grande de Manatí.

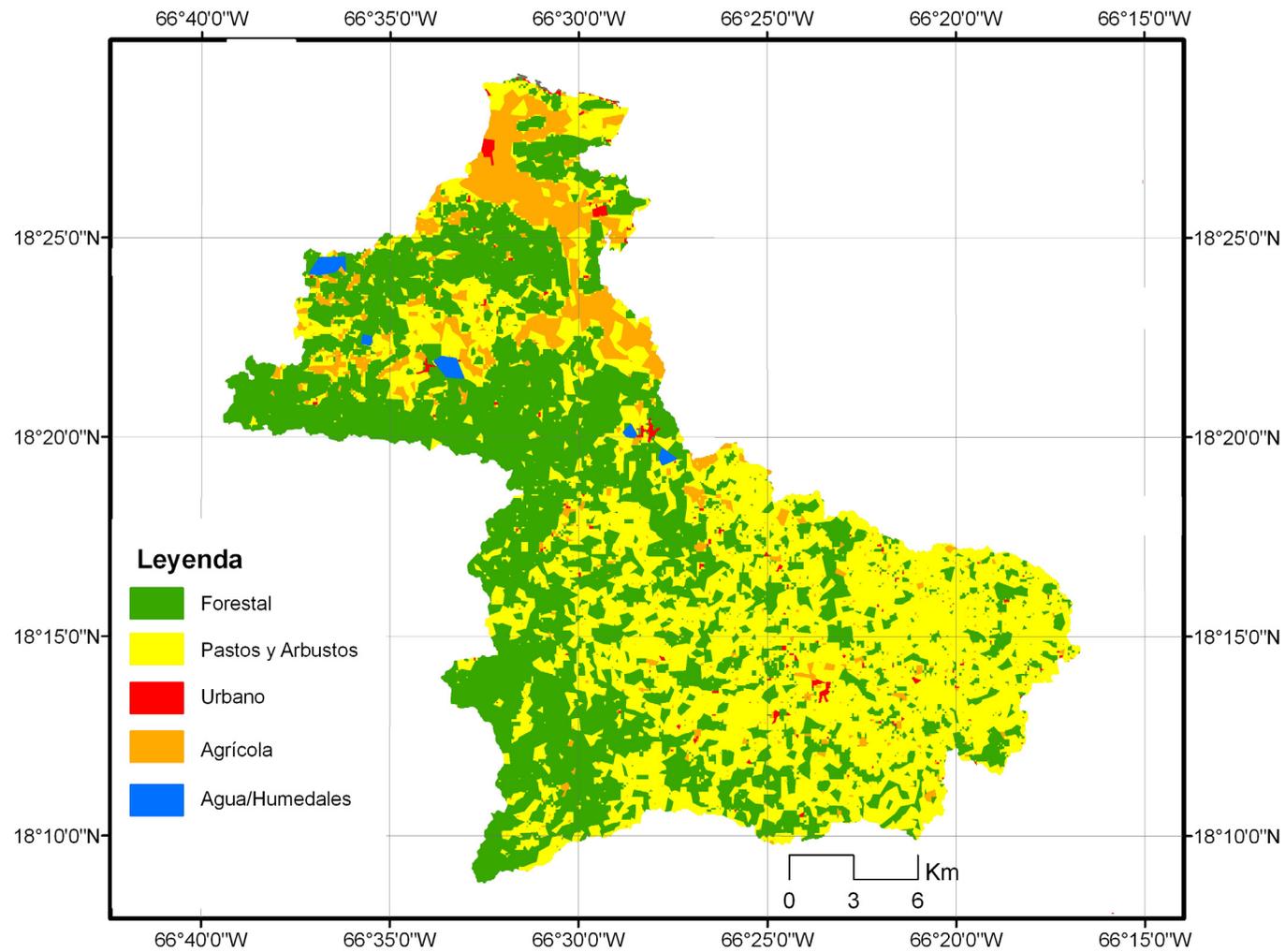


Figura 183. Cubierta de terreno y usos de suelo 1951. Cuenca Río Grande de Manatí.

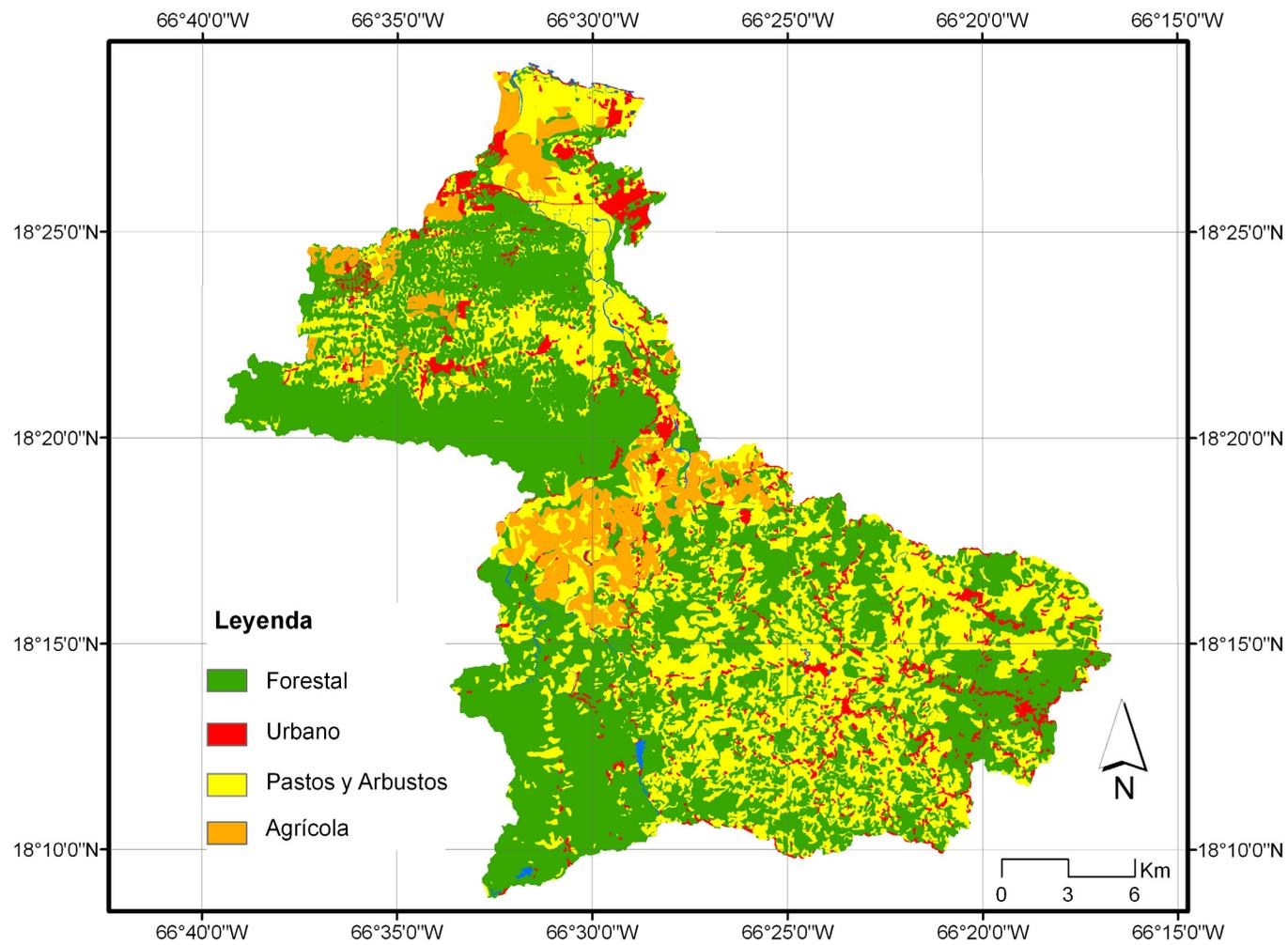


Figura 184. Cubierta de terreno y usos de suelo 1971. Cuenca Río Grande de Manatí.

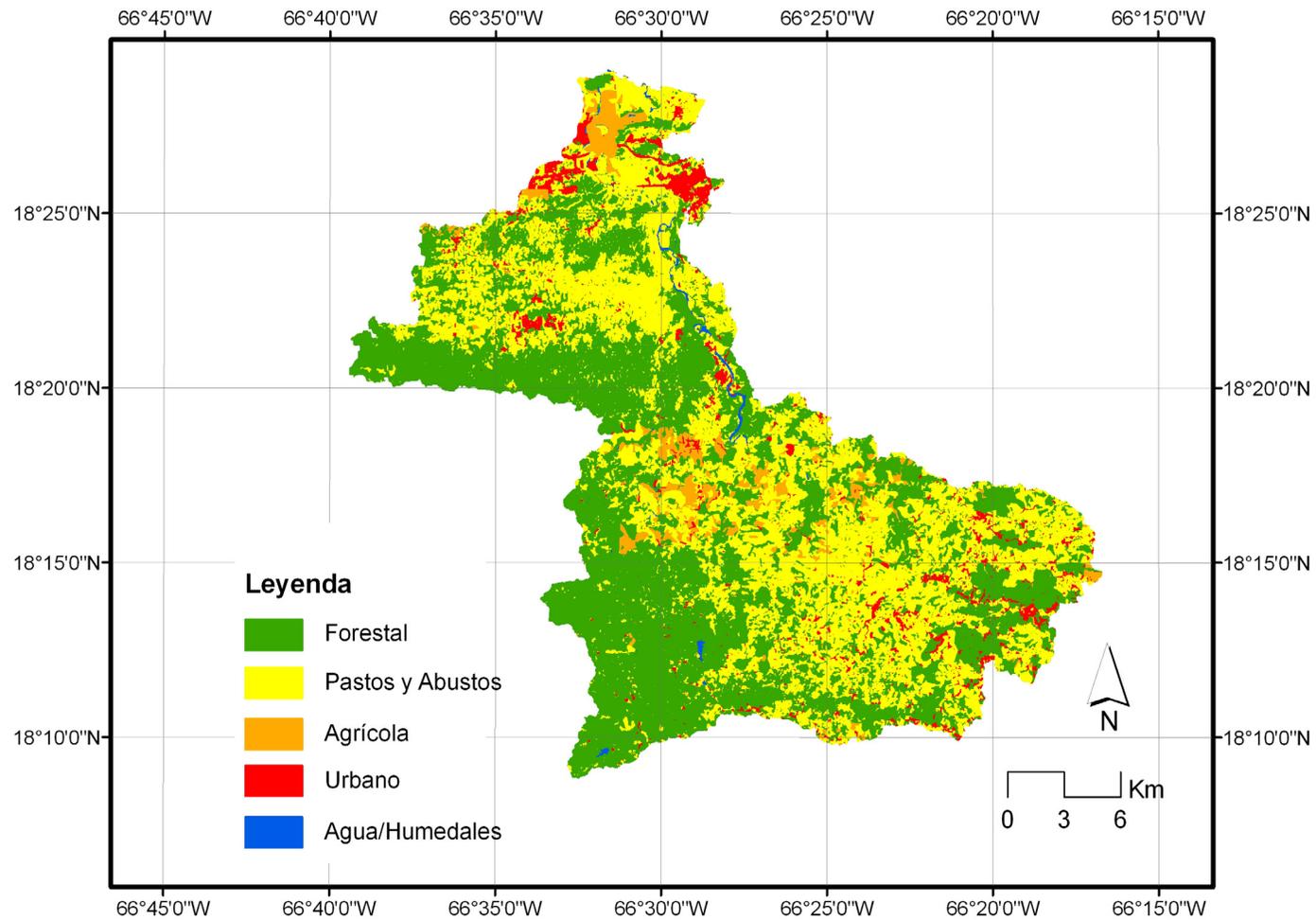


Figura 185. Cubierta de terreno y usos de suelo 1994. Cuenca Río Grande de Manatí.

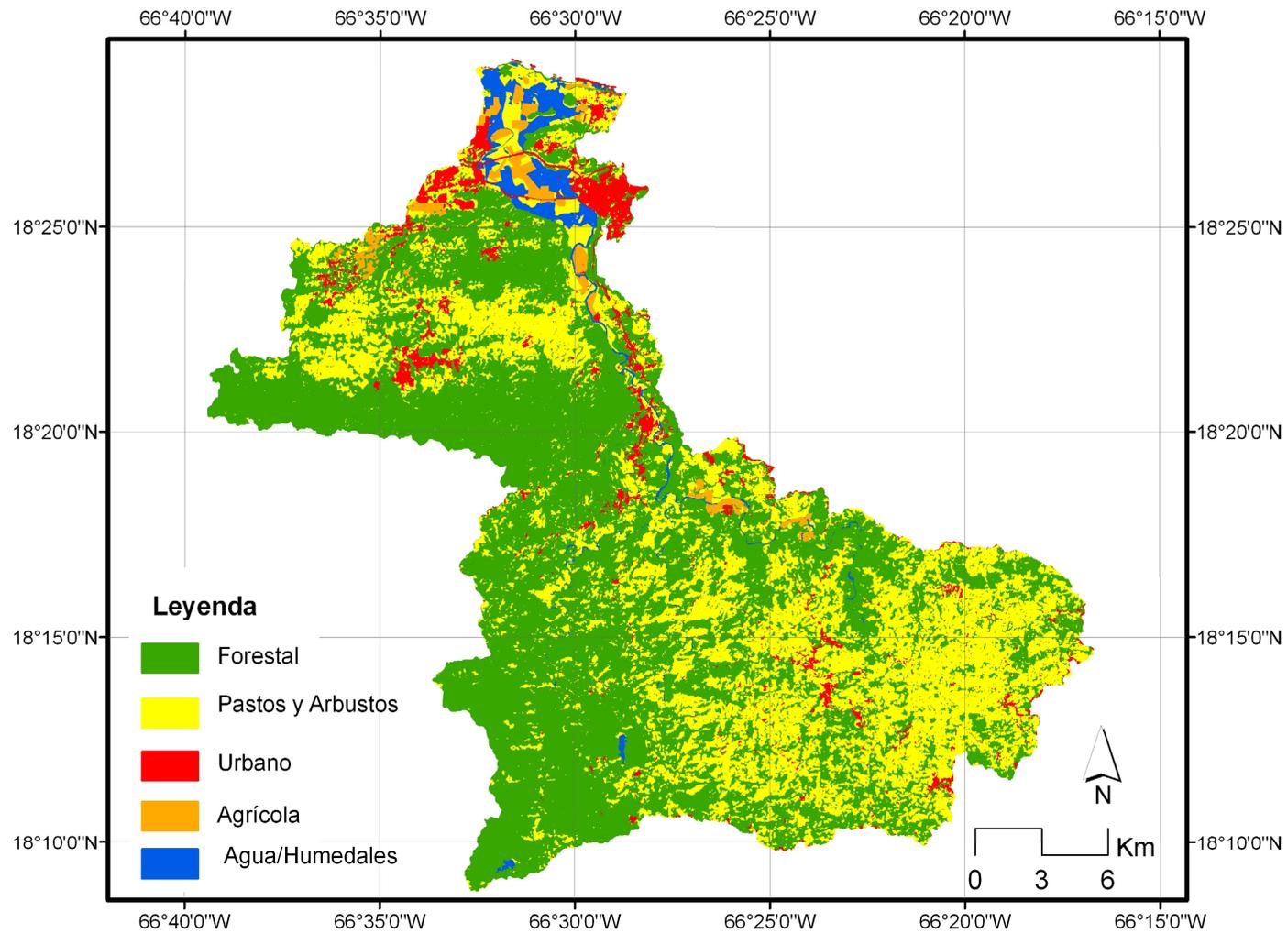


Figura 186. Cubierta de terreno y usos de suelo 2007. Cuenca Río Grande de Manatí.

9.1.3 Cuenca Del Río Culebrinas

La cuenca contaba con 98723 habitantes en 2004 (DRNA, 2005b). Aunque en el mapa se presentan cinco municipios que colindan con la cuenca, la realidad es que la porción de terreno del municipio de Aguadilla (al norte) apenas es significativa, siendo el municipio de mayor población entre los cinco (Fig. 187). Con excepción de Lares, por encima de un 85% de la población vive en áreas urbanas (tabla 74). De igual forma se observa una tendencia paulatina al crecimiento demográfico de la población en todos los municipios.

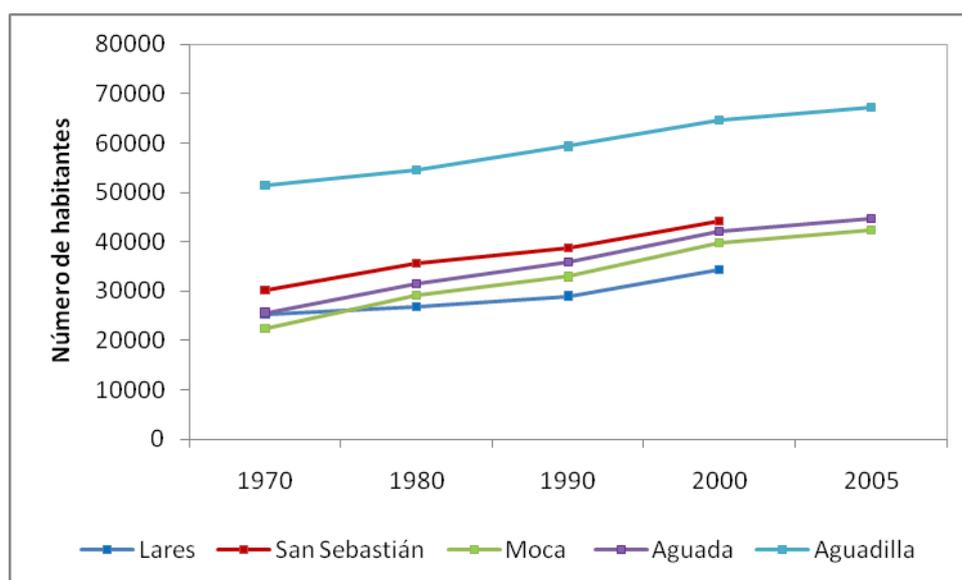


Figura 187. Evolución de la población en los municipios de la Cuenca del Río Culebrinas. Fuente: NCEEUU y JP (2006).

Tabla 74. Área y población (N° de habitantes) por municipio en la Cuenca del Río Culebrinas. Fuente: NCEEUU y JP (2006).

Municipio	Km. ²	1970	1980	1990	2000	2005	% Rural 2000	% Urbana 2000
Lares	159.6	25263	26743	29015	34415	N/A	24.4	75.6
San Sebastián	184.5	30157	35690	38799	44204	N/A	11.9	88.1
Moca	130.3	22361	29185	32926	39697	42451	5.0	95.0
Aguada	118.0	25658	31567	35911	42042	44686	0	100.0
Aguadilla	195.7	51355	54606	59335	64685	67147	0	100.0

El área total de la cuenca del Río Culebrinas es de 266.7 km². En el año 1951 se observó que aproximadamente 91.2 km² (34%) eran utilizado para cultivos de café de sombra mezclados con bananas, plátanos, cítricos y bosque en la parte alta de la cuenca. Mientras, en la parte baja y en las llanuras aluviales predominaban cultivos de caña de azúcar, heno, entre otros con 25% de la superficie. La ocupación forestal arbolada alcanzaba un 5% (13 km²), los pastos y arbustos un 33% (tabla 75).

A finales de los años 30, la legislatura mediante leyes y normativas, trató de estabilizar el precio del café de exportación y de consumo local. No obstante, esta iniciativa fracasó debido a que no pudo remover los excedentes del mercado local (Imus, 1955). Debido al fracaso de la iniciativa de 1938, la Corporación para la estabilización del precio del Café Puertorriqueño, se organizó para regular la compra y venta de la cantidad de café en los mercados locales para mantener el precio lo suficientemente alto como para generar ganancias a los agricultores (Imus, 1955). En la entrada de la Segunda Guerra Mundial estas leyes fueron derogadas.

La política de reforestación del gobierno en los años 50 y 70 pareció rendir frutos para la década de los años 90, donde se observa un claro aumento de las masas forestales alcanzando a ocupar el 18% de la cuenca, aumentando nuevamente los pastos y arbustos y disminuyendo la superficie de café. En el 2007, un 78% aproximadamente de la cuenca estaba cubierto por bosques, pastos y arbustos, con 29% y 44% respectivamente. La superficie urbana refleja el 3% y 1% agrícola (Figs. 188, 189, 190, 191, 192).

Tabla 75. Usos de suelo y cubierta de terrenos (km²) en la Cuenca del Río Culebrinas

Año	Usos	Agrícola		Forestal		Pastos y Arbustos		Urbano		Cafetales		Área Total
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	
1951		66.2	24.8	12.5	4.7	87.3	32.7	9.7	3.6	91.0	34.1	266.7
1971		63.0	26.6	26.1	9.8	70.0	26.3	14.3	5.3	93.0	34.8	266.7
1994		9.7	3.6	48.6	18.2	116.0	43.5	18.9	7.1	72.8	27.3	266.7
2007		2.8	1.1	78.0	29.3	117.5	44.1	27.0	10.1	40.7	15.3	266.7

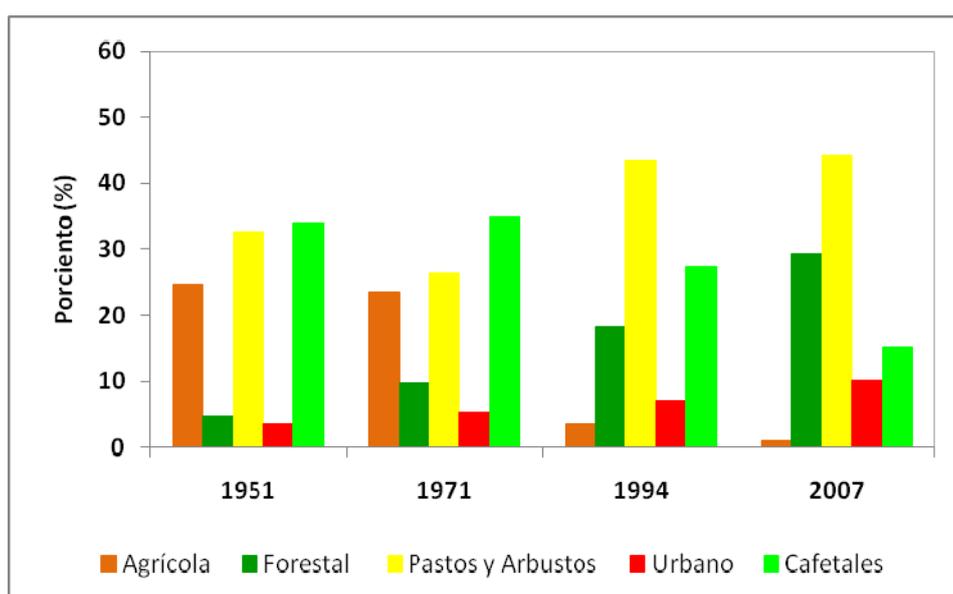


Figura 188. Evolución de la cobertura vegetal y usos de suelo en los últimas décadas. Cuenca Río Culebrinas.

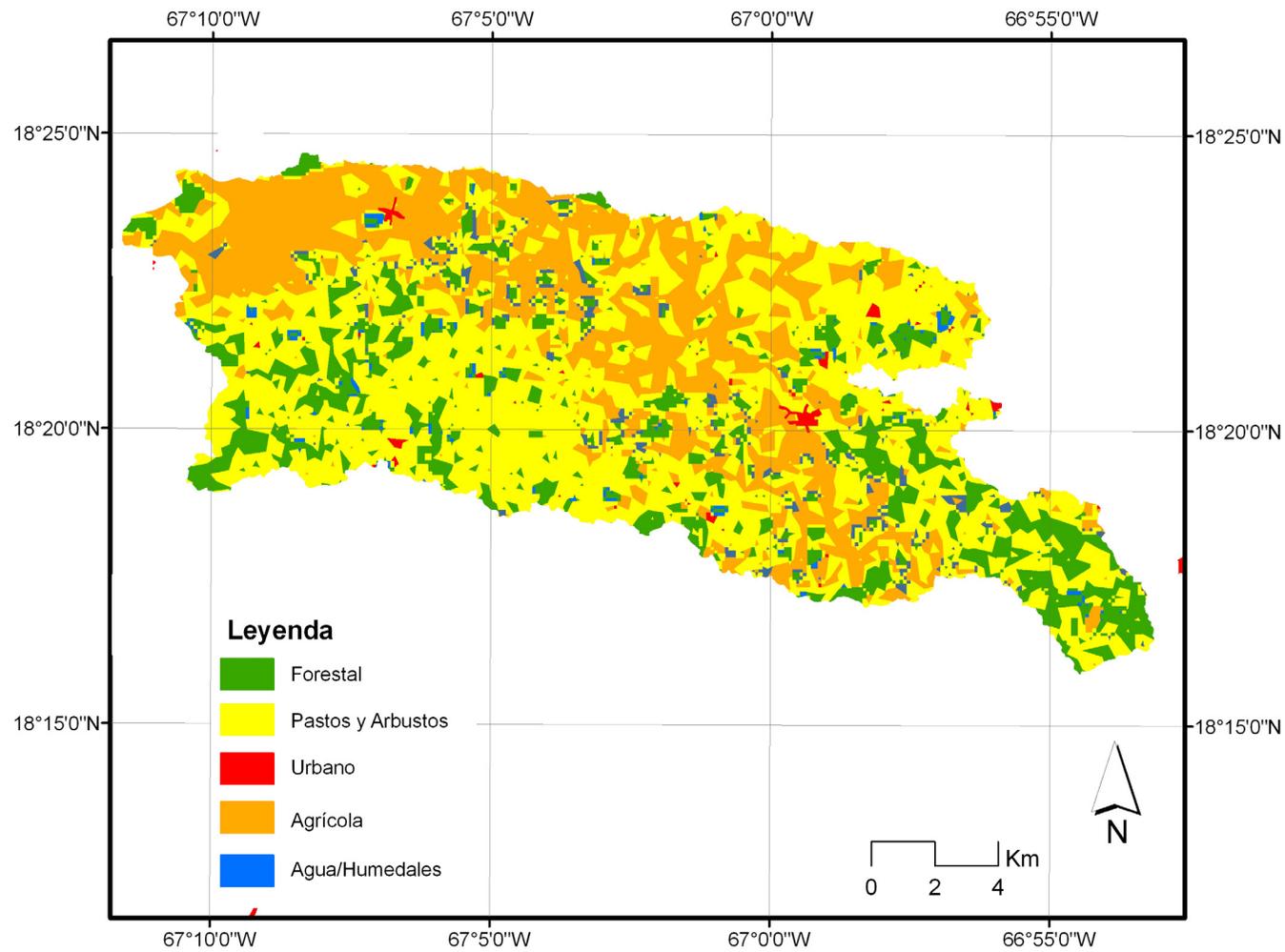


Figura 189. Cubierta de terreno y usos de suelo 1951. Cuenca Río Culebrinas

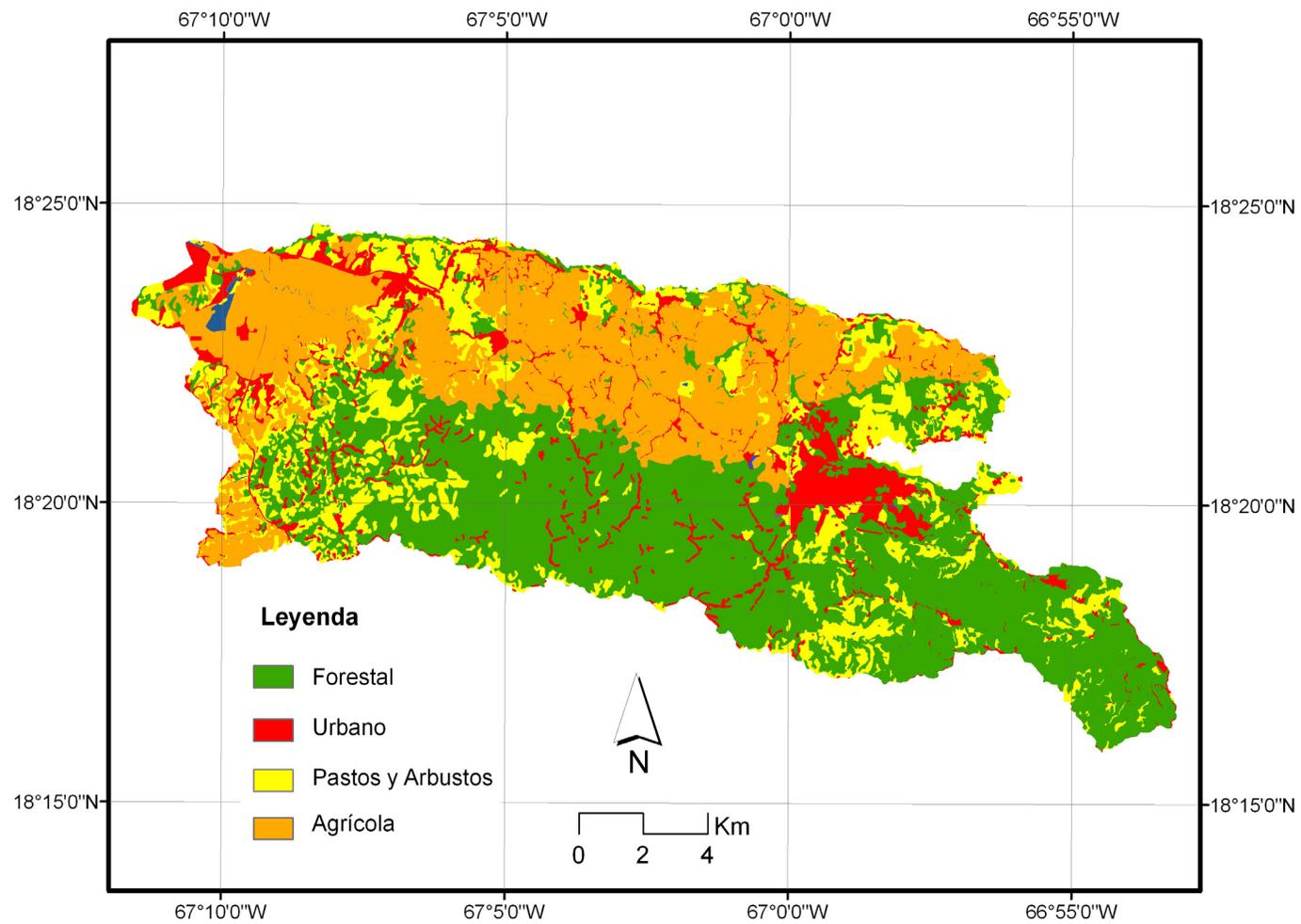


Figura 190. Cubierta de terreno y usos de suelo 1971. Cuenca Río Culebrinas

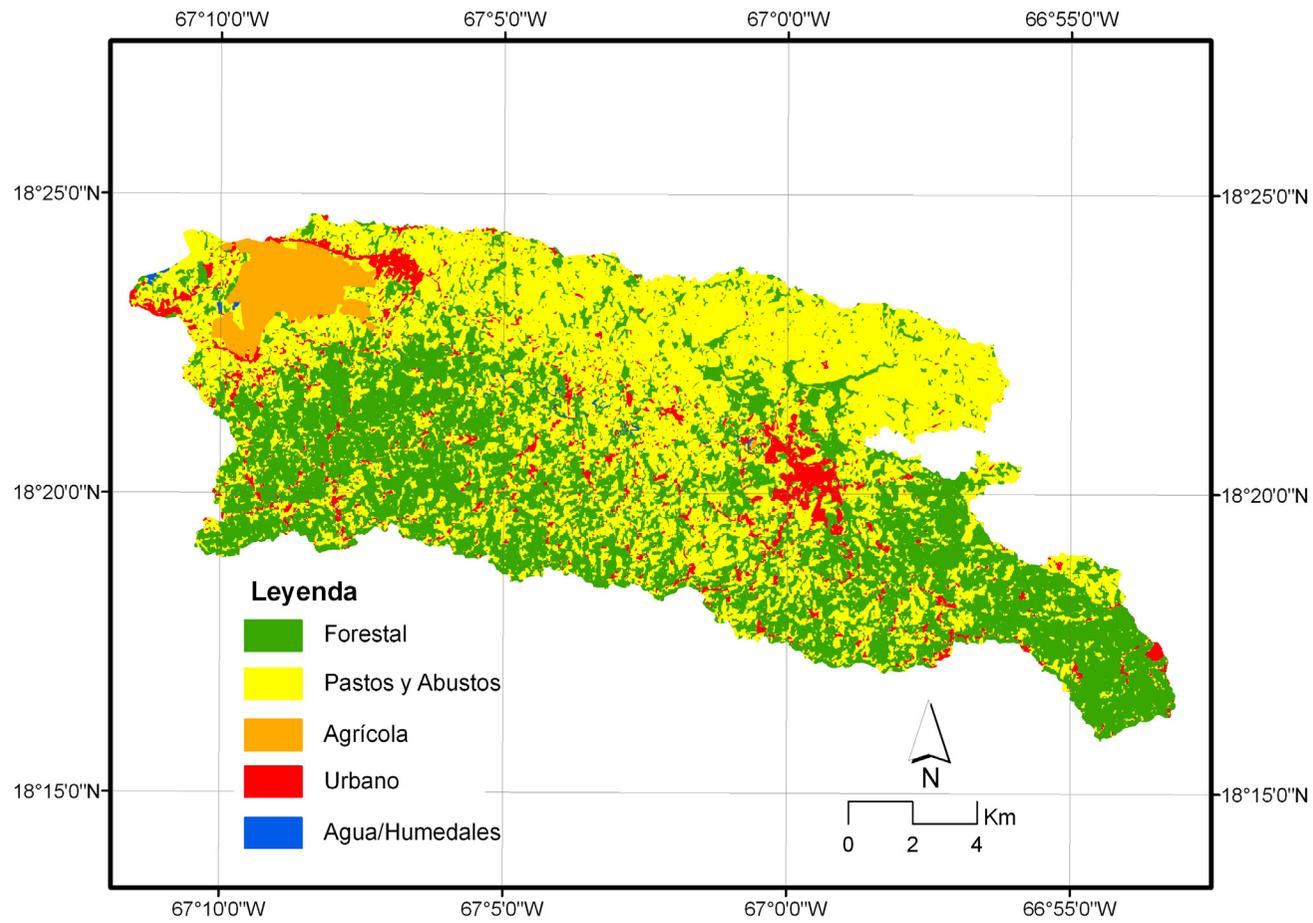


Figura 191. Cubierta de terreno y usos de suelo 1994. Cuenca Río Culebrinas

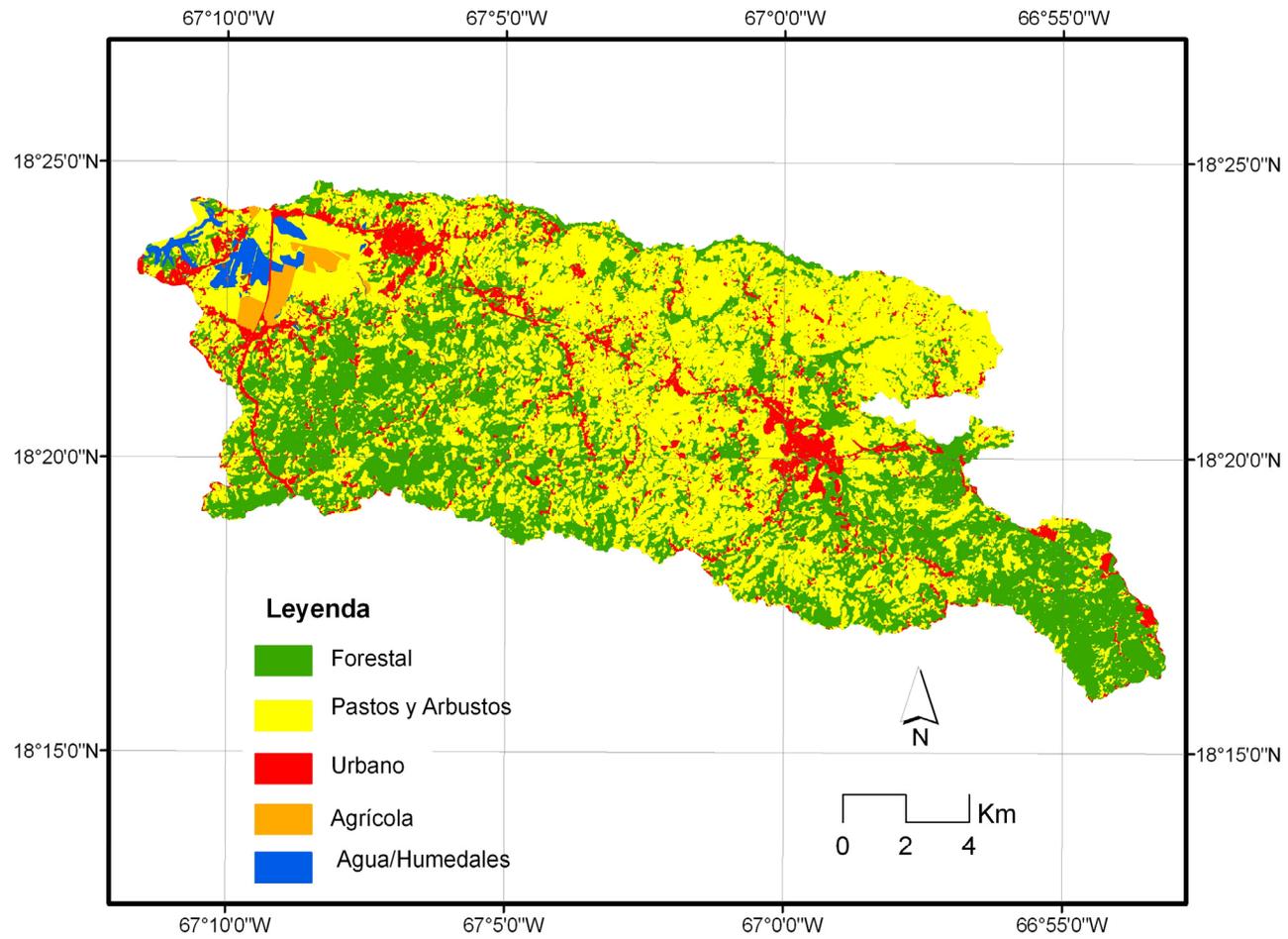


Figura 192. Cubierta de terreno y usos de suelo 2007. Cuenca Río Culebrinas.

9.1.4 Cuenca Río Fajardo

La población de la cuenca se estimó para el 2004 en 21858 habitantes incluyendo los dos municipios, Fajardo y Ceiba (DRNA, 2005b). En 30 años (1970-2000) la población de cada municipio ha crecido casi el doble (tabla 76 y Fig. 193). Los bosques y los pastos cubren por encima del 70%, seguido por las zonas agrícolas que alcanzan un 15% y las aéreas urbanas cercas del 10% (JP, 2006). Los llanos aluviales de la cuenca y en especial allí donde predominan las series de suelos mezcladas Coloso-Toa-Bajura, fueron cultivados durante muchos años para la producción de la caña de azúcar.

Tabla 76. Área y población (N° de habitantes) por municipio en la Cuenca del Fajardo.
Fuente: NCEEUU y JP (2006)

Municipio	Km. ²	1970	1980	1990	2000	2005	% Rural 2000	% Urbana 2000
Ceiba	411.3	10312	14944	17145	18004	18439	7.3	92.7
Fajardo	272.0	23032	32087	36882	40712	42010	2.2	97.8

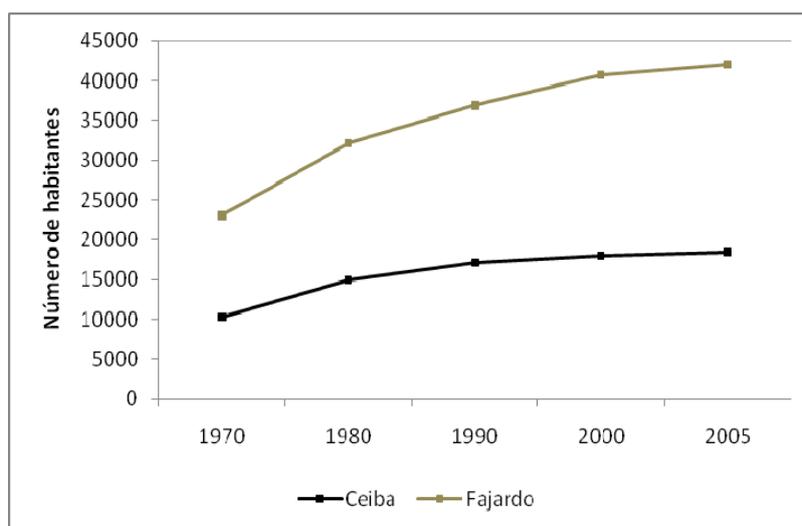


Figura 193. Evolución de la población en los municipios de la Cuenca del Río Fajardo. Fuente: NCEEUU y JP (2006)

En la cuenca del Río Fajardo (tabla 77) predomina el sector económico de la administración pública (23.25%) seguido por la economía de servicios con 22.74% (Fig. 194). Aunque no existen datos del porcentaje que refleja el sector agrícola, se sabe que 16.5 km² de terreno son utilizados por dicho sector en el municipio de Fajardo para el 2007, mientras, en el municipio de Ceiba son cultivados 11.2 km² en el mismo año (USDA, 2007).

Tabla 77. Porcentaje de sectores económicos por municipios para el 2002. Cuenca Río Fajardo. Fuente: NCEEUU y JP (2006).

Municipio	Agrícola	Servicios	Manufactura	Administración Pública	Construcción	Otros
Ceiba	-	16	1.5	45.7	15.2	13.7
Fajardo	-	37.4	10	17.2	1.24	38.5

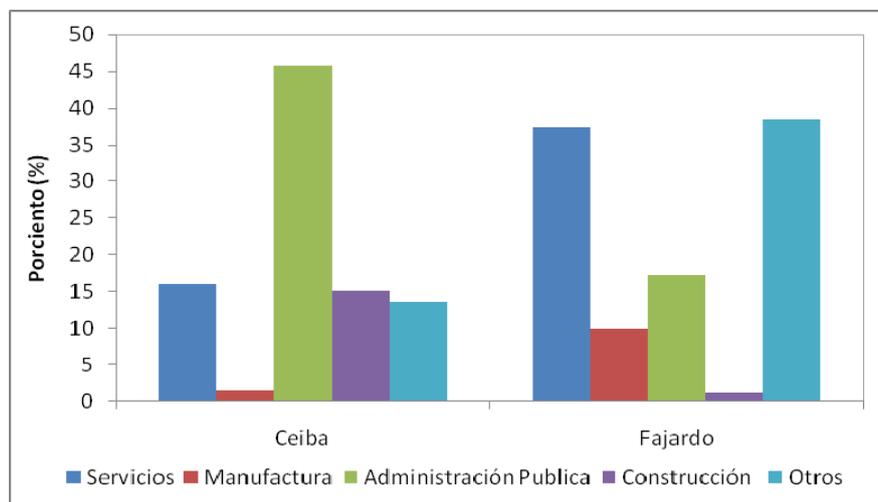


Figura 194. Porcentaje de sectores económicos por municipios para el 2002. Cuenca del Río Fajardo. Fuente: JP (2006)

El área total de la Cuenca del Río Fajardo es de 67 km². En el año 1951, el 31% de la superficie de la cuenca era destinado para cultivos, mayoritariamente la caña de azúcar y el heno, aunque no los únicos. La superficie mayor en la cuenca estaba representada por pastos y arbustos con 43% y la superficie forestal arbolada con un 22% (tabla 78).

En los años 70, contrario a las cuencas anteriores, ocurre un aumento de casi el doble en la superficie forestal arbolada, se pierde casi un 10% en los pastos y arbustos y se reduce a la mitad las tierras de cultivo (tabla 78). En los años 90, la tendencia al aumento en superficie forestal continúa, disminuyen los pastos y arbustos, junto con los terrenos agrícolas. En el año 2007, el 88% de la cuenca estaba representada por pastos (34%) y bosques (54%) y solo 1% agrícola (Figs. 195, 196, 197, 198, 199).

Tabla 78. Usos de suelo y cubierta de terrenos (km²) en la Cuenca del Río de Fajardo

Año	Usos	Agrícola		Forestal		Pastos y Arbustos		Urbano		Cafetales		Área Total
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	
												67.8
1951		20.8	30.7	15.1	22.3	29.1	42.9	2.7	3.9	0.07	0.1	67.8
1971		10.1	14.9	26.3	38.8	24	35.4	3.9	5.8	0	0	67.8
1994		6.7	9.9	36.4	53.7	18.7	27.6	5.2	7.7	0	0	67.8
2007		1.1	1.6	36.9	54.4	22.9	33.8	6.8	10.0	0	0	67.8

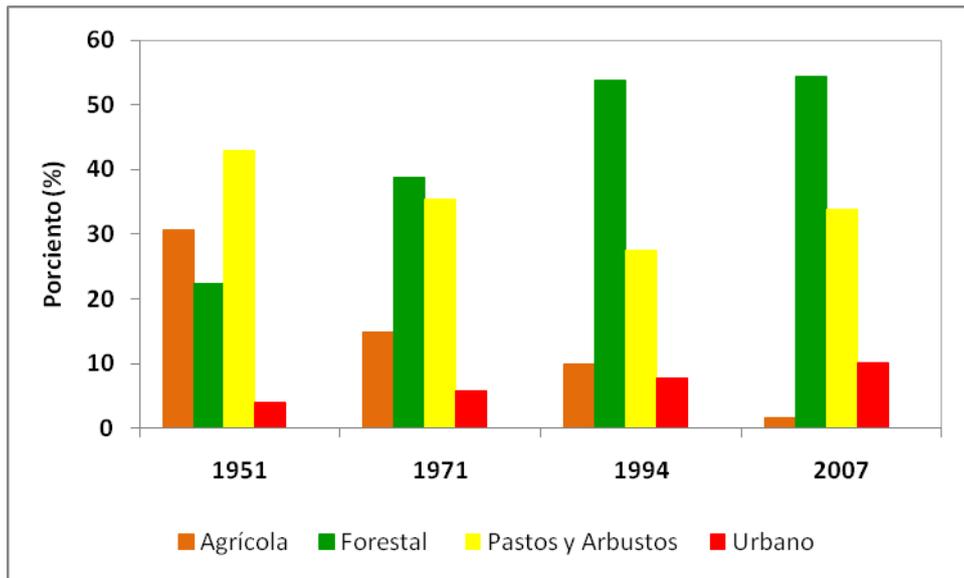


Figura 195. Evolución de la cobertura vegetal y usos de suelo en los últimas décadas. Cuenca Río Fajardo.

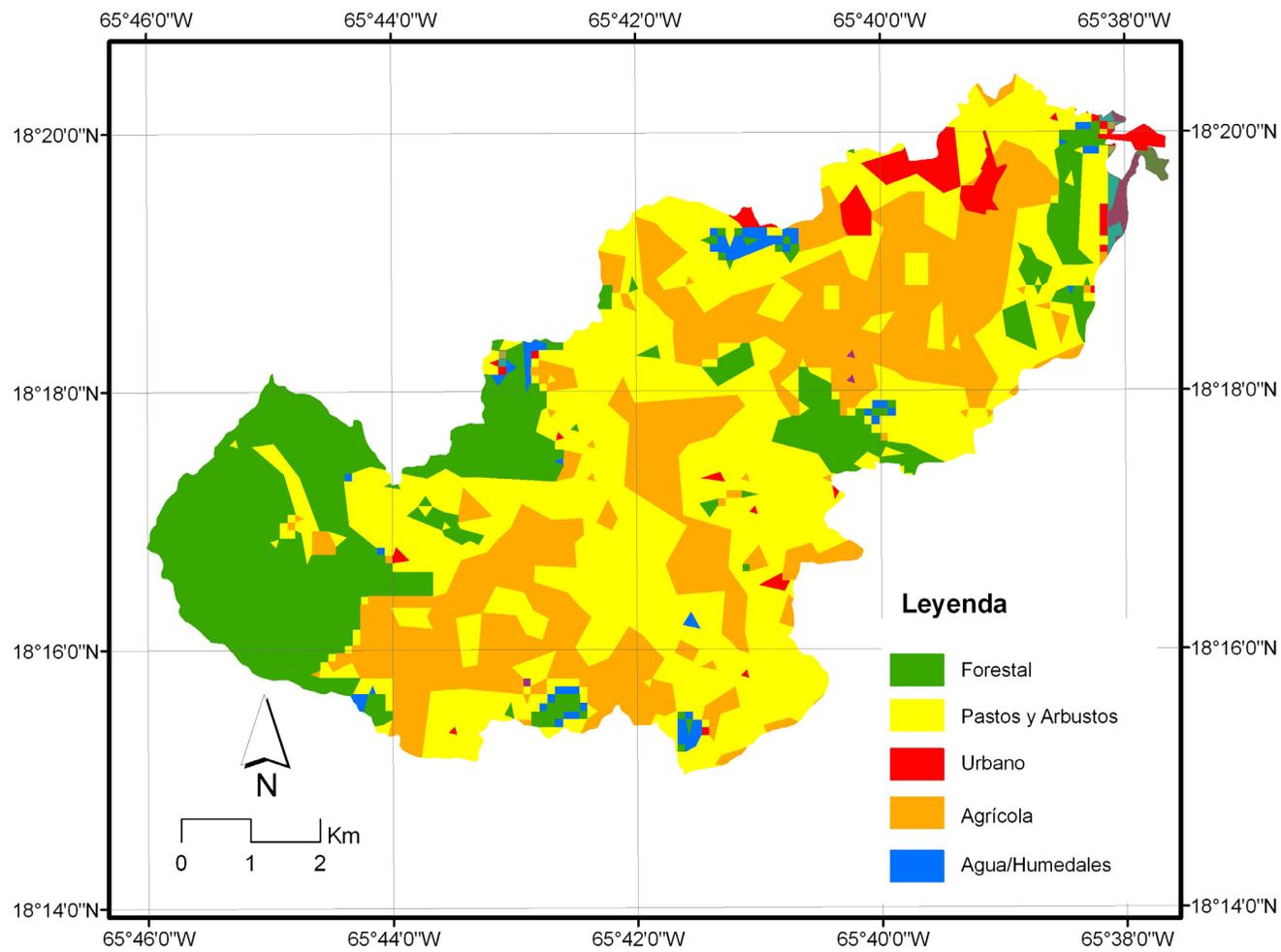


Figura 196. Cubierta de terreno y usos de suelo 1951. Cuenca Río Fajardo

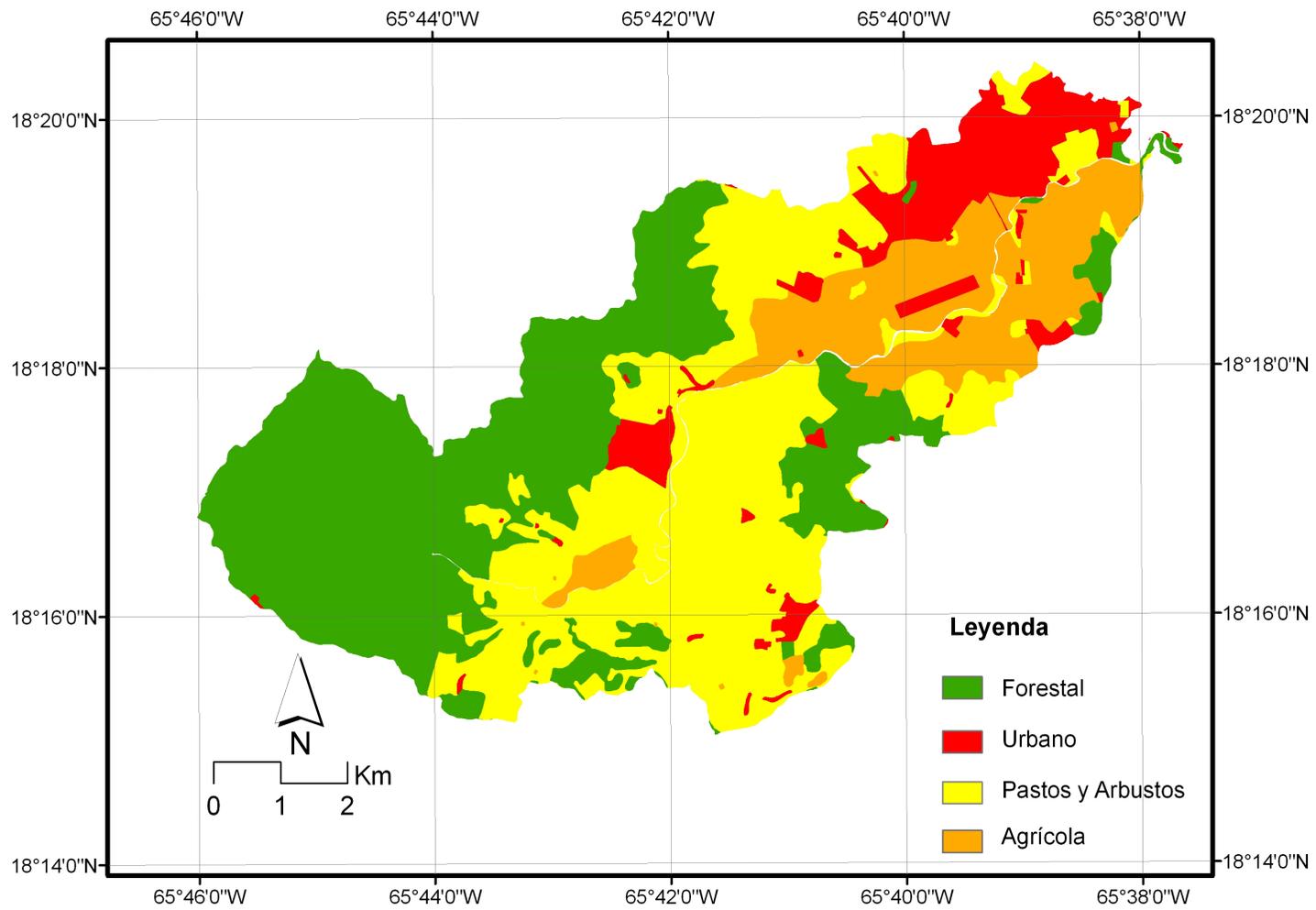


Figura 197. Cubierta de terreno y usos de suelo 1971. Cuenca Río Fajardo

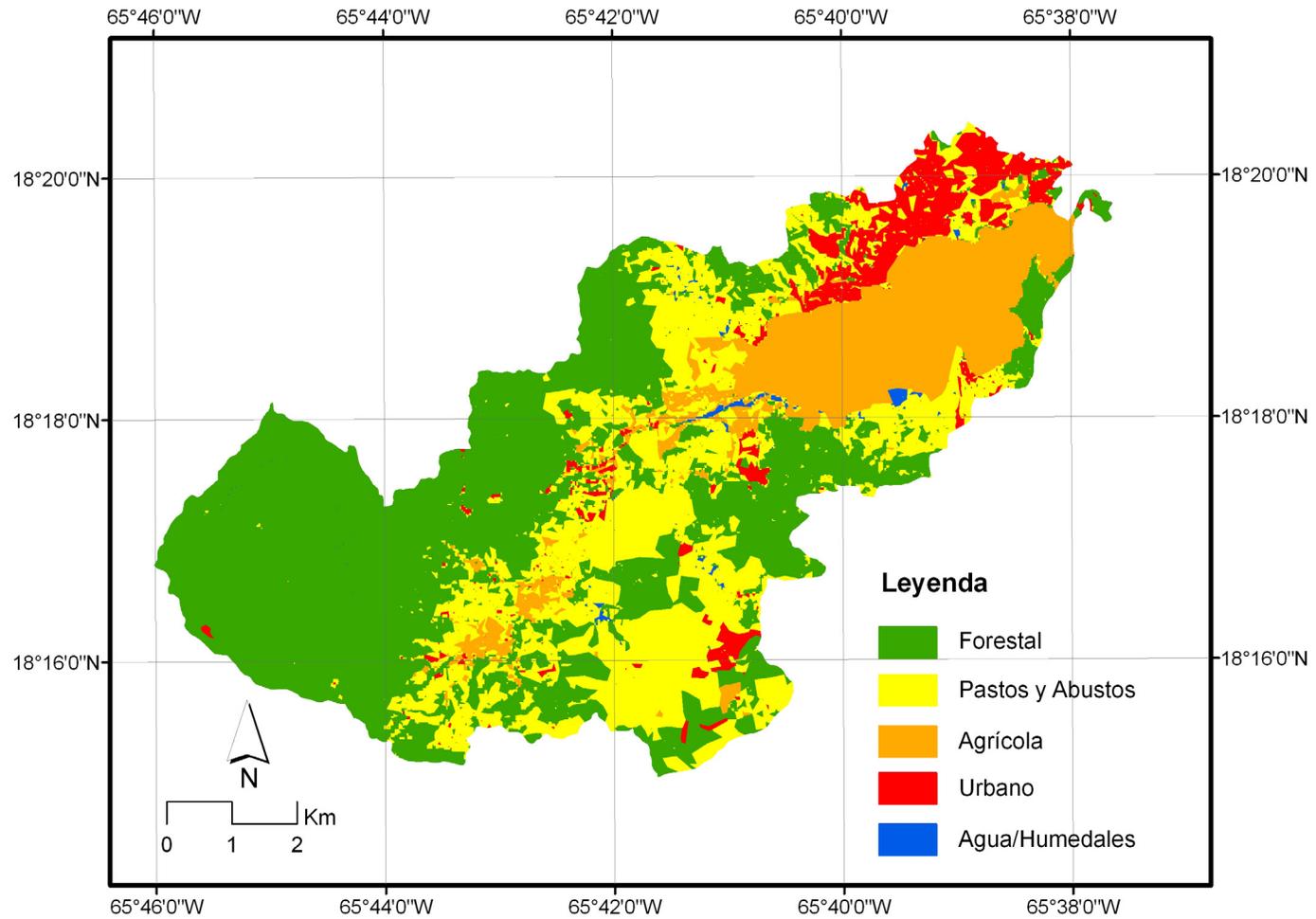


Figura 198. Cubierta de terreno y usos de suelo 1994. Cuenca Río Fajardo.

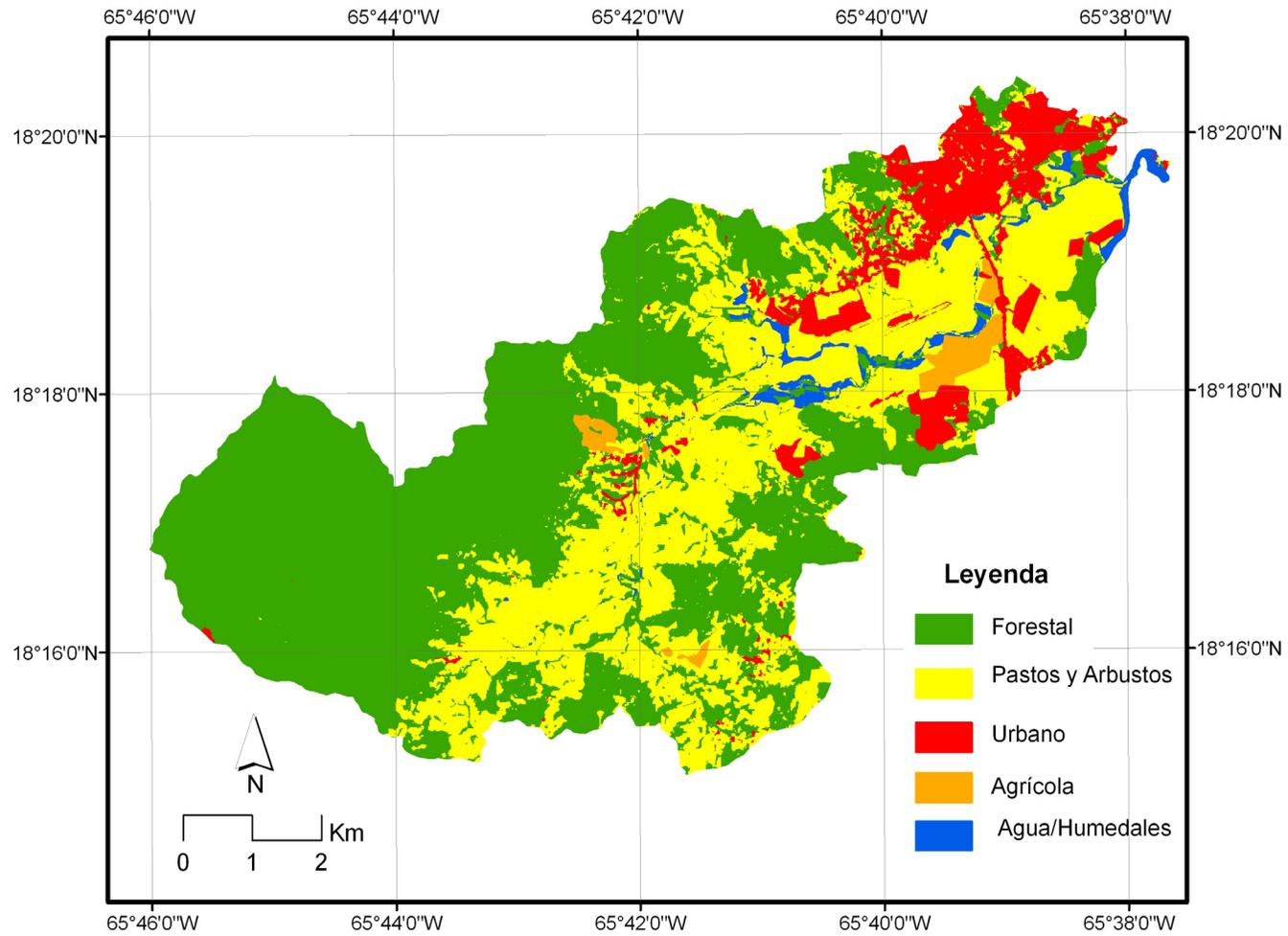


Figura 199. Cubierta de terreno y usos de suelo 2007. Cuenca Río Fajardo

9.2 Consideraciones sobre los cambios paisajísticos y usos de suelo en la isla.

Desde el origen de la agricultura, la población humana y el consumo de recursos han aumentado en el mundo; como consecuencia, los bosques y otras áreas naturales han sido transformados en terrenos agrícolas, tierras de pastoreo y ciudades (Grau et al. 2003). Según el IPCC (2000a) los cambios en la cubierta vegetal son muy intensos en países tropicales en vías de desarrollo los cuales están caracterizados por una economía principalmente agraria y un rápido aumento poblacional. Para el año 2000 cerca del 60% de los bosques tropicales fueron clasificados como degradados incluyendo los bosques primarios y secundarios (ITTO, 2002).

Históricamente se ha observado como los cambios en los usos de suelo interactúan con distintas fuerzas naturales e influyen el proceso y la tasa de regeneración en los bosques tropicales (Lugo y Waide, 1993; Chazdon, 2003). Basado en ello, el interés en el bosque tropical secundario ha crecido a medida en que grandes superficies de terreno agrícola han sido abandonadas en las últimas décadas (Finegan, 1999; Martin et al. 2004; Guariguata y Ostertag, 2001).

Desde mucho tiempo en la historia, los bosques han sido una valiosa fuente económica para los seres humanos (Emerton, 2003). Sin embargo, estimar y valorar los beneficios del bosque, fue tarea complicada durante mucho tiempo dado a que los indicadores se restringían solo a los “beneficios económicos” (materia prima) que éste podría ofrecer (Emerton, 2003). Geist y Lambin (2001), clasifican las causas de la deforestación tropical en cinco factores: económicos (crecimiento económico, desarrollo y comercialización), políticos e institucionales (cambios en las políticas económicas institucionales), tecnológicos (progreso tecnológico especialmente aplicados a la agricultura), culturales (actitudes, creencias y valores) y demográficos (dinámica poblacional, migraciones, natalidad, crecimiento y densidad). Distintos autores concuerdan en que debido a estos factores surgen muchas de las razones por las cuales se han destruido grandes superficies territoriales del bosque tropical (Herrera-Montes y Brokaw, 2010).

Sin embargo, hoy día se reconoce que estas superficies forestales ofrecen beneficios ambientales, ecológicos y sociales a escala local y planetaria. Los bosques se consideran como las reservas y sumideros más grandes y eficientes para la captura de carbono (Sasaki y Yoshimoto, 2010). Entre sus funciones, la presencia del bosque, muchas veces mantiene una capa de materia orgánica que fomenta la estabilidad del suelo y limita la pérdida del mismo por erosión, funciona como regulador térmico y para protección de cuencas hidrográficas (Bruijnzeel, 2004).

Puerto Rico no estuvo exento a dicho patrón de deforestación en las áreas tropicales, desde la colonización hasta principios del siglo XX. Los resultados de este trabajo solo han plasmado a distinta escala (cuencas hidrográficas), lo que otros investigadores también habían evidenciado en distintos estudios (Beishlag, 1955; Brockmann, 1955; Brunnschweiler, 1955; Naley, 1955; China y Helmer, 2003; López et al. 2001; Lugo y Helmer, 2004; Matinuzzi et al. 2007).

Por todo ello, además de cuantificar los usos de suelo en cada cuenca analizada en Puerto Rico, se han utilizado documentos históricos, artículos, censos y libros para poder apoyar los resultados encontrados (Beishlag, 1955; Birdsey y Weaver, 1987;

USDA, 1992; Zu et al 1995; Aide et al. 1996; China, 2002; Helmer et al. 2002; Pascarella et al. 2000, 2004; Kenaway y Helmer, 2007). Estas referencias nos confirman la evolución que ha sufrido el paisaje de la isla durante los últimos siglos y más detalladamente en las últimas décadas.

Cambios socio-económicos en Puerto Rico durante el siglo XX, promovieron dramáticos cambios en las prácticas de uso de suelo, haciendo que la transformación de una economía agraria a una industrial resultara en el abandono de las tierras agrícolas y un incremento de la cubierta forestal y a su vez también un aumento de la superficie urbana (López et al. 2001). Con algunas pequeñas diferencias entre cuencas, se ha evidenciado una evolución forestal comenzando a mediados del siglo XX, influenciado en cierta medida por políticas agrarias (1930-1940) y de reforestación en los años 50 y 70 y por último el abandono de las tierras de cultivo con la llegada de las empresas y fábricas en los años 60, dando paso a una sucesión natural de vegetación. Principalmente, según Herrera-Montes y Brokaw (2010), contrario a muchos lugares tropicales donde el bosque secundario apenas alcanza los 30 años, en Puerto Rico muchos de los bosques secundarios varían entre 40-60 años.

Existen muchos factores que influyen en cómo se van a repoblar nuevamente las áreas abandonadas así como la geología, el clima, el tipo de suelo, la elevación y los tipos de cultivos que existían (Rivera y Aide, 1998; Rivera et al. 2000; Marcano-Vega et al. 2002; Daley, 2009; Zang y Ding, 2009; Van Do et al. 2010). En Puerto Rico, concretamente en el municipio de Cayey, Pascarella et al. (2000) documentó que la cubierta forestal incrementó un 62% entre 1937-1967, debido al abandono de las tierras agrícolas. Las zonas de pastos se mantuvieron prácticamente igual entre 1937-1967 y disminuyeron luego en 1995. Además, documentaron que la regeneración forestal allí donde existía café de sombra contiene menos riqueza de especies en comparación con lugares donde había pastos. Al parecer, en vez de facilitar la repoblación, la existencia de una estructura forestal de plantaciones cafetaleras abandonadas inhibe el reclutamiento de especies nativas leñosas (Pascarella et al. 2000).

Según Thomlinson et al. (1996), la tendencia general en el noreste del país entre 1936-1988 fue al aumento de la superficie de bosque, sin embargo también encontraron que las áreas urbanas aumentaron más de 2000 por ciento. En dicha área, cuantificaron el descenso de la producción agrícola (caña de azúcar) que representaba el 28% en el año 1938, 10% en 1964 y 0% en 1988.

Según Rivera y Aide (1998) en un estudio realizado en los municipios de Ciales y Morovis, el bosque secundario aparenta una regeneración más rápida en las regiones del karso en comparación con otros bosques secundarios ubicados en formaciones geológicas y tipos de suelos diferentes en Puerto Rico. Aunque entienden que también debe haber una influencia climática debido a la elevación, este mismo estudio demuestra que las plantaciones de café abandonadas en la Región del Karso, se han regenerado más rápido en comparación con plantaciones en otras regiones de la isla. Esto puede que explique en cierta manera la ocupación forestal que existe en las cuencas de Arecibo y Manatí.

Aunque la regeneración forestal suele ocurrir con mayor frecuencia y estar mejor documentada en países de latitudes templadas, debido a la realidad económica (Gallart y Llorens, 2004; Kuemmerle et al. 2006; Feranec et al. 2007) se pueden encontrar algunos

ejemplos en países tropicales (República Dominicana, Costa Rica, El Salvador, Taiwan, Vietnam, China y Puerto Rico) donde la manufactura y el turismo entre otros, están comenzando a remplazar la agricultura (Martin et al. 2004; Zang y Ding, 2009; Herrador-Valencia et al. 2010).

En El Salvador, el cambio socio-económico y sobretodo el político, dado a los conflictos armados ocurridos en los años 80 y políticas agrarias adoptadas en la época, impulsaron la caída de la economía agrícola que representaba el 80% de los ingresos en el país y en el año 2000 solo el 11%, mientras que la industria textil subió del 8 al 67% (Herrador-Valencia et al. 2010). Esto a su vez fomenta un fenómeno migratorio del 20% de la población hacia EEUU. Estos mismos sucesos fueron los responsables de aliviar la presión ejercida sobre las áreas forestales y permitieron una repoblación del bosque en ciertas áreas.

Al igual que en Puerto Rico, la industria del café en El Salvador también se vio afectada por decisiones políticas y disminuyó su producción. En el 1983 se producían cerca de 200000 toneladas y en 2008 se redujo a la mitad, 100000 toneladas (Herrador-Valencia et al. 2010). En este estudio realizado por los investigadores en la cuenca hidrográfica del Río Cutumayo, se demuestra que en el 1942 la superficie dominante era agrícola con 72% y el bosque apenas representaba el 23%, sin embargo en el 2004 el bosque alcanzó un 60% de la superficie y la agricultura solo el 11%. El mismo fenómeno de abandono de tierras agrícolas y aumento en la superficie forestal se ha documentado en la vecina isla de República Dominicana (Martin et al. 2004).

En algunos bosques tropicales de China se ha documentado la regeneración forestal ocurrida en superficies donde antes se dedicaban a la extracción maderera. Zang y Ding (2009) realizaron un estudio sobre la repoblación forestal de antiguas carreteras y caminos en la Reserva Natural de Bawangling en la Isla de Hainan (parte sur de China donde se concentra la mayor superficie de bosque tropical en el país). En estas tierras había predominado la extracción de madera y se estima que entre 1977-1979 cerca del 50% de la vegetación leñosa había sido talada. Ellos han encontrado que en lugares donde el micro-clima es muy similar y también el medio, hubo una diferencia en cuanto a la distribución y la tasa de reforestación. Atribuyen estos contrastes a las diferencias en el tipo de suelo, los remanentes de vegetación en el lugar abandonado causado por la construcción de las carreteras, alteraciones al suelo y la tala. Hubo lugares que para la construcción de la carretera no solo hubo remoción de la corteza terrestre y la biomasa sino que también hubo una extracción de la capa superior del suelo lo que extrae cualquier banco de semillas que se pudo haber retenido en él.

Otros investigadores aseveran que ciertas actividades como la compactación del suelo para carreteras afectan las propiedades físicas del suelo, reduciendo la infiltración, la humedad edáfica, la aireación y la resistencia física al crecimiento de las plantas (Pinard et al. 2000). Estos investigadores concluyeron en su estudio de Malasia que, el impacto de las carreteras para la extracción maderera usando métodos convencionales y tradicionales impactaban el 17% del área, mientras que implementando nuevos métodos innovadores se reducía el impacto al 6%. De igual forma, observaron que cuatro años después que se detuvieran las actividades de deforestación, la recuperación de la vegetación leñosa fue muy superior en las áreas donde se utilizaron nuevas prácticas de manejo que allí donde se utilizaron las convencionales.

Muy probable, por todos los factores involucrados en la regeneración del bosque, y las distintas prácticas agrícolas necesarias por las particularidades de cada terreno (clima, tipo de cultivo, pendiente del terreno, compactación, composición y formación), la tasa y la rapidez de la regeneración no ha sido la misma en todas las cuencas y sobre todo la porción de superficie que representa el bosque en cada una de ellas. De manera generalizada, se observó que la superficie forestal aumentó un 180% en todas las cuencas.

10. EVOLUCIÓN HIDROCLIMÁTICA Y CAMBIOS PAISAJÍSTICOS



Llanuras aluviales del norte, PUERTO RICO

10. EVOLUCIÓN HIDROCLIMÁTICA Y CAMBIOS PAISAJÍSTICOS

10.1 Análisis y Evolución de la Precipitación

Existe gran similitud en el comportamiento anual de la precipitación en las cuencas, aunque no ha de ser sorprendente debido a su ubicación geográfica (Fig. 200). La precipitación máxima mensual varía en función de la ubicación de la cuenca, mientras que la precipitación mínima se observa en invierno (entre los meses de enero y febrero). Las cuencas del Río Grande de Arecibo y Río Grande de Manatí (en el centro norte de la isla) reciben más precipitación en el mes de septiembre y octubre, cuando la Cuenca del Río Fajardo recibe más agua en noviembre y el Río Culebrina en mayo.

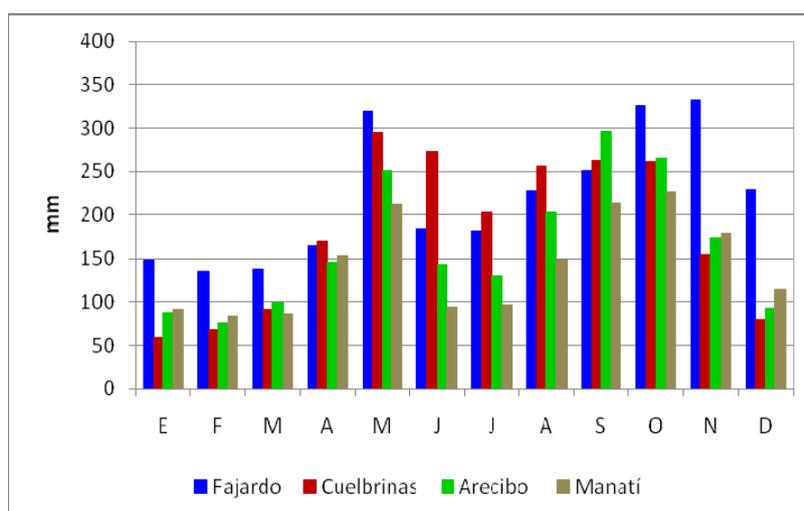


Figura 200. Precipitación media mensual para cada cuenca.

Las cuencas estudiadas no muestran grandes diferencias entre ellas en cuanto al comportamiento y evolución de las precipitaciones observadas. No obstante, varían ligeramente en la cantidad total de agua. Las cuencas que menos precipitación reciben son Manatí y Arecibo con 1698 mm y 1964 mm, respectivamente, mientras que Fajardo es la cuenca donde más agua precipita (Fig. 201).

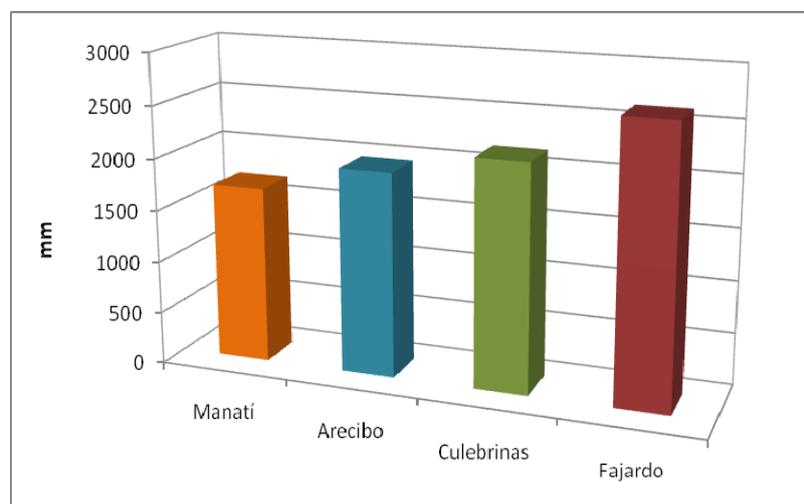


Figura 201. Precipitación media anual por cuenca.

Aunque difieren en el año de la precipitación máxima registrada, exceptuando la cuenca del Río Culebrinas, en las otras tres cuencas la precipitación mínima anual se registró en 1994, año en que la precipitación sufrió una disminución acusada en casi toda la isla de Puerto Rico (Fig. 202). Esta disminución también se observa claramente en la normalización de la precipitación.

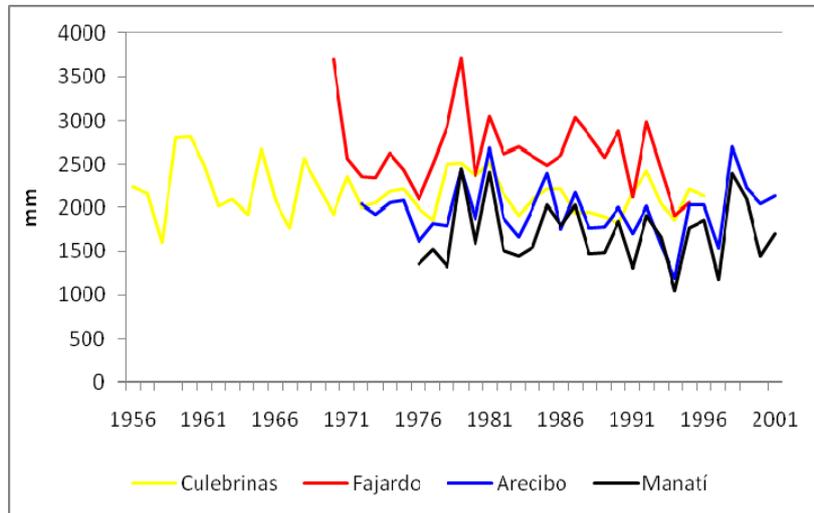


Figura 202. Evolución de precipitación anual en cada cuenca.

Calculando la normalización de la precipitación anual en cada cuenca, se facilita la comparación de su comportamiento y se agiliza la identificación de períodos secos o húmedos en cada una de ellas. En los años 1976 y 1977 todas las cuencas obtuvieron valores bajo el promedio de la precipitación (Fig. 203). En la Región Cibuco-Guajataca (cuencas Río G. Arecibo y Río G. Manatí), este periodo seco se extiende por cuatro años, desde 1976 hasta 1980. Según Sille Puello (2006) en República Dominicana registraron el año 1976 y 1994 como uno de los años de mayor déficit de lluvia. De igual forma en Puerto Rico ocurre otro período seco a principios de la década de los 90, con los años 1993 y 1994 como los más destacados.

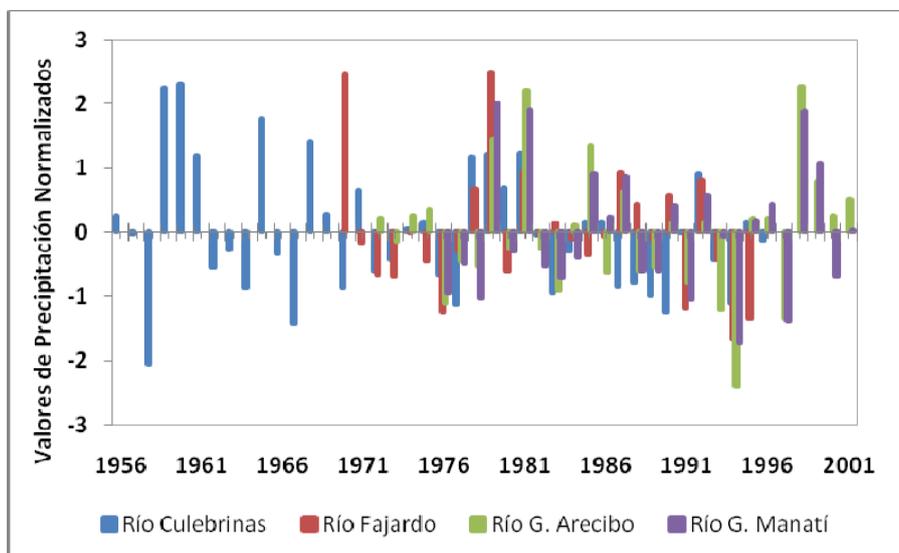


Figura 203. Precipitación total anual en las cuencas con valores normalizados.

De manera global, en tres de las cuatro cuencas (Río Culebrinas, Río Fajardo, Río G. Manatí), más del 53% de la precipitación se mantuvo con valores por debajo de la media, alcanzado el 65% de los años en Fajardo. Solo en la cuenca del Río G. Arcibo el 53% obtuvo valores que superaron la media. En Culebrinas se detectó un gran ciclo húmedo entre 1978-1981, seguido por un período seco que cubre desde 1987 hasta 1996, con excepción del 1992 que obtiene valores positivos. De igual forma un periodo seco en Fajardo fue registrado entre 1971-1977.

Los patrones encontrados con la precipitación anual y mensual varían considerablemente entre las distintas estaciones, las regiones hidrográficas y las cuencas. A escala insular no se pudo establecer ninguna tendencia con la precipitación total anual, sin embargo, se han detectado cambios en el comportamiento de la misma (tablas 79 y 80). Con RS no se pudo establecer ninguna evolución clara de la precipitación. Por lo visto cada cuenca responde a factores de precipitación particulares y locales. Solo febrero obtuvo indicios de tendencias en las cuencas del Río Fajardo y Río Culebrinas. Con MK, en tres de cuatro cuencas se detectó un aumento de la precipitación en enero, mientras en abril y noviembre se observó una disminución de la misma.

Tabla 79. Tendencias de la precipitación mensual en cada cuenca con Rho Spearman

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cuenca Río G. Arcibo	(N)											
Cuenca Río G. Manatí	(N)	(N)	(N)	(-)	(N)							
Cuenca Río Fajardo	(N)	(+)	(N)	(-)	(N)	(N)						
Cuenca Río Culebrinas	(N)	(+)	(N)									

(+/-) Correlación significativa al nivel de 0.05.

(N) No tendencia

Tabla 80. Tendencias de la precipitación mensual en cada cuenca con Mann-Kendall

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cuenca Río G. Arcibo	(+)	(N)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(N)	(N)	(-)	(-)
Cuenca Río G. Manatí	(+)	(N)	(-)	(-)	(N)	(N)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Cuenca Río Fajardo	(+)	(+)	(+)	(+)	(N)	(+)	(+)	(-)	(N)	(-)	(-)	(-)
Cuenca Río Culebrinas	(+)	(+)	(N)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(N)	(+)	(-)	(N)

(+/-) Valores donde se rechaza la hipótesis nula de no tendencia.

(N) No tendencia

Otros resultados similares a los obtenidos con estas cuencas se han encontrado en estudios realizados en el Caribe, zonas tropicales y climas mediterráneos (Peterson et al. 2002; Erazo Chica, 2006). En El Salvador, 16 estaciones meteorológicas fueron utilizadas para detectar tendencias con periodos de registros que van desde 1940-2005. Diez de ellas mostraron disminución de la precipitación anual, cinco presentaron aumento y en una no se pudo demostrar tendencia alguna (Erazo Chica, 2006). Además

otro estudio también afirma que existe incertidumbre en cuanto a la precipitación en El Salvador (MMARN, 1998).

En la cuenca del Lago Cuitzeo en México, se realizó en 2006 un análisis hidrometeorológico de las estaciones que se encuentran en dicha cuenca. Se utilizaron 11 estaciones meteorológicas cuyo periodo de análisis varía dependiendo de la estación. Sólo en una de las estaciones se obtuvo un aumento significativo en las precipitaciones (Carlón y Mendoza, 2007). Una estación muestra disminución de la precipitación en el mes de diciembre con valores significativos. También se observó que en los últimos siete años todas las estaciones (excepto una) mostraron un incremento en las precipitaciones, aunque sin valores estadísticamente significativos (Carlón y Mendoza, 2007).

En el caso de las precipitaciones, en las cuatro cuencas que se han analizado en Puerto Rico, el panorama muestra incertidumbre. En algunas estaciones se produce un incremento de los totales anuales, mientras otras muestran disminución. En la isla de Cuba también se ha observado la misma incertidumbre en cuanto a la precipitación. Algunos modelos indican una reducción de la precipitación total anual y otros muestran un incremento (Centella et al. 2000). Además, en ambas islas se ha observado un ligero cambio en el comportamiento anual de la precipitación mostrando aumento en los meses de invierno y disminución en los meses de verano. Puede que estos resultados en Puerto Rico y Cuba, en cierta medida, sean el reflejo de la complejidad que tiene la precipitación en las áreas tropicales y en el Caribe insular. De esta manera, según diversos autores (Ropelewski y Halpert, 1987; Giannini et al. 2000; Martis et al. 2001) los fenómenos climáticos que influyen directamente en la región (frecuencias e intensidad de ciclones tropicales, oscilación del Atlántico Norte, El Niño y La Niña) toman protagonismo en el análisis climático y condicionan el comportamiento y las variaciones de la precipitación.

Por otro lado, diversos estudios mencionan un posible aumento de la aridez y desertificación en la Región del Caribe (Neelin et al. 2006). Este último estudio señala que ocurrirá desertificación no sólo en el Caribe sino que particularmente en aquellas zonas que se encuentren en márgenes de convección: Centro América y el Caribe, Suramérica ecuatorial y en la zona de convección intertropical del Atlántico (Neelin et al. 2006).

Además, el IPCC menciona que en los últimos 45 años se muestran mayores periodos interanuales y variabilidad por décadas en las islas del Caribe y que también se detecta una tendencia regresiva en la precipitación media anual para esta misma región (IPCC, 2000). La mayoría de los modelos climáticos indican un proceso de incremento de la sequía sobre la parte de Centro América y en las islas del Caribe, siendo más acusado en el continente que para las islas (Hulme y Sheard, 1999).

10.2 Análisis y Evolución de la Temperatura

Las estaciones de toda la isla no muestran gran discrepancia respecto a la temperatura media para el periodo de estudio. Los meses más frescos se dan en el invierno del hemisferio norte y los más calurosos en los meses de verano. La temperatura media de la isla ronda los 25°C y destacan las estaciones de Adjuntas Substation (21°C) y Pico del Este (19°C) que, debido a la elevación y su ubicación en el centro de la isla, registran temperaturas de 6°C, por debajo de la media del territorio. Entre las dos estaciones, suponen un área de influencia de 1417 km², lo que solo equivale un 16% del territorio insular (Fig. 204).

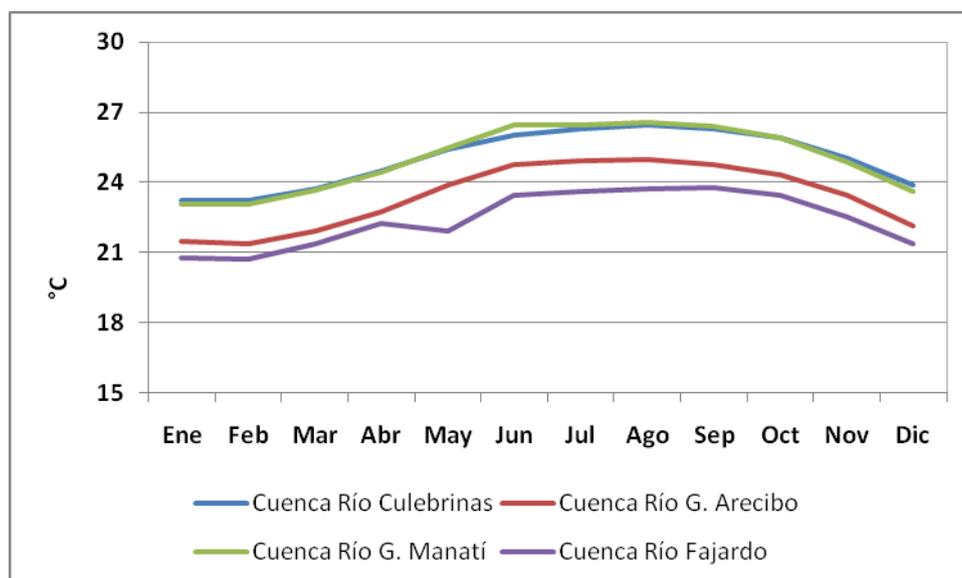


Figura 204. Comportamiento de la temperatura media mensual por cuencas.

Merece especial atención la estación Pico del Este, puesto que presenta un descenso de la temperatura en el mes de mayo, mientras que esta disminución es inapreciable en las demás estaciones. En esta cuenca se encuentra la Sierra de Luquillo (Bosque Pluvial Tropical, El Yunque) donde las lluvias de mayo son considerables y pueden alcanzar los 500 mm, cubriendo de nubes casi permanentemente el área del bosque, pudiendo esto explicar el descenso de las temperaturas en dicho mes (Fig. 205).

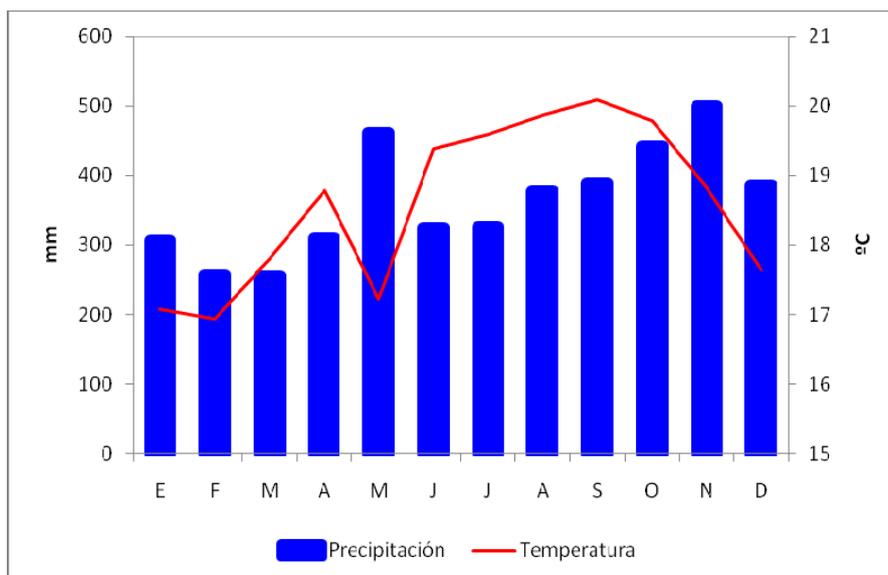


Figura 205. Comportamiento de la precipitación y temperatura en la estación Pico del Este. Cuenca Río Fajardo

Entre todas las estaciones climáticas (16) que registraban temperaturas en la isla (Fig. 206), doce de ellas mostraron un aumento de la temperatura media anual, trece registraron un incremento de la temperatura máxima anual y cuatro un aumento de las temperaturas mínimas. Dos estaciones mostraron descenso de la temperatura media anual (Dos Bocas en el lago con el mismo nombre y Pico del Este por encima de 1050 m de elevación), aunque solo una alcanzó valores significativos en los análisis estadísticos (Dos Bocas). Sin embargo, es bien documentado que las influencias de la cubierta vegetal y uso de sólo condicionan algunas variables meteorológicas, entre ellas la temperatura (Gallo et al. 1999). Aún así, entre estas estaciones suponen menos del 15% del área de la isla de Puerto Rico (1355 km²). En el 66% del territorio se observa un aumento de la temperatura media anual y en el restante 19% no se pudo establecer una tendencia.

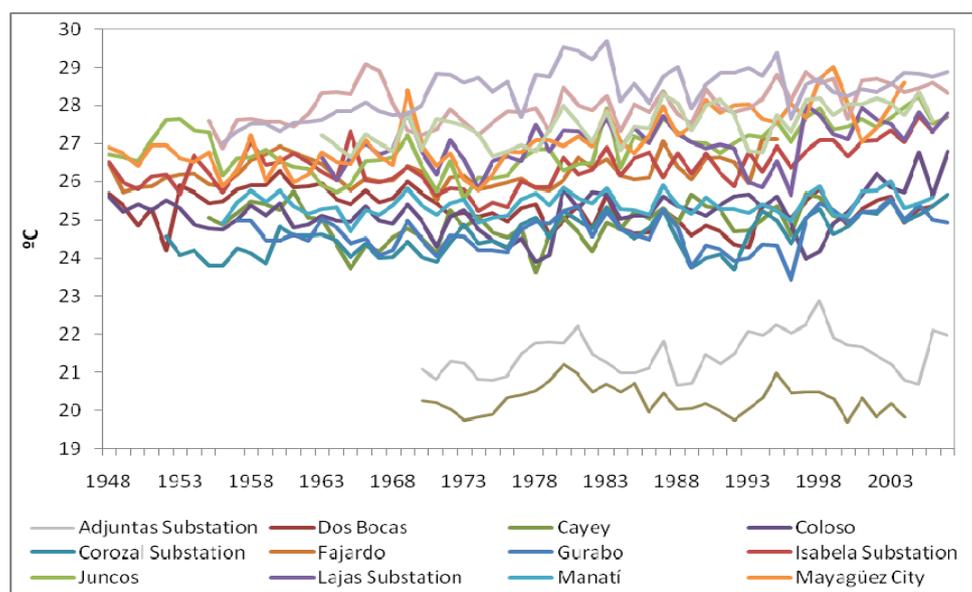


Figura 206. Evolución de la temperatura media anual por estación en la isla de Puerto Rico.

Aunque las estaciones de las cuencas estudiadas muestran patrones similares entre ellas (Fig. 207), ninguna concuerda en el año de temperatura anual máxima ni en la temperatura mínima anual. Sin embargo, se observa que en la mayoría de las estaciones la temperatura máxima anual se da en la década del 2000.

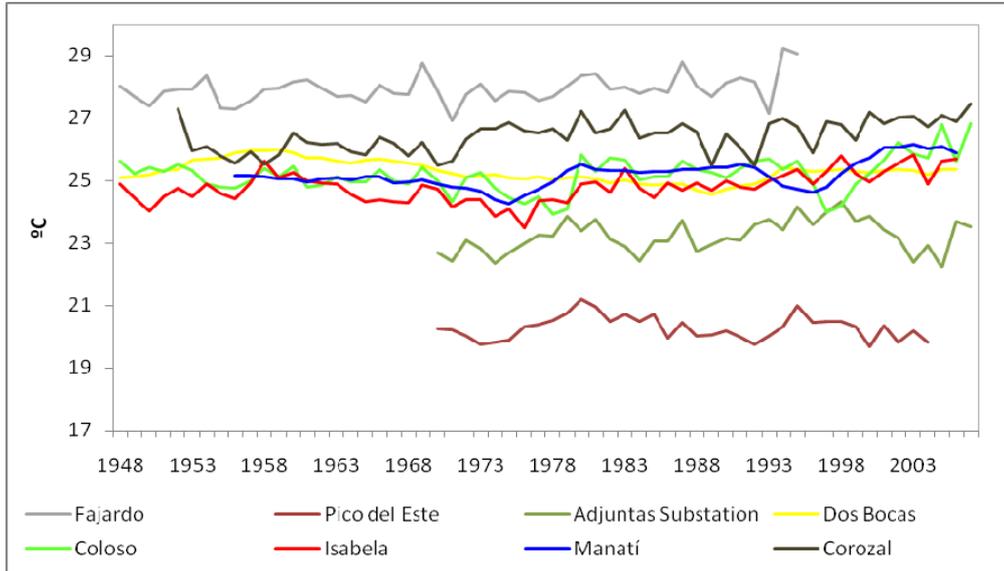


Figura 207. Evolución de la temperatura media anual en las estaciones de las cuencas estudiadas.

De estas ocho estaciones, seis mostraron tendencias positivas en la temperatura media y la máxima anual. Mientras que Dos Bocas (Cuenca del Río Grande de Arcibo) y Pico del Este (Cuenca del Río Fajardo) indican un descenso de las temperaturas. Analizando los valores normalizados de la temperatura media anual, se obtiene que en las ocho estaciones, el 45% de los años se mantuvieron con valores por encima de la media (Fig. 208).

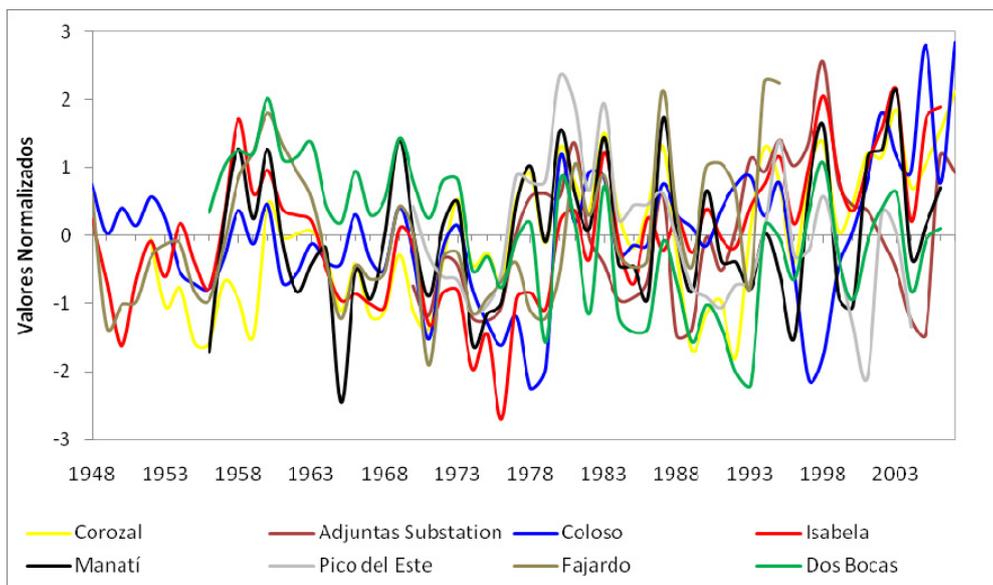


Figura 208. Valores de la temperatura media anual normalizados por estaciones.

Estos resultados también han sido comparados con distintos estudios realizados en el Caribe y Mesoamérica. 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 cambios 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).

Sin embargo, en el lago Cuitzeo de México se ha observado que sólo una estación de las 11 utilizadas registró un aumento de la temperatura media anual con valores significativos, mientras que sólo dos mostraron valores decrecientes en la temperatura media anual con valores significativos (Carlón y Mendoza, 2007). Las demás estaciones no mostraron ninguna tendencia. Por otro lado en El Salvador, en un estudio sobre diez estaciones, todas ellas mostraron un aumento de la temperatura media anual que varía desde 0.4°C hasta 2.2°C (Erazo Chica, 2006).

Según el IPCC (2000), la temperatura media anual en las islas del Caribe ha incrementado en el periodo de 1900-1995. No obstante se basa en una escala temporal mucho mayor que la utilizada en este trabajo. El IPCC ha utilizado datos que muestran una tendencia de aumento en las temperaturas de 0.5°C (IPCC, 2000). 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 de los procesos de evaporación (Centella et al. 2000). De cualquier manera, en este estudio se puede identificar un aumento claro de la temperatura para toda la isla de Puerto Rico (Fig. 209).

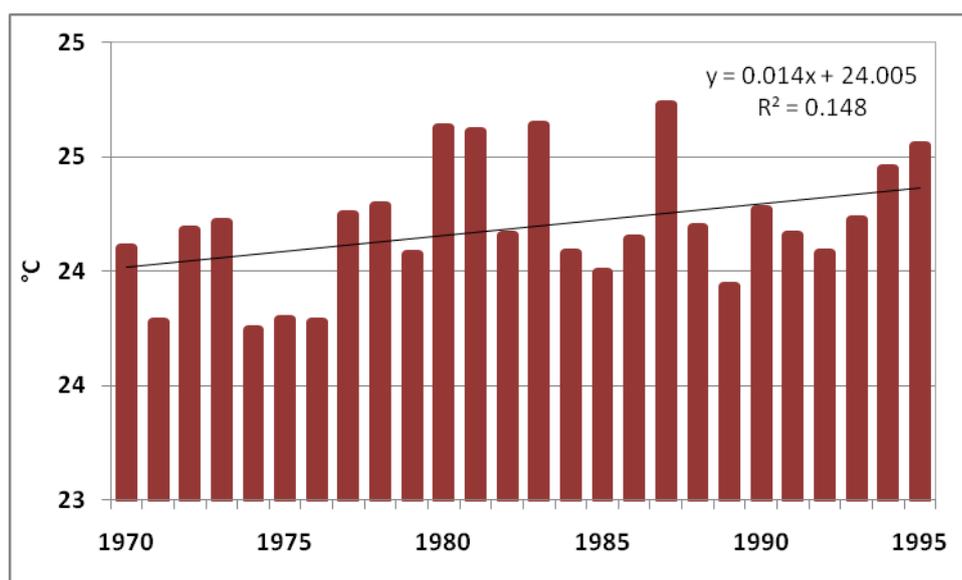


Figura 209. Evolución de la temperatura media anual en la isla de Puerto Rico.

10.3 Análisis y Evolución Hidrológica

Para la comparación de la evolución hidrológica de las cuatro cuencas en estudio, se utilizaron los caudales específicos, los caudales relativos, las percentiles y la aportación para cada periodo de estudio.

Los caudales relativos fueron utilizados para comparar el comportamiento hidrológico de los cuatro ríos. Se observa que los cuatro ríos tienen un mismo régimen hidrológico (Fig. 210). Esto no es sorprendente ya que se trata de cuatro cuencas todas ellas tropicales y dos de ellas fronterizas, dentro de una misma región-hidrográfica donde comparten sistemas biofísicos de la isla de Puerto Rico.

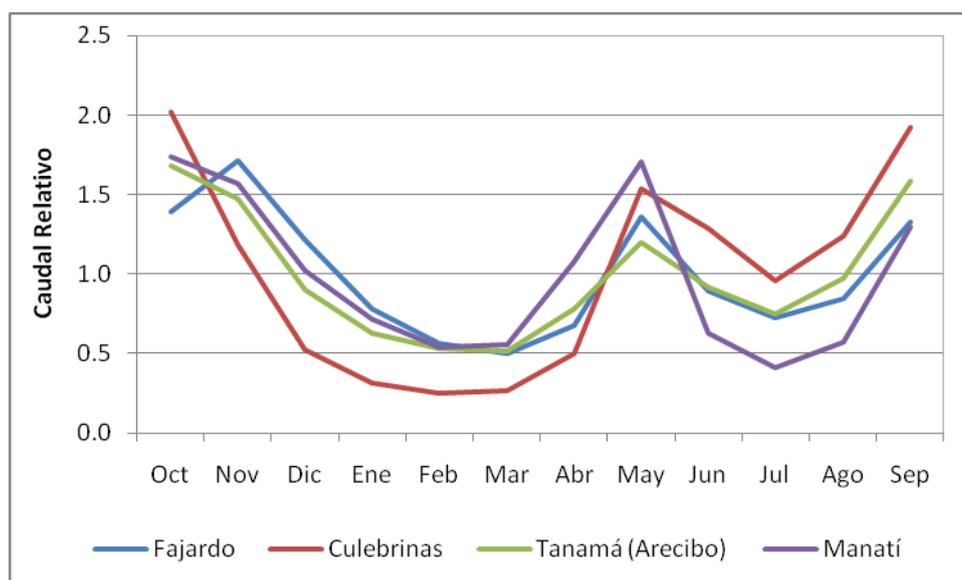


Figura 210. Caudales relativos de los cuatro ríos estudiados.

Todos los ríos tienen sus aguas bajas los meses de invierno (enero, febrero y marzo) seguido por un aumento en la escorrentía que alcanza un pico muy claro en mayo, aunque todos muestran su pico máximo para el mes de octubre. El aumento de la escorrentía, después de los meses invernales es más pronunciado en el Río Grande de Manatí y en el Río Culebrinas. Todos presentan una disminución en los meses de junio y julio, aumentando progresivamente desde agosto hasta octubre. La disminución en los meses de junio y julio también es más acusada en el Río Grande de Manatí. Estos resultados son acordes con los encontrados y descritos para la precipitación de ambas cuencas, anteriormente.

El caso de mayor variabilidad es el Río Grande de Manatí con un coeficiente de variación del 47% anual, mientras que el río Culebrinas y el río Tanamá solo alcanzan 23% y 26% respectivamente (tabla 81). Los meses con mayor coeficiente de variación cambian según el río. En el Río Grande de Manatí, agosto aparece con una variabilidad por encima del 100%, mientras que en el río Fajardo y Culebrinas es uno de los meses con menor variabilidad. En el río Culebrinas, marzo se identifica como el mes de mayor variabilidad, septiembre en el río Fajardo y abril en el río Tanamá. Por otro lado, tres ríos (Fajardo, Tanamá y Manatí) concuerdan en el mes de febrero como uno de los meses con menor coeficiente de variación.

Tabla 81. Comparación de la variabilidad anual y mensual de los cuatro ríos.

	Coef. De Variación (%) R. Tanamá	Coef. De Variación (%) RG Manatí	Coef. De Variación (%) R. Culebrinas	Coef. De Variación (%) R. Fajardo
Anual	25.8	46.6	23.0	38.2
Octubre	44.0	99.3	39.8	67.7
Noviembre	45.6	73.7	55.3	69.3
Diciembre	46.1	97.6	70.4	66.8
Enero	36.9	65.7	81.9	57.0
Febrero	31.4	55.1	79.8	48.1
Marzo	47.5	71.0	93.9	70.8
Abril	76.4	84.3	86.6	65.9
Mayo	69.9	107.8	78.3	82.7
Junio	49.4	77.1	53.5	63.9
Julio	39.0	65.2	59.5	57.7
Agosto	41.8	123.8	52.4	51.6
Septiembre	51.4	84.8	55.9	89.1

Para hacer comparaciones entre cuencas de distintos tamaños y características físicas, como es el caso, se ha utilizado también el caudal específico. Este parámetro permite hacer comparaciones rigurosas ya que expresa la capacidad de generar escorrentía de un territorio por unidad de superficie (Fig. 211). Es destacable que los dos ríos que discurren por la zona kárstica (Manatí y Tanamá) tienen menos capacidad de generar escorrentía (promediando 11 y 13 l/s/km² respectivamente) en comparación con Fajardo (27 l/s/km²) y Culebrinas (31 l/s/km²). También es llamativa la gran capacidad de generar escorrentía que muestra el Río Tanamá (105 km²) en comparación con el Río Grande de Manatí (608 km²), siendo este último casi 6 veces más caudaloso y con una superficie de cuenca mayor. Además, se observa en las cuencas de los ríos Culebrinas, Tanamá y Manatí, que la generación de escorrentía en los meses de invierno es muy similar, mientras que existe una gran diferencia en los meses de mayo-septiembre.

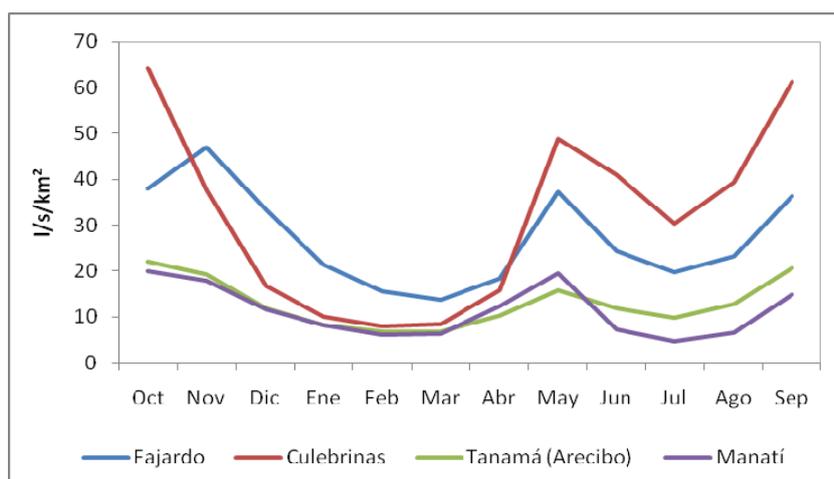


Figura 211. Caudal Específico en los cuatro ríos estudiados.

Respecto al análisis de percentiles de los caudales mensuales, tampoco se registran grandes diferencias entre los ríos. Los valores más altos para el Río Tanamá y el Río Fajardo se pueden observar en los meses de octubre, noviembre y mayo (Fig. 212). Sólo

el mes de mayo presenta una diferencia considerable en los eventos de crecida en ambos ríos, mientras octubre y noviembre en el Río Fajardo.

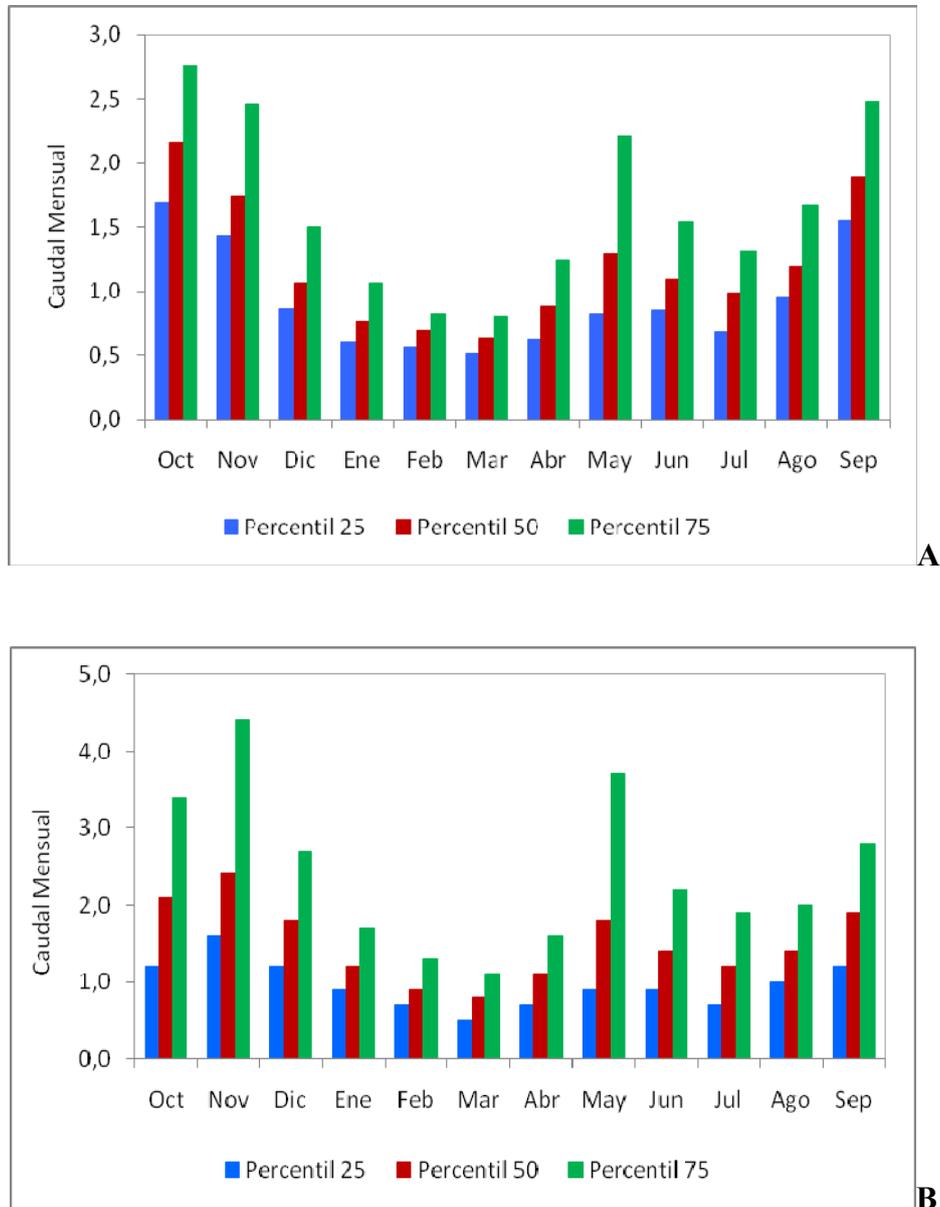


Figura 212. Percentiles 25, 50 y 75 de los caudales mensuales. A) Río Tanamá y B) Río Fajardo.

El Río Grande de Manatí (6.99 m³/seg) y el Río Culebrinas (8.47 m³/seg.) se muestran con más irregularidad en cuanto a la distribución de los caudales (Fig. 213). Los valores más altos nuevamente son los meses de octubre, noviembre y mayo. Estos meses, en especial el mes de mayo, muestran mayor torrencialidad y llega a superar los valores medios con gran diferencia, en especial en el Río Grande de Manatí.

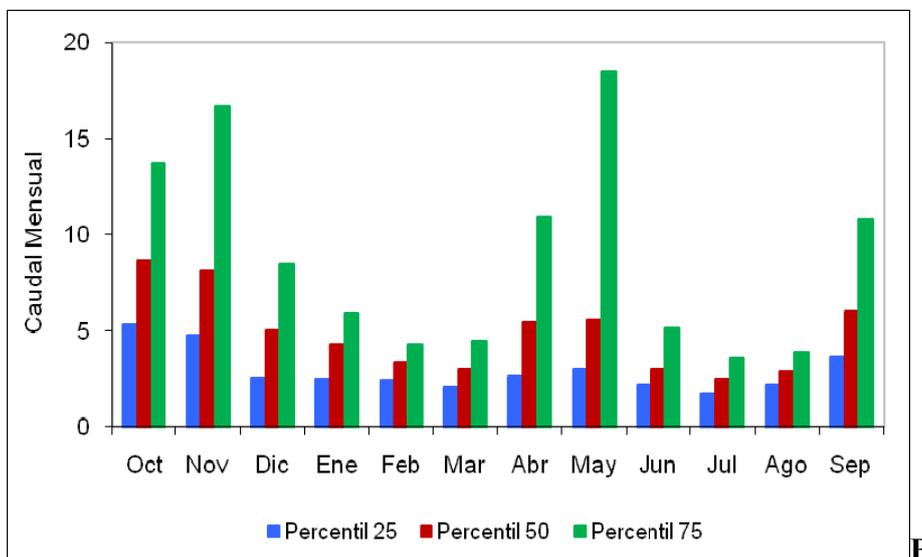
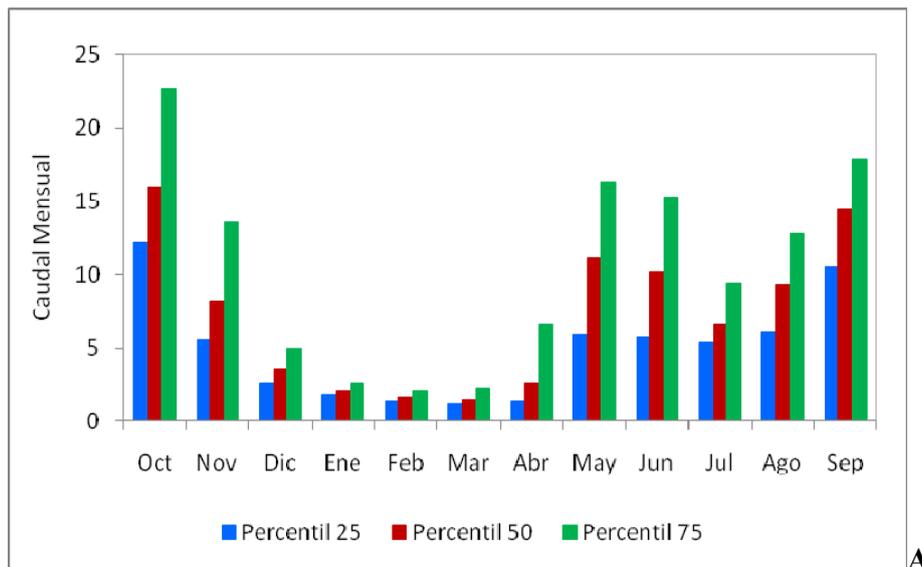


Figura 213. Percentiles 25, 50 y 75 de los caudales mensuales. A) Río Culebrinas y B) Río Grande de Manatí.

En cuanto al análisis de las tendencias, dos ríos muestran claras evoluciones regresivas. Tanto el Río Tanamá como el Río Grande de Manatí (tabla 82) obtienen valores de $r_s = -0.05$ y $r_s = -0.15$ respectivamente que no alcanzan el nivel de significación estadística. La gran variabilidad temporal de los datos de caudal (que incluso superan el 100% de coeficiente de variación) puede ser responsable de un cierto enmascaramiento de la tendencia. De hecho, al analizar el estadístico Mann-Kendall se detecta que existe una clara tendencia a la disminución de la aportación en ambos ríos con valores de $S = -38$ y $S = -96$, y valores $|Z| > 1.645$.

En el río Fajardo, aunque se observaron valores negativos con el análisis de Mann-Kendall, no se pudo identificar una tendencia clara debido a que estos valores no alcanzan para rechazar la hipótesis nula de no tendencia. Por otro lado, en el Río Culebrinas (al oeste de la isla) se observó una tendencia al aumento del caudal medio

anual con ambos análisis estadísticos, aunque con Rho Spearman queda lejos de alcanzar valores significativos.

Tabla 82. Comparación evolutiva de la aportación anual en los cuatro ríos.

	Aportación Anual hm ³	Aportación Anual Máx. hm ³	Aportación Anual Mín. hm ³	Coef. Variación %	Rho Spearman	S Mann-Kendall	Z
Río Tanamá	43.5	64.9	17.8	25.8	-0.05 (N)	-38	-2.88
Río Grande de Manatí	220.5	506.9	32.7	46.6	-0.15 (N)	-96	-5.77
Río Culebrinas	267.2	405.2	159.2	23.0	0.17 (N)	76	5.36
Río Fajardo	58.5	124.4	17.1	38.2	-0.02 (N)	-19	-1.29

N= valores no significativos

|Z| > 1.645 se rechaza la hipótesis nula de no tendencia

En cuanto a las tendencias de los caudales mensuales, destaca el río Culebrinas, el cual solo cinco de los doce meses del año obtuvieron valores que indican una ligera tendencia regresiva en el tiempo (tabla 83). Con excepción de septiembre, en el Río Grande de Manatí diez de los doce meses obtuvieron valores negativos con ambos análisis estadísticos (Fig. 214). Además, este río es el único que alcanzó valores significativos con el estadístico Rho Spearman, tanto en el mes de mayo como en agosto mostrando en ambos meses tendencias al aumento del caudal. En el caso del río Tanamá, nueve meses mostraron disminución al igual que en el río Fajardo, aunque este último no mostró tendencia anual (tabla 84). Por tanto, la mayoría de los meses en ambos ríos presentan una relación inversa entre la aportación y el tiempo.

Tabla 83. Comparación de la evolución de la aportación media mensual y anual en todos los ríos. Rho Spearman.

	Rho Spearman R. Tanamá	Rho Spearman RG Manatí	Rho Spearman R. Culebrinas	Rho Spearman R. Fajardo
Anual	-0.05 N	-0.15 N	0.17 N	-0.02 N
Octubre	0.17 N	-0.15 N	-0.07 N	-0.07 N
Noviembre	-0.01 N	-0.03 N	-0.08 N	0.16 N
Diciembre	-0.07 N	-0.19 N	0.13 N	-0.07 N
Enero	-0.04 N	-0.13 N	0.19 N	0.03 N
Febrero	-0.07 N	-0.11 N	-0.15 N	-0.10 N
Marzo	-0.04 N	-0.18 N	0.04 N	-0.18 N
Abril	-0.05 N	-0.11 N	0.23 N	-0.01 N
Mayo	0.15 N	-0.02 N	0.35 *	-0.05 N
Junio	0.07 N	-0.04 N	-0.09 N	-0.09 N
Julio	-0.14 N	-0.21 N	-0.12 N	-0.24 N
Agosto	-0.01 N	-0.23 N	0.40 *	-0.21 N
Septiembre	-0.02 N	0.11 N	0.16 N	-0.04 N

N= valores no significativos

* Correlación significativa al nivel de 0.05.

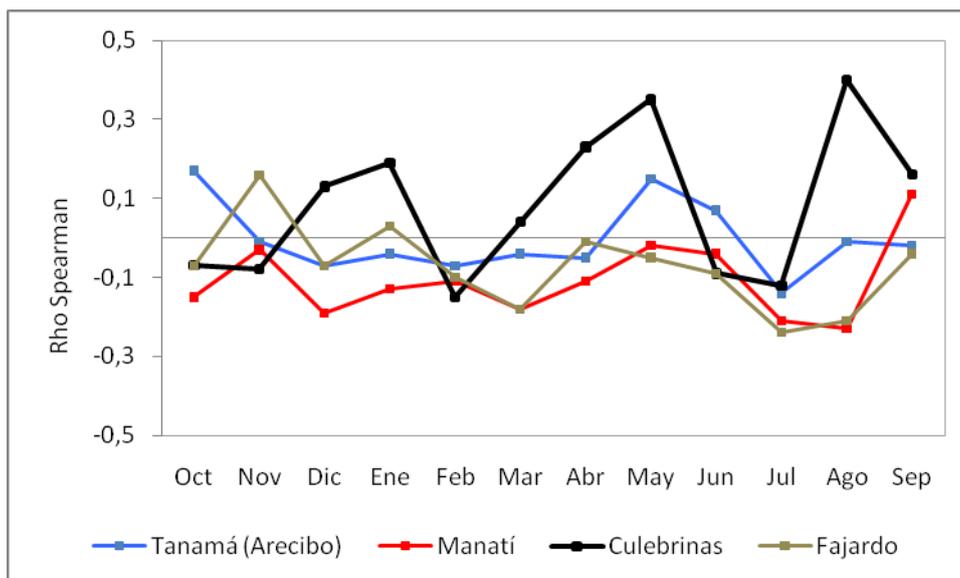


Figura 214. Resultados de Rho Spearman para cada río.

Tabla 84. Comparación de la evolución de la aportación media mensual y anual en los cuatro ríos. Mann-Kendall

	(Z) Mann-Kendall R. Tanamá	(Z) Mann-Kendall RG Manatí	(Z) Mann-Kendall R. Culebrinas	(Z) Mann-Kendall R. Fajardo
Anual	-2.88	-5.77	5.36	-1.29
Octubre	7.20	-7.21	-4.45	-3.45
Noviembre	-0.57	-1.52	-4.87	8.22
Diciembre	-3.76	-9.61	3.68	-2.74
Enero	-2.34	-6.57	5.00	0.85
Febrero	-2.98	-4.70	-2.10	-3.72
Marzo	-1.31	-7.48	3.82	-7.72
Abril	-2.14	-4.61	10.62	-1.10
Mayo	6.48	0.52	6.18	-3.51
Junio	2.20	-2.58	-6.56	-3.47
Julio	-6.98	-8.82	-7.75	-10.60
Agosto	0.78	-8.45	8.82	-12.53
Septiembre	0.20	5.78	5.64	-1.68

$|Z| > 1.645$ se rechaza la hipótesis nula de no tendencia

10.4 Relación entre precipitación y aportación

Los ríos muestran cierta discrepancia en cuanto a la escorrentía que puede generar la precipitación en cada uno de ellos. El Río Tanamá ($R^2 = 0.61$), y el Río Grande de Manatí ($R^2 = 0.70$) muestran una relación bastante marcada entre estas dos variables (precipitación y aportación) (Fig. 215). De esta manera, en estos dos ríos es de esperarse que los cambios en el comportamiento de la precipitación, las tendencias y las oscilaciones climáticas, sean sensibles en el comportamiento hidrológico del caudal. Al mismo tiempo, este comportamiento hace pensar que otros factores implicados en la generación de escorrentía tienen menos importancia en estas dos cuencas.

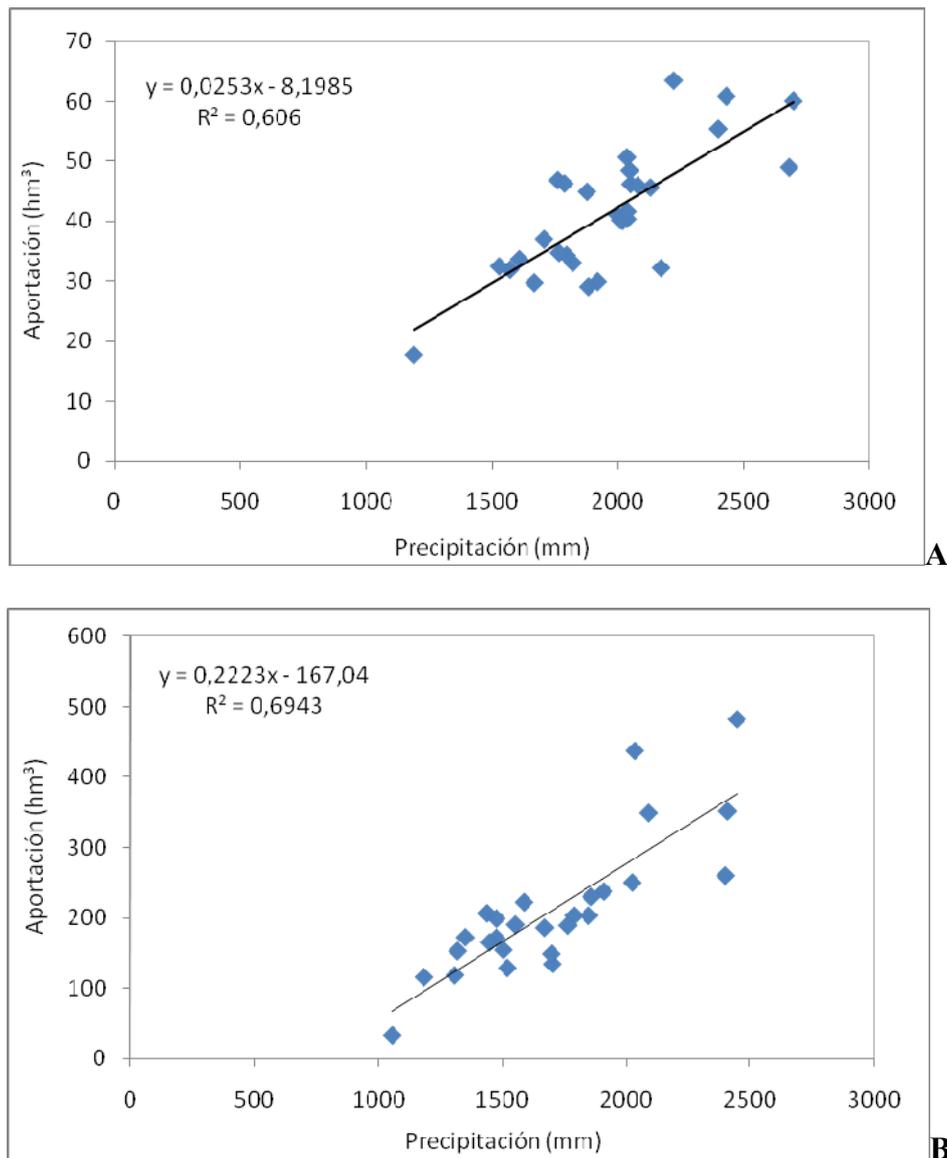


Figura 215. Relación entre la precipitación total y la aportación anual. A) Río Tanamá y B) Río Grande de Manatí

Como se discutió en el apartado 5, ambas cuencas son fronterizas, se encuentran en una misma región hidrográfica, comparten formaciones geológicas y geomorfológicas, el Interior Montañoso y los Valles Costeros del Norte, con rocas de origen volcánico cerca de la Cordillera Central y rocas sedimentarias calizas en la Provincia del Carso. Cuentan con suelos de textura arcillosa y arenosa, y comparten un bosque de gran importancia en la isla, Bosque Estatal de Toro Negro. Aun así, existen diferencias entre las cuencas en el porcentaje que representan los usos del suelo en cada una de ellas.

Al mismo tiempo, se han obtenido resultados llamativos en cuanto a la comparación de tendencias en la precipitación y en la aportación de las dos cuencas (tablas 85 y 86). Cabe destacar que la precipitación anual y la aportación en ambos ríos no muestran tendencias con Rho Spearman.

Tabla 85. Comparación de los coeficientes de correlación entre el tiempo, la precipitación media anual y mensual, y la aportación anual y mensual. Río Grande de Manatí y Río Tanamá.

	RS Aportación RG Manatí	RS Precipitación Cuenca RG Manatí	RS Aportación R. Tanamá (RG Arecibo)	RS Precipitación Cuenca RG Arecibo
Anual	-0.15 N	0.07 N	-0.05 N	0.02 N
Enero	-0.13 N	0.34	-0.04 N	0.23
Febrero	-0.11 N	0.07	-0.07 N	0.01
Marzo	-0.18 N	-0.31	-0.04 N	-0.19
Abril	-0.11 N	-0.40*	-0.05 N	-0.21
Mayo	0.02 N	-0.06	0.15 N	0.19
Junio	-0.04 N	0.04	0.07 N	0.07
Julio	-0.21 N	0.15	-0.14 N	-0.16
Agosto	-0.23 N	0.12	-0.01 N	0.37*
Septiembre	0.11 N	0.09	0.02 N	0.01
Octubre	-0.15 N	0.08	0.17 N	-0.04
Noviembre	-0.03 N	0.15	-0.01 N	-0.17
Diciembre	-0.19 N	0.09	-0.07 N	-0.07

N= valores no significativos

* Correlación significativa al nivel de 0.05.

Tabla 86. Comparación del estadístico Mann-Kendall (S) para la precipitación media mensual y anual, y la aportación mensual y anual. Río Grande de Manatí y Río Tanamá.

	Aportación RG Manatí	Precipitación Cuenca RG Manatí	Aportación R. Tanamá (RGA)	Precipitación Cuenca RG Arecibo
Anual	(-)	(-)	(-)	N
Enero	(-)	(+)	(-)	(+)
Febrero	(-)	(+)	(-)	N
Marzo	(-)	(-)	N	N
Abril	(-)	(-)	(-)	(-)
Mayo	N	(+)	(+)	(+)
Junio	(-)	N	(+)	N
Julio	(-)	(+)	(-)	(-)
Agosto	(-)	(+)	N	(+)
Septiembre	(+)	(+)	(-)	(+)
Octubre	(-)	(-)	(+)	(-)
Noviembre	N	N	N	(-)
Diciembre	(-)	(-)	(-)	(-)

(+/-) Correlación significativa al nivel de 0.05.

(N) No tendencia

Sin embargo, el Río Culebrinas ($R^2 = 0.07$) y el Río Fajardo ($R^2 = 0.22$) no muestran una relación tan estrecha y definida entre la precipitación y la aportación (Fig. 216). Puede que los factores como el paisaje y el uso de suelo, tengan en estas cuencas un papel más importante en el comportamiento hidrológico que los mismos agentes climáticos. Estos factores están directamente relacionados con la interceptación, la humedad edáfica y la infiltración.

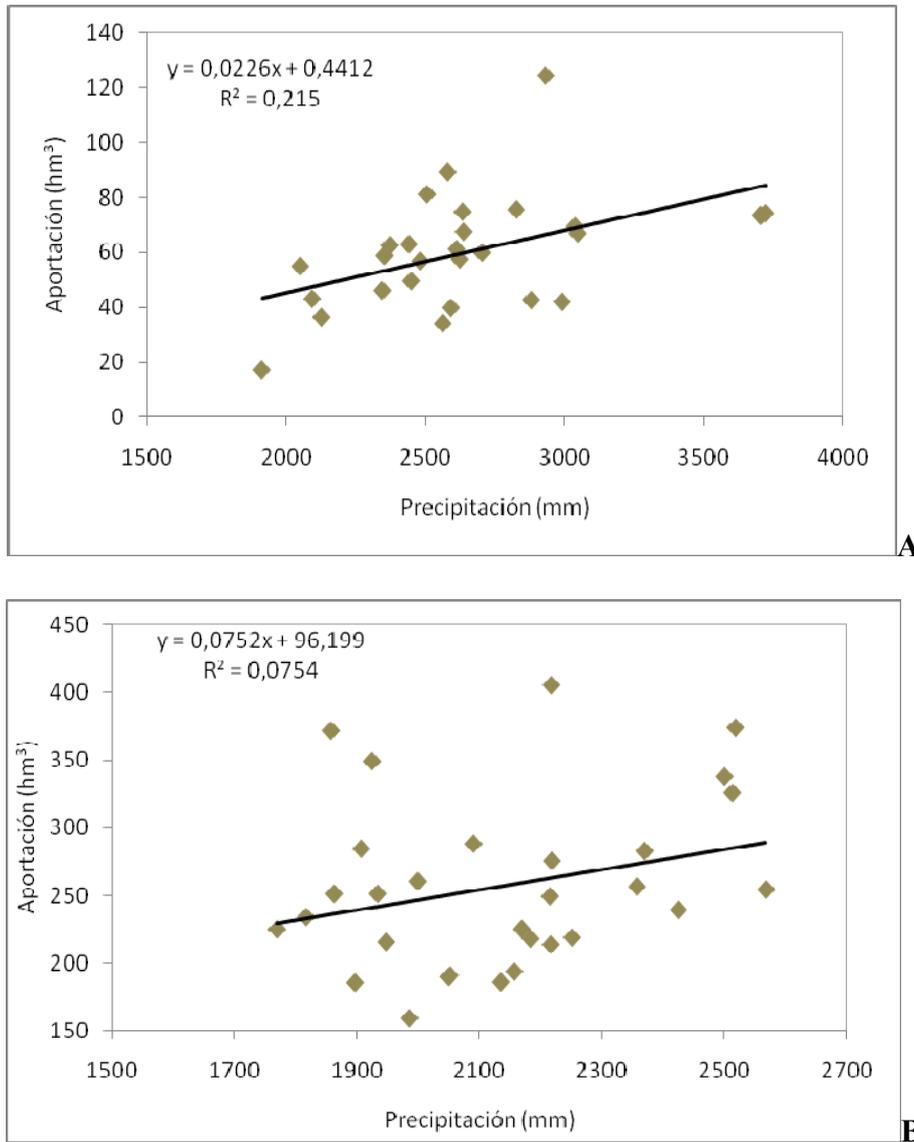


Figura 216. Relación entre la precipitación total anual y la aportación anual. A) Río Fajardo y B) Río Culebrinas

A escala anual, el río Fajardo mostró ligeras tendencias regresivas de la precipitación anual, mientras que la aportación, aunque los resultados obtenidos fueron negativos, ningún estadístico alcanzó valores significativos como para establecer una tendencia (tablas 87 y 88). De igual forma ocurre en algunos meses del año (febrero, marzo, junio y julio) donde la precipitación muestra un patrón de aumento pero no se refleja en la aportación del río. En el río Culebrinas a escala anual ocurre distinto al río Fajardo. La precipitación anual muestra una tendencia a la disminución, mientras que en la

aportación total anual se observa un ligero aumento en cantidad de agua que discurre por el cauce.

Tabla 87. Comparación de los coeficientes de correlación entre el tiempo, la precipitación media anual y mensual, y la aportación anual y mensual. Río Culebrinas y Río Fajardo.

	R Aportación R Culebrinas	R Precipitación Cuenca R Culebrinas	R Aportación R. Fajardo	R Precipitación Cuenca R Fajardo
Anual	0.17 N	-0.19 N	-0.02 N	-0.12 N
Enero	0.11N	-0.25 N	0.03 N	0.24 N
Febrero	-0.05 N	0.33*	-0.10 N	0.43*
Marzo	0.12 N	0.04 N	-0.18	0.17 N
Abril	0.29 N	-0.14 N	-0.01 N	0.08 N
Mayo	0.17 N	0.11 N	-0.05 N	-0.03 N
Junio	-0.14 N	-0.06 N	-0.09 N	0.13 N
Julio	-0.24 N	-0.25 N	-0.24 N	0.38 N
Agosto	0.26 N	-0.20 N	-0.21 N	-0.30 N
Septiembre	0.14 N	0.00 N	-0.04 N	-0.08 N
Octubre	-0.03 N	0.22 N	-0.07 N	-0.56**
Noviembre	-0.09 N	-0.22 N	0.16 N	-0.35 N
Diciembre	0.10 N	-0.07 N	-0.07 N	-0.07 N

N= valores no significativos

* Correlación significativa al nivel de 0.05.

**Correlación significativa al nivel de 0.01

Tabla 88. Comparación del estadístico Mann-Kendall (S) para la precipitación media mensual y anual, y la aportación mensual y anual. Río Culebrinas y Río Fajardo.

	Aportación R Culebrinas	Precipitación Cuenca R Culebrinas	Aportación R. Fajardo	Precipitación Cuenca R Fajardo
Anual	(+)	(-)	N	(-)
Enero	(+)	(-)	N	(+)
Febrero	(-)	(+)	(-)	(+)
Marzo	(+)	N	(-)	(+)
Abril	(+)	(-)	N	(+)
Mayo	(+)	(+)	(-)	N
Junio	(-)	(-)	(-)	(+)
Julio	(-)	(-)	(-)	(+)
Agosto	(+)	(-)	(-)	(+)
Septiembre	(+)	N	(-)	N
Octubre	(-)	(+)	(-)	(-)
Noviembre	(-)	(-)	(+)	(-)
Diciembre	(+)	N	(-)	(+)

(+/-) Correlación significativa al nivel de 0.05.

(N) No tendencia

10.5 Evolución de los usos del suelo

En 1951, los terrenos agrícolas representaban 18780 hectáreas y la superficie forestal ocupaba 43420 entre las cuatro cuencas. En 2007 la agricultura apenas alcanzaba 2100 (ha) y los bosques 77000. Todos los resultados obtenidos muestran un aumento considerable donde en 183% aumentó el bosque en la cuenca del Río Grande de Arecibo, 145% en Manatí, 244% en Fajardo y por encima del 250% en Culebrinas. Esto representa que la superficie aumentó 34350 hectáreas en total. En la cuenca del Río Fajardo, se observa una estabilización de la superficie forestal a partir de 1990, con un aumento final de 2180 ha. Al contrario, la cuenca del Río Culebrinas, muestra un aumento continuo desde 1951, evolucionando del 5% al 30% de superficie forestal (Fig. 217), ganando cerca de 6550 ha de terreno.

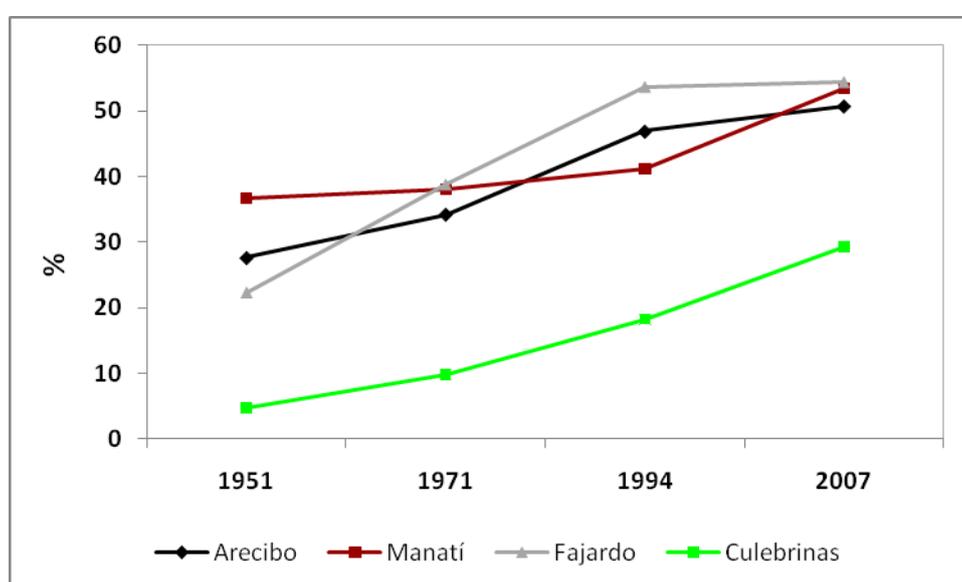


Figura 217. Evolución de la superficie forestal en cada una de las cuencas estudiadas.

Por otro lado, en los pastos y arbustos se ha perdido un 11% de la superficie, mientras que la actividad agrícola ha mermado de tal manera (cercana al 400%) que en las cuatro cuencas ha llegado casi a su extinción y en la actualidad apenas representan el 6% del terreno (Fig. 218). Esto constituye unas 16638 ha de cultivo abandonadas. No deja de ser llamativo, los pastos y arbustos que sufrieron oscilaciones y variaciones aunque cada cuenca con patrones diferentes. Como resultado final y como han evidenciado otros autores (López et al. 2001; Pascarella et al. 2000; Thomlinson et al. 1996) se puede observar que ocurrió una repoblación del bosque, principalmente por abandono de la agricultura (Fig. 219) y posteriormente por las prácticas de reforestación.

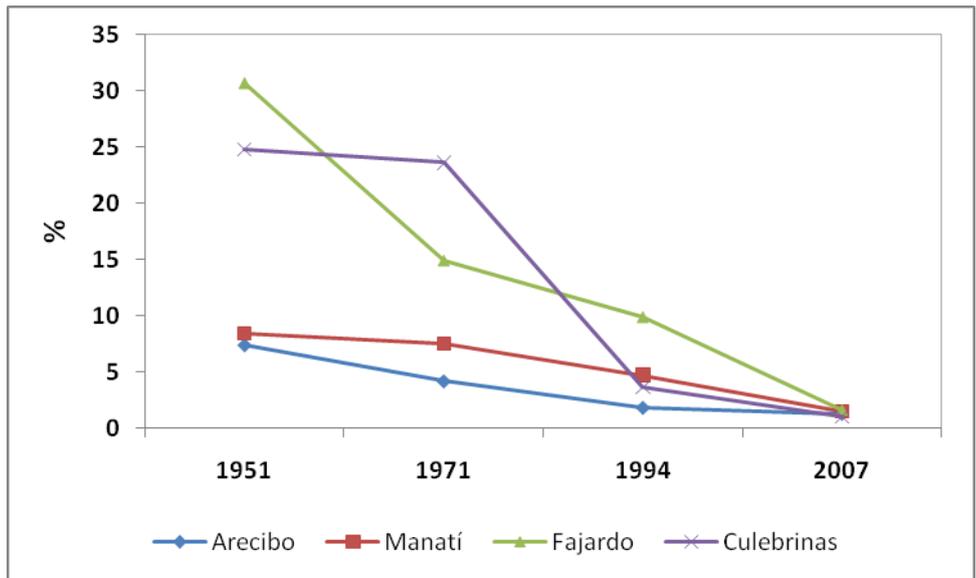


Figura 218. Evolución de la superficie agrícola en cada una de las cuencas estudiadas.

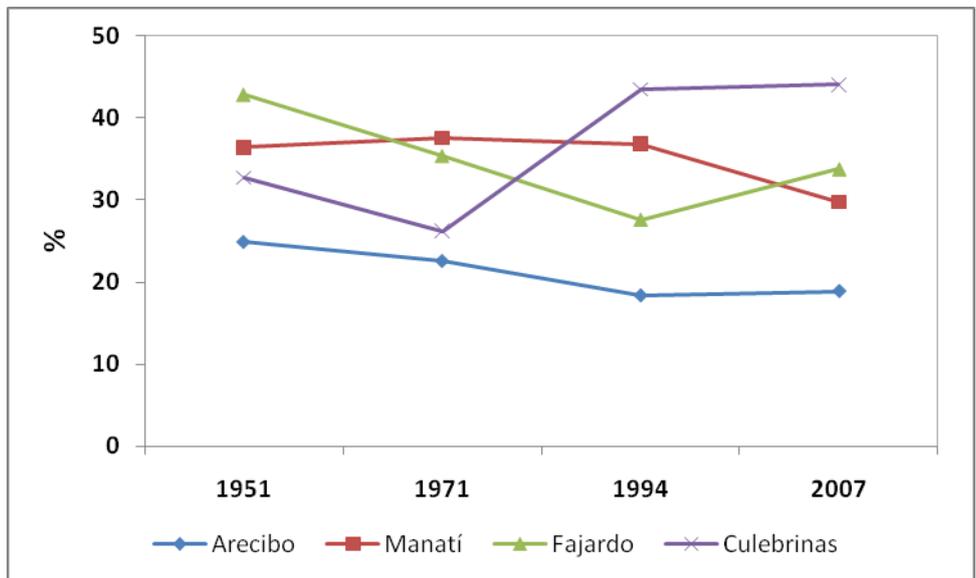


Figura 219. Evolución de los pastos y arbustos en cada una de las cuencas estudiadas.

10.6 Discusión y análisis de las relaciones entre las variables estudiadas.

Se ha procurado estudiar la integración que puede existir en la gestión territorial, las políticas económicas y poblacionales, y observar cómo ha respondido el territorio ante tales decisiones y como ha afectado esto a los recursos hídricos. Es de conocimiento común que los cambios de los usos de suelo en las cuencas hidrográficas fomentan variaciones y alteraciones en los comportamientos y procesos hidrológicos (García Ruiz et al. 2001). Sin distanciar, ni mucho menos restarle importancia a las variaciones climáticas, estos cambios paisajísticos pueden alterar la calidad y cantidad de agua, la interceptación por parte de la vegetación, la infiltración y la generación de escorrentía (Tomer y Schilling, 2009).

Como se ha observado hasta aquí, en todas las variables han ocurrido variaciones quizás independientes unas de otras (naturales y/o antrópicas) como el cambio climático, frecuencias y oscilaciones de los fenómenos atmosféricos (tormentas tropicales, ciclones, El Niño) sequías acusadas, así como la deforestación y reforestación asociadas a causas humanas. Sin embargo, los resultados y cambios que han sufrido cada una de estas variables, condicionarán el funcionamiento de las otras.

Según varios investigadores (Bosch y Hewlett, 1982; Leopoldo et al. 1995; Niehoff et al. 2002; Legesse et al. 2003; Li et al. 2007), las variaciones y oscilaciones climáticas alteran directamente el ciclo hidrológico, así como el tipo y abundancia de vegetación existente y, de esta manera, cambian y perturban el comportamiento de los sistemas fluviales. Además de las variaciones climáticas, los cambios en los usos de suelo pueden tener impactos inmediatos y duraderos en la hidrología fluvial, alterando el equilibrio entre la lluvia, la evapotranspiración y, por ende, la escorrentía (Lopez García et al. 2007; Li et al. 2007; Kumar y Duffy, 2009). Igualmente, distintas fuerzas de cambio, como las tendencias demográficas, políticas públicas nacionales y actividades macro-económicas resultan en alteraciones extensivas de la cubierta vegetal y usos de suelo, que luego tienen sus impactos a escala de cuenca (Legesse et al. 2003). La remoción completa o parcial de una cubierta forestal disminuye la interceptación por parte de la vegetación y podría verse alterada la disponibilidad de agua (Bruijnzeel, 2004). Esto se podría reflejar como un aumento en la precipitación neta que alcanza la superficie del suelo y a su vez un aumento en la escorrentía superficial. De igual forma se vería reducida la transpiración y podría aumentar la humedad edáfica (Bruijnzeel, 2004). Como se ha observado anteriormente, en la precipitación se han detectado fluctuaciones y oscilaciones tanto a escala anual como mensual en toda la isla. No obstante, ha sido complicado establecer tendencias en las cuencas en cuanto a la cantidad de agua que precipita.

Por otro lado, como es de esperarse para ríos de régimen hidrológico pluvial-tropical (Bruijnzeel, 2004) se observó que la relación entre la precipitación y la aportación es considerablemente alta principalmente en los ríos de la región del carso norteño, Cibuco-Guajataca (Río Tanamá y Río Grande de Manatí). Por el contrario, esta relación no aparenta ser tan estrecha en los otros dos ríos (Río Fajardo y Río Culebrinas). Quizás en la cuenca del Río Fajardo esta relación poco significativa pueda que responda a las diferencias que existen entre las estaciones cercanas a la costa y las de montaña.

Sorprendentemente, tres ríos mostraron una ligera disminución de agua anual, mientras no ocurrió así con la precipitación. Además en todas las cuencas el bosque tuvo una

regeneración sorprendente entre 1951-2007. En regiones tropicales próximas se han detectado alteraciones de los procesos hidrológicos relacionadas con modificaciones de la cubierta vegetal. Según Carlón Allende y Mendoza (2007) la cuenca de Fresnito (México), sufrió procesos de deforestación lo que redujo la infiltración y la alimentación de aguas subterráneas, mientras que la cuenca del Río San Marcos tuvo un aumento forestal del 7% y 27% en los matorrales, reduciendo los flujos superficiales y subterráneos debido a que el agua es más utilizada en las primeras etapas de crecimiento de la vegetación. Aunque según diversos autores (Bruijnzeel, 2004; Chappell et al. 2007), la discusión de la relación bosque y agua en los trópicos no es tan simple como en otras regiones del planeta debido a que la lluvia en estas áreas es notoriamente variable tanto en espacio como en tiempo, aún así, este aumento forestal en la isla, podría explicar en cierta medida la disminución de caudal en las cuencas de Puerto Rico.

Si bien se ha producido un considerable aumento de la superficie forestal en detrimento de la agrícola y un muy notable cambio en los usos del suelo, el proceso (cambio de una cubierta vegetal por otra: pastizal vs bosque, o en este caso en particular, cafetal vs bosque) ha sido muy distinto al de otras regiones. En el área mediterránea europea, por ejemplo, los cambios en la cubierta vegetal han sido más drásticos, siendo en muchos casos el paso del suelo desnudo, predominante gran parte del año en las zonas agrícolas, al bosque, allí donde se produjo el abandono de las áreas rurales (Magalhães, 2009). Por ese motivo, es probable que la influencia de los cambios de uso del suelo en Puerto Rico sobre los procesos hidrológicos, sea más matizada o se haya producido de otra manera. Según Bosch y Hewlett (1982), la respuesta hidrológica de las cuencas ante los cambios de la cubierta vegetal suele ser mucho más persistente y sensible en lugares áridos debido al lento proceso de la vegetación para recuperar. Según Cosandey et al. (2005), el mayor contraste existe entre el suelo desnudo y el bosque más que entre bosque y otro tipo de vegetación, lo cual puede ser relevante para explicar lo sucedido en Puerto Rico. Este estudio, realizado por Cosandey et al. (2005) en varias cuencas en la parte mediterránea de Francia, concluyó que talar el bosque aumentó la escorrentía en la cuenca Mont-Lozère en un 10% durante los años inmediatos después de la tala.

Estudios en latitudes tropicales han mencionado que la conversión del bosque tropical a superficie de pastos trastoca el ciclo hidrológico de una cuenca de drenaje, alterando el equilibrio entre precipitación/evaporación y, consecuentemente, la repuesta de la escorrentía en el área (Costa et al. 2003; Ziegler et al. 2004; Wenjie et al. 2006; Alemayehu et al. 2009; Germer et al. 2009; Harmsen et al. 2009). Guo et al. (2008), en un estudio para analizar la respuesta de la escorrentía ante los cambios en el clima y la cubierta vegetal en China (Cuenca del Lago Poyang), analizando diferentes escenarios. Uno de los supuestos estipulaba un cambio de tierras agrícolas (5.5%) a superficie forestales, esto generó una disminución en la escorrentía anual del -0.8%, siendo más acusado en los meses húmedos (-1.1%). En otro escenario se supuso esta misma transformación (agrícola a superficie forestal) pero con un porcentaje mayor (23.3%). Este cambio supuso una disminución de -3.2% de la escorrentía anual y -4.5% en los meses húmedos. De manera inversa, usaron su modelo para analizar la respuesta hidrológica cuando el suelo cambia de superficie forestal a pastos (un 16.3%). Esto representó un aumento de la escorrentía anual de 1.7% y 4.4% en la época de estiaje.

Aunque no se ha realizado un estudio muy exhaustivo con la ETP en este trabajo, aún así no se puede olvidar que puede ayudar a entender los resultados que muestran las

distintas cuencas. La precipitación media anual en la cuenca del Río Grande de Manatí fue de 1698 mm y la ETP alcanza valores de 1477 mm anuales, un 87% del agua precipitada. Mientras que, en la cuenca del Río Grande de Arecibo precipita una media de 1964 mm anuales, la ETP alcanza valores de 1461 mm, un 74% de lo que precipita. Por otro lado, dadas las temperaturas relativamente bajas de la cuenca del río Fajardo, donde precipitan 2556 mm anuales, quedan susceptibles a evaporarse unos 970 mm lo que representa solo el 38%. Por último, en la cuenca del río Culebrinas precipitan 1769 mm anuales y el 61% (1071 mm) es susceptible a evaporarse. Estudios similares, dirigidos a calcular la evapotranspiración en distintos bosques tropicales, estiman que cerca del 68% del agua que precipita son evapotranspirados anualmente en el Amazonas Central (Leopoldo et al. 1995). Otros estudios informan que dependiendo del tipo de bosque tropical, la respuesta de la evapotranspiración no sería la misma (Tanaka et al. 2008).

Aunque en ninguna de estas cuencas queda expresamente claro qué está ocurriendo con la precipitación, con las temperaturas aparenta un aumento en la cuenca del Río Grande de Manatí y en la cuenca del Río Culebrinas. Se observa un ligero descenso en una estación de la cuenca del Río Grande de Arecibo y en una de las estaciones de la cuenca del Río Fajardo. No obstante, estos resultados no deben enmascarar, ni mucho menos perder de vista que se observó un aumento significativo en la temperatura media anual a escala de toda la isla.

Por ello, los resultados de las temperaturas se han de tomar con prudencia ya que la mayoría de las estaciones en la isla han mostrado un claro ascenso de la media anual y mensual. Más aún, la mayoría de las estaciones en la región hidrográfica Cibuco-Guajataca también han mostrado estas tendencias. De tal manera, aunque las precipitaciones no muestren tendencias regresivas, un leve aumento de las temperaturas a escala insular (lo que indica mayor evaporación), serían condiciones que pueden crear una tendencia regresiva en los volúmenes de agua en los ríos. Esto evidenciaría de una manera u otra que las variables climáticas (temperatura) también están condicionando e influyen en el comportamiento hidrológico de dichas cuencas.

Sin embargo, es bien sabido que la temperatura no es el único factor a tomar en consideración cuando se trabaja con la ETP, ni mucho menos cuando se trata respuestas hidrológicas (Tomer y Schilling, 2009; Leopoldo et al. 1995; Legesse et al. 2003). Se considera que el bosque juega un papel importante en el ciclo hidrológico a escala regional o local (Leopoldo et al. 1995). De esta manera, la evapotranspiración real de la cuenca está condicionada por la proporción relativa y el tiempo de la disponibilidad del agua, energía disponible y sobre todo el tipo y condiciones de la cubierta vegetal (Tomer y Schilling, 2009). Además, los bosques tropicales representan una región donde la demanda climática probablemente limita la evaporación forestal (Calder, 1998; Tanaka et al. 2008; Buijnzeel, 2004).

Cambios significativos en la cubierta vegetal pueden causar serias modificaciones en la región y su entorno (Shukla et al. 1990; Le Tellier et al. 2009). Por todo ello, otras variables involucradas son las transformaciones en el paisaje y los cambios en los usos del suelo. Teniendo en consideración que todas las cuencas estudiadas sufrieron cambios drásticos en los últimos 100 años, muy bien documentados no solo en este trabajo sino que con distintas investigaciones (USDA, 1982; Imus, 1955; Wadsworth, 1950) y que los recursos hídricos se encuentran altamente ligados a los distintos

mosaicos paisajísticos dentro de un sistema de drenaje natural, es propio pensar que estas transformaciones de paisaje, han tenido sus implicaciones en la cantidad del recurso hídrico que discurre por cada cuenca y en el comportamiento hidrológico.

Ha quedado establecido que en todas las cuencas la superficie de terreno forestal ha ido en aumento en las últimas décadas. En un área forestal de alta interceptación (usualmente bosque joven, secundario denso) 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 (Costa et al. 2003). Diversos estudios demuestran que en regiones tropicales húmedas, la interceptación (que fluctúa entre 15-20%) por parte de la vegetación es un componente importante de la evaporación anual del bosque y por ende en la disponibilidad de los recursos hídricos (Calder, 1998; Leopoldo et al. 1995; Holwerda, 2010; Holder, 2004).

Según Guo et al. (2008), la superficie forestal cuenta con una tasa de evaporación mucho más elevada que las tierras agrícolas. Esto se debe según estos autores a la profundidad radicular de los árboles, que le permite extraer la humedad del suelo más rápido que el agua transpirada por raíces cortas de plantas agrícolas, y además, usualmente, la vegetación forestal tiene un área foliar mucho más grande que permite mayor transpiración.

Otros investigadores demuestran que la transformación de la cubierta forestal, en cuencas de menor tamaño, para tierras agrícolas, pastos y arbustos puede aumentar la aportación total del cauce (Siriwardena et al. 2006). Un estudio realizado por estos investigadores en tierras australianas (Río Comet) donde se estudiaba el impacto del uso del suelo en el área de captación en cuencas de gran tamaño, ha demostrado que en años donde existía mayor superficie forestal (83% del terreno), la escorrentía generada por la precipitación era muy inferior comparado con años más reciente donde la cubierta forestal apenas representa el 38%. Según Siriwardena et al. (2006), la escorrentía ha aumentado en un 40%, a la vez que la superficie forestal ha disminuido un 45%.

Según Li et al. (2007), en un estudio realizado en África occidental (Cuenca del Lago Chad y Cuenca del Río Nigeria), para que se observe un aumento en la cantidad de agua que discurre por un cauce, la cuenca debe sufrir una pérdida mayor del 50% de su superficie forestal. De este modo, destaca la cuenca del Río Culebrinas, pues aunque el bosque ha mostrado un aumento en superficie, en la actualidad (2007) sólo el 29% de la misma está cubierta por superficie forestal y podría ser que el coeficiente de escorrentía sea mayor que en las demás cuencas.

Otro factor importante es el proceso de desarrollo urbanístico. Mientras en la mayoría de las cuencas este proceso intenso ocurrió en los llanos costeros, el mismo se observa en Culebrinas en la parte alta de la cuenca. Según Maza et al. (1995), la urbanización es sinónimo de impermeabilización y ésta a su vez produce un considerable aumento del escurrimiento (precipitación efectiva en términos hidrológicos), y una disminución del tiempo de concentración de la cuenca lo que tiene por efecto un aumento de los caudales máximos. El aumento de los caudales máximos quedó confirmado en el río Culebrinas.

Otro factor importante relacionado con el tipo de precipitación, los recursos hídricos y con la cubierta vegetal, es la interceptación (Martínez-Fernández, 2006). La

interceptación en áreas tropicales puede variar dependiendo de la elevación, tipo de precipitación (intensidad y duración, entre otros) y tipo de cubierta vegetal (Holder, 2004; Holwerda et al. 2010). Un estudio realizado durante 44 semanas en Guatemala (cuenca experimental Sierra de las Minas), estimó que a una altura de 2100 metros la interceptación alcanza un 35% de la precipitación bruta, mientras que a 2550 metros apenas alcanza el 12% (Holder, 2004). Un estudio realizado en Veracruz, México (Bosque La Cortadura), analizó las diferencias de la interceptación entre bosque maduro, bosque secundario y tipo de precipitación (Holwerda et al. 2010). Curiosamente, para la lluvia, se estimó que la interceptación del bosque secundario puede alcanzar entre 10-11%, con ciertas variaciones dependiendo de la estación del año, época húmeda o época de estiaje, mientras que en bosque maduro se estimó que alcanza del 18-20% (Holwerda et al. 2010). Por lo visto, la diferencia de la interceptación de lluvia y niebla entre bosque maduro y bosque secundario fue cerca del doble, siendo más representativa en el primero que en el segundo.

Por todo ello, podríamos llegar a pensar que el porcentaje de agua interceptada en las cuencas ha aumentado con el pasar de los años, dado a que la superficie forestal así lo ha demostrado (Fotos 10-12). Aunque como bien afirman muchos investigadores que la interceptación es una variable no extrapolable y tiene otros factores que la condicionan, aún así se estima que el bosque pluvial tropical al este de Puerto Rico podría interceptar entre 12-54% del agua que precipita (Schellekens et al. 1999).



Foto 10. Niebla Bosque Pluvial Tropical, El Yunque.



Foto 11. Densidad de Vegetación en Bosque Pluvial Tropical, El Yunque.



Foto 12. Niebla en el municipio de Adjuntas.

11. CONCLUSIONES



El Yunque, PUERTO RICO

11. CONCLUSIONES

El conocimiento de la disponibilidad de los recursos hídricos para la vida y ciertas actividades socio-económicas, es de suma importancia para el ser humano. Por ello, en contexto de cambio global, la investigación sobre el comportamiento hidrológico, los patrones de los recursos hídricos y sus variaciones, presentan hoy día un gran reto para la comunidad científica. Como se ha descrito en este trabajo, el enfoque de estudiar los recursos hídricos varía mucho entre los diferentes investigadores. Algunos estudios atribuyen ciertas alteraciones a los cambios observados en las condiciones atmosféricas y climáticas, mientras otros le otorgan valor a las influencias del territorio. Es por todo ello que se hace necesario el entendimiento integrado de las variables relacionadas con los recursos hídricos, sobre todo, las oscilaciones climáticas y los cambios en los usos de suelo. Bajo este argumento, se ha llevado a cabo esta investigación sobre las condiciones hidroclimáticas, sus variaciones y tendencias en la isla de Puerto Rico.

El análisis de tendencias hidroclimáticas recientes, y la transformación del paisaje en la isla de Puerto Rico, revelan en este estudio resultados interesantes para la gestión de los recursos hídricos en latitudes tropicales y en el Caribe. Debido a las particularidades atmosféricas, los patrones de precipitación en el Caribe, en general, y Puerto Rico, en particular, aparentan ser más complejos que unas simples tendencias y oscilaciones climáticas. Aunque se han identificado ciertas semejanzas, la isla no muestra un patrón espacio-temporal único en relación con la precipitación. Un importante aspecto de este estudio, de acuerdo con los datos y con los resultados obtenidos, es que las precipitaciones anuales indicaron un ligero cambio en su distribución espacial. A partir del análisis de las cuatro regiones hidrográficas de Puerto Rico, se detectó un ligero aumento en la región sur, a la vez que se observó un descenso en la región oeste. Por tanto, es interesante recalcar que las tendencias de la precipitación son positivas en sotavento, en las divisorias de las aguas. Además, se ha observado un cambio en el comportamiento anual de la lluvia. Fue más común observar tendencias regresivas en los meses de verano (junio, julio y agosto), donde se concentra el 26% de la precipitación, que en los meses de invierno (enero, febrero y marzo) que apenas aportan el 14% de lluvia registrada en un año promedio. Una gran cantidad de estaciones (23) mostró tendencias regresivas significativas con el test de Mann-Kendall en verano, mientras que 20 estaciones indicaron aumento en invierno. De manera general, los patrones son muy variables para todas las estaciones. Con estos datos, no se puede identificar una tendencia anual, sin embargo, es notorio pensar que está ocurriendo una alteración en el ciclo de las precipitaciones, de tal manera que en los meses donde menos llueve están aumentando y los meses en que más llueve están disminuyendo.

En la región Cibuco-Guajataca (la cuenca del Río Grande de Arecibo y Manatí) no fue posible identificar un patrón claro con la precipitación, sin embargo se pudo establecer una ligera disminución en el volumen de agua que discurre por ambos ríos (Tanamá y Río Grande de Manatí). En la de Fajardo, se observó un descenso anual de la precipitación, pero poco concluyente, ya que una estación mostró valores positivos, otra indicó una disminución, y en la restante, no se pudo establecer un patrón. Esta misma tendencia también fue observada en la aportación del río. Es interesante destacar que la disminución de la escorrentía en estos tres ríos, al parecer, no responde únicamente a los patrones de precipitación, pues se observaron oscilaciones y variaciones (aumento en algunos meses y disminución en otros) que no se pueden identificar en la aportación.

Por todo ello, se hace necesario acudir a las otras variables estudiadas en este trabajo, como son la temperatura y los cambios en los usos del suelo.

Referente a la temperatura, se ha evidenciado un aumento paulatino en toda la isla. Siendo ésta una variable de mucha influencia en los procesos hidrológicos, es conveniente pensar que puede ocurrir un ligero aumento en la transferencia del agua en superficie hacia la atmósfera mediante el proceso de la evaporación. Por término medio, y según los resultados del análisis de regresión, la temperatura aumentó anualmente 0.014°C entre 1970-1995. Mientras, se observó que en el río Tanamá la aportación anual disminuyó ligeramente a razón de $0.05 \text{ hm}^3/\text{año}$, de igual forma en el río de Manatí $1.6 \text{ hm}^3/\text{año}$ y en el río Fajardo se redujo en $0.09 \text{ hm}^3/\text{año}$. En Culebrinas, la cuenca muestra claros indicios de disminución en la precipitación total anual, mientras que se pudo observar en el río un aumento de la aportación anual y de los caudales máximos. Puede que el notable proceso de urbanización que se dio en la parte alta de esta cuenca haya influido. De esta manera, su capacidad de generar escorrentía podría ser mayor que la de las demás áreas estudiadas. Por otra parte, la superficie forestal en Culebrinas apenas representa el 29%, mientras que en las otras tres cuencas supera el 50%. Estas dos circunstancias pueden haber contribuido al diferente comportamiento de este río con respecto a los otros.

Tomando en consideración que los usos del suelo también participan directamente en el ciclo hidrológico, merece la pena asumir que estas transformaciones, en cierta medida, han tenido su impacto en los recursos hídricos de la isla. Además, quedan documentado en éste y otros trabajos aquí citados, los intensos cambios sufridos en el paisaje de la isla y, sobre todo, en lo que respecta a la cubierta vegetal. Los cambios de uso del suelo y la intervención sobre el territorio son actos universales que tienen sus consecuencias sobre el paisaje. Puerto Rico ha experimentado procesos de transformación como consecuencia de los grandes cambios políticos y económicos sufridos en la historia reciente. A consecuencia de los procesos migratorios hacia EEUU y del campo a la ciudad, surge el abandono del sector agrícola y se evidencia una caída casi absoluta de dicha economía, dando lugar a las transformaciones paisajísticas que se observaron en los resultados de este estudio. A raíz de esto, se origina un nuevo panorama económico en Puerto Rico que ha influenciado en los cambios de uso del suelo y que hoy se plasman sobre el terreno. Muchas de las tierras de cultivo en los municipios costeros se han utilizado para la expansión urbana, como puede ser el caso de Manatí, Barceloneta y Arecibo. Mientras, en los municipios del interior de la isla, como Utuado y Ciales, ha ocurrido un más que notable abandono de estas tierras, con la consiguiente recuperación y transformación del tapiz vegetal.

Se puede señalar que no sólo ocurrió un abandono de las tierras, sino que también hubo unas políticas por las cuales el gobierno y la empresa privada se dieron la tarea de reforestar miles de hectáreas en los años 1950 y 1970. De esta manera, queda debidamente establecido que hubo un aumento forestal en las cuatro cuencas estudiadas que, de manera general, supera el 100%. Este aumento en la cubierta vegetal podría haber afectado a la interceptación, a la infiltración y a la escorrentía superficial. También ocurrió un intenso proceso de urbanización, aumentando su superficie casi un 60% más que en 1951, sobre todo en las áreas más próximas a la costa, mientras que la superficie agrícola disminuyó abruptamente.

Cabe recalcar, que si bien hubo un cambio drástico en los usos del suelo, éste no ha ocurrido de igual forma que como se ha documentado por distintos autores en otras regiones del Planeta. La diferencia no sólo radica en la latitud, en las condiciones bioclimáticas y en el tipo de cubierta vegetal, sino también, en las prácticas agrícolas y, sobre todo, en que el suelo en Puerto Rico casi nunca ha permanecido desnudo, debido a los tipos de cultivos, a la rápida recuperación que muestra la vegetación en latitudes tropicales y a que la gran mayoría de la superficie agrícola en las partes altas de las cuencas estudiadas estuvo representada por café en pleno sol y café de sombra. Este sistema de siembra, no permitía que el suelo estuviese expuesto directamente a la acción de los procesos atmosféricos, ya que siempre integraba árboles, plantas frutales, plátanos, naranjos, guaba, etc. Es por todo ello que los cambios observados y la respuesta de los procesos hidrológicos han sido distintos a los encontrados en otros estudios llevados a cabo en diversas regiones climáticas, con diferentes cultivos, sistemas de explotación y cubierta vegetal.

A través de este análisis, queda explicado el comportamiento hidrológico y las tendencias que mostraron los ríos, el comportamiento de la precipitación, la temperatura y los cambios en los usos de suelo. Se pudo analizar la relación existente entre precipitación y aportación. Aun así, no se consiguió argumentar de la misma manera en el caso de las tendencias. Por tal razón, se considera que la transformación que ha sufrido el paisaje puertorriqueño en la historia reciente (abandono de tierras agrícolas, urbanización, y regeneración y aumento del bosque) podría explicar, en cierta medida, la disminución de caudal que se observó en tres de los cuatro ríos. Todos estos cambios de uso de suelo y la nueva distribución espacial de la población han influenciado claramente sobre elementos que están muy ligados a los recursos hídricos. Es de conocimiento común que todos estos factores se deben tomar en consideración para detectar cambios y establecer los impactos que pueden causar los mismos sobre el agua que discurre en una cuenca.

A la luz de los resultados obtenidos en este trabajo, quedó establecido que los factores climáticos, por sí solos, no pueden explicar las variaciones que se están produciendo en los caudales que discurren en los ríos. Esto indica que los factores paisajísticos y territoriales tienen también una gran influencia. Por este motivo, se hace necesario sentar las pautas que permitan hacer una adecuada gestión del territorio que favorezca en cualquier caso, el mantenimiento del buen estado de las cuencas hidrográficas y a su vez los recursos hídricos en Puerto Rico. Urge un enfoque integrado y un monitoreo continuo para entender los efectos de los múltiples factores relacionados con el funcionamiento hidrológico, que condicionan la cantidad y disponibilidad de este recurso.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



Embalse Dos Bocas, PUERTO RICO

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AESAWY, A.M., HASANEAN, H.M. **1998**. Annual and Seasonal Climatic Analysis of Surface Air Temperature Variations at Six Southern Mediterranean Stations. *Theoretical and Applied Climatology* 61, 55-68
- AIDE, T.M., ZIMMERMAN, J.K., ROSARIO, M., MARCANO, H. **1996**. Forest Recovery in abandoned cattle pasture along an elevational gradient in Northeastern Puerto Rico. *Biotropica* 28(4a) 537-548
- AKSOY, H., ERDEM UNAL, N., VESSELIN ALEXANDROV, SNEJANA DAKOVA AND JAEYOUNG YOON. **2007**. Hydrometeorological Analysis of northwestern Turkey with links to climate change. *International Journal of Climatology* DOI: 10.1002/joc.1599 1047–1060
- ALAMEDA J. I. **2000**. *EL Mercado Laboral en PUERTO RICO: Fundamentos básicos, análisis e interpretación. Ceteris Paribus. Vol 2*
- ALEMAYEHU, F., TAHA, N., NYSSSEN, J., GIRMA, A., ZENEBE, A., BEHAILU, M., DECKERS, S., POESEN, J. **2009**. The impacts of watershed management on land use and land cover dynamics in Eastern Tigray (Ethiopia). *Resources, Conservation and Recycling* 53 192–198
- ALLAN, R. P., SODEN, B. J. **2007**. Large discrepancy between observed and simulated precipitation in the ascending and descending branches of the tropical circulation. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L18705, doi:10.1029/2007/GL031460, 2007.
- ANDRÉASSIAN, V. **2004**. Water and Forest: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology* 291 1-27.
- AYALA, C. **1996**. The Decline of the Plantation Economy and the Puerto Rican Migration of the 1950s. *Latino Studies Journal* Volume 7, N° 1, 61-90.
- AZEVEDO, J.A., WILLIAMS, J.R., MESSINA, M.G., FISHER, R.F. **2005**. Impacts of a Sustainable Forestry Initiative Landscape Level Measures in Hydrological Processes. *Water Resources Management* 19: 95-110 DOI 10.1007/s11269-005-1503-5
- BAGGALEY, N.J., LANGAN, S.J., FUTTER, M.N., POTTS, J.M., DUNN, S.M. **2009**. Long-term trends in hydro-climatology of a major Scottish mountain river. *Science of the Total Environment* 407 4633–4641
- BALLESTER PÉREZ, M. y GONZÁLEZ PEDROSO, C. **2001**. *Variaciones y tendencias de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte*. Instituto de Meteorología. Agencia del Medio Ambiente de la República de Cuba. CITMA. 11pp
- BARRAGAN, J. M. **2003**. *Medio ambiente y desarrollo en Áreas Litorales; Introducción a la Planificación y Gestión Integradas*. Ed. Servicios de Publicaciones de la Universidad de Cádiz. 301pp

- BARRETO ORTA, M., MUÑIZ QUIÑONES, V., RIVERA COLÓN, E., SEGUINOT BARBOSA, J. Y VILLANUEVA COLÓN, N. **2002**. *Geografía de Puerto Rico: Recursos y Geosistemas*. Ediciones Santillana, Inc. 224pp
- BATISANI, N., YARNAL, B. **2009**. Rainfall variability and trends in semi-arid Botswana: Implications for climate change adaptation policy. *Applied Geography xxx* 1-7.
- BAYRAKTAR, H., TURALIOGLU, F.S., ŞEN, Z. **2005**. The estimation of average areal rainfall by percentage weighting polygon method in Southeastern Anatolia Region, Turkey. *Atmospheric Research* 73 149– 160
- BEDNORZ, E., KOSSOWSKI, T. **2004**. Long-term changes in snow cover depth in eastern Europe. *Climate Research* Vol. 27: 231–236
- BEISHLAG, G. 1955. Trends in Land Use in Southern Puerto Rico. En: *Symposium on the Geography of Puerto Rico*. Eds. Jones, C.F., Picó, R. University of Puerto Rico Press. Río Piedras, P.R. 269-296. 503pp.
- BIRDSEY, R.A., WEAVER, P.L. **1987**. Forest Area Trends in Puerto Rico. *Research Note so-331, USDA, Forest Service Southern Forest Experiment Station*
- BONFILS, C., DUFFY, P.B., SANTER, D.B., WIGLEY, T.M.L., LOBELL, D.B., PHILLIPS, T., DOUTRIAUX, C. **2007**. Identification of External Influences on Temperatures in California. En: *California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research Program. CEC-500-2007-047*.
- BOSCH, J.M., HEWLETT, J.D. **1982**. A review of catchments experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55 3-23
- BRIGGS, R.P. **1968**. Geologic Map of the Arecibo Quadrangle, Puerto Rico. US Geological Survey. Prepared in cooperation with The Commonwealth of Puerto Rico, Economic Development Administration. Industrial Research Department.
- BROCKMANN, V.W. **1955**. Land Type and Land Utilization in the Caguas-San Lorenzo Region. En: *Symposium on the Geography of Puerto Rico*. Eds. Jones, C.F., Picó, R. University of Puerto Rico Press. Río Piedras, P.R. 297-323. 503pp.
- BRUIJNZEEL, L.A. **2004**. Hydrological functions of tropical forest: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystem and Environment* 104 185-228.
- BRUNETTI, M., BUFFONI, L., MAUGERI, M., NANNI, T. **2000**. Precipitation intensity trends in Northern Italy. *International Journal of Climatology* 20: 1017–1031
- BRUNNSCHWEILER, D.H. **1955**. Land Use in Ciales, Morovis, and Orocovis. En: *Symposium on the Geography of Puerto Rico*. Eds. Jones, C.F., Picó, R. University of Puerto Rico Press. Río Piedras, P.R. 403-439 503pp.

- BURN, D.H., HAG ELNUR, M.A. **2002**. Detection of Hydrological trends and variability. *Journal of Hydrology* 255 107-122
- BÜTLER, R., SCHLAEPFER, R. **2004**. Spruce snag quantification by coupling colour infrared aerial photos and a GIS. *Forest Ecology and Management* 195 325–339
- BUYTAERT, W., CELLERI, R., WILLEMS, P., DE BIÈVRE, B., WYSUERE, G. **2006**. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology* 329, 413– 421
- CALDER, I.R. **1998**. Water use by forest, limits and controls. *Tree Physiology* 18, 625-631.
- CALDER, I.R. **2007**. Forest and water-Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management* 251 110-120
- CANNAROZZO, M., NOTO, L.V., VIOLA, F. **2006**. Spatial distribution of rainfall trends in Sicily (1921–2000). *Physics and Chemistry of the Earth* 31 1201–1211.
- CARLÓN ALLENDE, T. Y MENDOZA, M. E. **2007**. Análisis hidrometeorológico de las estaciones del Lago de Cuitzeo. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM*. ISSN 0188-4611, Núm. 63 56-76
- CEBALLOS BARBANCHO, A., MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., LUENGO-UGIDOS, M.A. **2004**. Analysis of rainfall trends and dry periods on a pluviometric gradient representative of Mediterranean climate in the Duero Basin, Spain. *Journal of Arid Environments* 58 215–233
- CEBALLOS BARBANCHO, A., MORÁN TEJEDA, E., LUENGO UGIDOS, M. A. AND LLORENTE PINTO, J. M. **2007**. Water resources and environmental change in a Mediterranean environment: The south-west sector of the Duero River Basin (Spain). *Journal of Hydrology* 351, 126-138.
- CENTELLA, A., GUTIÉRREZ, T., LIMIA, M., RIVERO JASPE, R. **1999**. Climate change scenarios for impact assessment in Cuba. *Climate Research* Vol. 12: 223–230
- 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.
- CHANDLER, D.G. **2006**. Reversibility of forest conversion impacts on water budgets in tropical karst terrain. *Forest Ecology and Management* 224 95-103
- CHAPPEL, N.A, TYCH, W., BONELL, M. **2007**. Development of the *forSIM* model to quantify positive and negative hydrological impacts of tropical reforestation. *Forest Ecology and Management* 251 52-64
- CHAZDON, R.L. **2003**. Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. Urban

& Fischer Verlag Vol. 6/1,2. 51–71

- CHEN, H., GUO, S., XU, C., SINGH, V.P. **2007**. Historical temporal trends of hydroclimatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resources management in the Hanjiang basin. *Journal of Hydrology* 344, 171–184
- CHINEA, D.J. **2002**. Tropical forest succession on abandoned farms in the Humacao Municipality of eastern Puerto Rico. *Forest Ecology and Management* 167 195–207
- CHINEA, D.J., HELMER, E.H. **2003**. Diversity and Composition of Tropical Secondary forest recovering from large-scale clearing: results from 1990 inventory in Puerto Rico. *Forest Ecology and Management* 180 227–240
- CHRYSOULASKIS, N., PROEDROU, M., CARTALIS, C. **2001**. Variations and trends in annual and seasonal means of precipitable water in Greece as deduced from radiosonde measurements. *Toxicol. and Environ. Chem.*, Vol. 84, No. 1–4 pp. 1–6
- COSANDEY, C., ANDRÉASSIAN, V., MARTIN, C., DIDON-LESCOT, J.F., LAVABRE, J., FOLTON, N., MATHYS, N., RICHARD, D. **2005**. The hydrological impact of the mediterranean forest: a review of French research. *Journal of Hydrology* 301 235–249.
- COSTA, M.H., BOTTA, A., CARDILLE, J.A. **2003**. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology* 283 206–217.
- CRUZ BAEZ, A. D., GUILBE, C. J., Y LOPEZ A. R. **2002**. *Vive la Geografía de Nuestro Puerto Rico*. Editorial Cordillera. 238pp.
- CRÚZ BÁEZ, A. **2006**. *Introducción a la Estadística Elemental para Geografía*. Departamento de Geografía, Colegio de Ciencias Sociales. Universidad de Puerto Rico-Río Piedras. 159pp.
- CUADRAT, J. M. Y PITA, M. A. **2004**. *Climatología*. Ediciones Cátedra, Grupo Anaya, S.A. 496pp.
- DALEY, B. **2009**. Forest, Agriculture and Development in a Changing Landscape: Land-cover change analysis of St. Croix, USVI, using Landsat satellites from 1992–2002. *Technical Bulletin #13 from the University of the Virgin Islands Agricultural Experiment Station*.
- DEL RÍO, S., PENAS, A., FRAILE, R. **2005**. Analysis of recent variations in Castile and Leon (Spain). *Atmospheric Research* 73 69–85
- DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y AMBIENTALES (DRNA). **1999**. *Puerto Rico and the Sea*. 111pp.

- _____. **2003.** *Condición Hidrogeológica de los Acuíferos de la Región Sur de Puerto Rico y Estrategias para su restauración.* Oficina del Plan de Agua. Preparado por: Quiñones F. y Torres González, S. 52pp
- _____. **2004a.** *Características y Condición de los embalses Principales en Puerto Rico.* Oficina del Plan de Agua. Preparado por: Ortiz Zayas, J., Quiñones, F., Palacios, S., Vélez, A. y Mas, H. 191pp
- _____. **2004b.** *Condiciones Hidrogeológicas y Estrategias para la Protección de los Acuíferos Superior e Inferior de la Región Norte de Puerto Rico.* Oficina del Plan de Agua. Preparado por: Torres González, S., Liberatore, N. y Gómez Gómez, F. 45pp
- _____. **2005a.** *Estudio sobre el Uso de Agua Agrícola en Puerto Rico. Plan Integral de Conservación, Desarrollo y Uso de los Recursos de Agua de Puerto Rico.* En cooperación con: Instituto de Investigación sobre Recursos Agua y el Ambiente de Puerto Rico, Universidad de Mayagüez y DRNA. 93pp
- _____. **2005b.** *Inventario Recursos de Agua de Puerto Rico, Borrador.* Oficina del Plan de Agua. 337pp.
- _____. **2007.** *Plan Integral de Recursos de Agua.* Oficina del Plan de Agua. 347pp
- DIOP, S. ET REKACEWICZ, P. **2007.** *Atlas mundial de l'eau. Une pénurie annoncée.* Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). 63pp.
- DOMINGO, F., VILLAGARCIA, L. y WERE, A. **2002.** ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución. *Ecosistemas, Revista científica y técnica de ecología y medioambiente.* Año XII, N°1/2003. 15pp.
- DONG, P. **2008.** Generating and updating multiplicatively weighted Voronoi diagrams for point, line and polygon features in GIS. *Computers & Geosciences* 34 411–421
- EMERTON, L. **2003.** La valoración de los bosques tropicales. ¿Ha sido todo en vano? *XII Congreso Forestal Mundial. Quebec, Canadá.*
- ERAZO CHICA, A. M. **2006.** *Variaciones hidroclimáticas o evidencias de cambio climático en El Salvador.* Servicio Nacional de Estudios Territoriales. SNET 14 pp
- EWEL, J.J., WITHMORE, J.L. **1973.** The ecological life zones of Puerto Rico and the US Virgin Islands. *Forest Service Research Paper ITF-18.* Institute of Tropical Forestry. Rio Piedras, Puerto Rico. US Department of Agriculture. 74 pp.
- EZBER, Y., SEN, O.L., KINDAP, T., KARAKA, M. **2007.** Climatic effects of urbanization in Istanbul: a statistical and modeling analysis. *International Journal of Climatology.* 27: 667–679

- FERANEC, J., HAZEU, G., CHRISTENSEN, S., JAFFRAIN, G. **2007**. Corine land cover change detection in Europe (case studies of the Netherlands and Slovakia) *Land use Policy* 24 234-247.
- FINEGAN, B. **1999**. Pattern and process IN neotropicals secondary rain forest: the first 100 years of succession. *Tree* Volume 11, no.3
- FU, B.J, ZHAO, W.W., CHEN, L.D. **2005**. Eco-hydrological effects of landscape pattern change. *Landscape Ecol. Eng.* 1; 25-32. DOI 10.1007/s11355-005-0001-5.
- GALLART, F., LLORENS, P. **2003**. Land Cover Change and Water Resources in the Headwaters of the Ebro Catchment. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, 07101
- GALLART, F., LLORENS, P. **2004**. Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula. *Physics and Chemistry of the Earth* 29 769-773
- GALLO, K.P., OWEN, T.W., EASTERNLING, D.R. **1999**. Temperature Trends of the U.S. Historical Climatology Network Based on Satellite-Designated Land Use/Land Cover. *Journal of Climate* Volume 12, 1344-1348.
- GARBRECHT, J., VAN LIEW, M., BROWN, G.O. **2004**. Trends in Precipitation, Streamow, and Evapotranspiration in the Great Plains of the United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 9, No. 5
- GARCÍA RUÍZ J. M., BERGUERÍA PORTUGUÉS, S., LOPEZ MORENO, J. I., LORENTE GRIMA, A. Y SEEGER, M. **2001**. *Los Recursos Hídricos superficiales del Pirineo Aragonés y su Evolución Reciente*. Geoformas Ediciones. 192pp
- GEIST, H.J., LAMBIN, E.F. **2001**. What drives tropical deforestation? A Meta-Analysis of Proximate and Underlying Causes of Deforestation Based of Subnational Case Study Evidence. *LUCC International Project Office, University of Louvain, Belgium*. LUCC Report Series N°4. 136pp.
- GENERALITAT DE CATALUNYA: DEPARTAMENT DE MEDI AMBIENT I HABITAGE. **2005**. *Caracterización de masas de agua y análisis del Riesgo de Incumplimiento de los objetivos de la Directiva Marco de Agua (2000/60/CE) en las cuencas internas de Cataluña*
- GERMER, S., NEILL, C., VETTER, T., CHAVES, J., KRUSCHE, A.V., ELSENBEER, H. **2009**. Implications of long-term land-use change for hydrology and solute budgets of small catchments in Amazonia. *Journal of Hydrology* 364 349–363
- GERSTENGERBE, F.H. Y WERNER, P.C. **1999**. Estimation of the beginnings and end of recurrent events within a climate regime. *Climate Research*, Vol. 11:97-107,
- GIANNINI, A., KUSHNIR, Y., CANE, M.A. **2000**. Interannual Variability of Caribbean Rainfall, ENSO, and the Atlantic Ocean. *Journal of Climate* Volume 13, 297-311.

- GIERTZ, S., JUNGE, B., DIEKKRÜGER, B. **2005**. Assessing the effects of land use change on soil physical properties and hydrological processes in the sub-humid tropical environment of West Africa. *Physics and Chemistry of the Earth* 30 485-496
- GONZÁLEZ HIDALGO, J. C., VICENTE, S. M., DE LUIS, M., ŠTĚPÁNEK, P., CUADRAT, J. M., RAVENTÓS, J. Y SÁNCHEZ MONTAHUD, J. R. **2002a**. *Reconstrucción de registros pluviales y creación de una base de datos mensuales en la vertiente mediterránea española. 10pp*
- GONZÁLEZ HIDALGO, J. C., VICENTE, S. M., DE LUIS, M., ŠTĚPÁNEK, P., CUADRAT, J. M. Y RAVENTÓS, J. **2002b**. Reconstrucción estabilidad y Proceso de homogeneizado de series de precipitación en ambientes de elevada variabilidad pluvial. *VII Reunión Nacional de Climatología. Grupo de Clima de la Asociación de Geógrafos Españoles. Albarracín 11pp*
- GRAU, H.R., AIDE, T.M., ZIMMERMAN, J.K., THOMLINSON, J.R., HELMER, E., ZOU, X. **2003**. The Ecological Consequences of Socioeconomic and Land-Use Changes in Postagriculture Puerto Rico. *BioScience* Vol. 53 No. 12 1159-1168.
- GUARDIOLA ORTÍZ, D. **2006**. *El trabajo social en el Caribe Hispano Antillano. El contexto regional: una perspectiva crítica comparativa. Vol. 1. Editorial Universidad de Puerto Rico. 230pp*
- GUARIGUATA, M.R., OSTERTAG, R. **2001**. Neotropical secondary forest succession: changes structural and functional characteristics *Forest Ecology and Management* 148 (2001) 185-206.
- GUIJARRO, J. A. **2004**. *Tendencias de la precipitación en el Litoral Mediterráneo español. Instituto Nacional de Meteorología, C. Met. En Illes Balears, Palma de Mca. 10pp*
- GUO, H., HU, B., JIANG, T. **2008**. Annual and seasonal streamflow response to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. *Journal of Hydrology* (2008) 355, 106-122
- HAMED, K. H. **2007**. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology* 349, 350-363.
- HARMSSEN, E.W., MILLER, N.L, SCHLEGEL, N.J., GONZALEZ, J.E. **2009**. Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico. *Agricultural Water Management* 96 1085-1095
- HELMER, E.H. **2004**. Forest conservation and land development in Puerto Rico. *Landscape Ecology* **19**: 29-40
- HELMER, E.H., RAMOS, O., LOPEZ, T DEL M., QUIÑONES, M., DIAZ, W. **2002**. Mapping the Forest Type and Land cover of Puerto Rico, a Component of the Caribbean Biodiversity Hotspot. *Caribbean Journal of Science*, Vol. 38, N° 3-4, 165-183

- HERRADOR VALENCIA, D., JUNCÀ, M.B., VARGA LINDE, D., MENDIZÁBAL RIERA, E. **2010**. Tropical forest recovery and socio-economic change in El Salvador: An opportunity for the introduction of new approaches to biodiversity protection. *Applied Geography* xxx 1e10
- HERRERA-MONTES, A., BROKAW, N. **2010**. Conservation value of a tropical secondary forest: A herpetofaunal perspective. *Biological Conservation* 143 1414–1422
- HOLDER, C.D. **2004**. Rainfall interception and precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. *Forest Ecology and Management* 190 373-384
- HOLWERDA, F., BRUIJNZEEL, L.A., MUÑOZ-VILLERS, L.E., EQUIHUA, M., ASBJORNSEN, H. **2010**. Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forest of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology* 384 84-96
- HULME, M y SHEARD, N. **1999**. *Escenario de Cambio Climático para Mesoamerica*. Unidad de Investigación Climática, Norwich, Reino Unido, 6pp
- IMUS, H.R. **1955**. The Coffee Industry of the Western Highlands. *Symposium on the Geography of Puerto Rico*. Eds. Jones, C.F., Picó, R. University of Puerto Rico Press. Río Piedras, P.R.
- 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.
- _____. **2000a**. Landuse, Landuse-change and Forestry. *IPCC Special Report* 30pp.
- _____. **2007**. Climate Change 2007. *Four Assessment Report: Synthesis Report*. 52pp
- _____. **2007a**. Climate Change 2007. Working Group I Report. “*The Physical Science Basis*” 978 0521 70596-7 Paperback. Edited By: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., LeRoy Miller and H., Chen, Z. 996pp
- _____. **2007b**. 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
- ITTO (INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION). **2002**. ITTO guidelines for the restoration, management and rehabilitation of degraded and secondary tropical forests. *ITTO Policy Development Series* No 13. In collaboration with the Center for International Forestry Research (CIFOR), the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), the World Conservation Union (IUCN) and the World Wide Fund for Nature (WWF) International

- ITURRALDE VINENT, M Y GAHAGAN, L. **2000**. Caribbean Plate Tectonics: Discrepancies and Similarities among Tectonics Models. *31 International Geological Congress Symposium* 17-6.
- ITURRALDE VINENT, M. **2005**. La Paleogeografía en el Caribe y sus implicaciones para la biogeografía histórica. *Revista del Jardín Botánico Nacional*, 25-26: 49-78, 2004-2005. Museo Nacional de Historia Natural, Cuba
- ITURRALDE VINENT, M. **2006**. The Debate over the Plate Tectonic Evolution of the Caribbean. *Geophysical Research Abstract*, Vol. 8, 00026
- IZHE, M. **1995**. Swedish agricultural landscape-patterns and changes during the last 50 years, studied by aerial photos. *Landscape and Urban Planning* 31 21-37
- JAMES, K. H. **2002**. A simple synthesis of the Caribbean Geology. *Caribbean Plate Model*. 17pp
- JAMES, K. H. **2006**. Arguments for and the Pacific origin of the Caribbean Plate: discussion, finding for an inter-American origin. *Geologica Acta*, Vol. 4, N° 1-2, 2006, 279-302.
- JIA, X., RICHARDS, A.J. **1994**. Efficient Maximun Likelihood Classification for Imaging Spectrometer Data Sets. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, Vol. 32 N°2.
- JUNTA DE CALIDAD AMBIENTAL **2005**. *Informe sobre el Estado y Condición del Ambiente en Puerto Rico 2005*. 353pp
- JUNTA DE PLANIFICACIÓN. OFICINA DEL PLAN DE USO DE TERRENOS DE PUERTO RICO. **2006**. *Plan de Uso de Terrenos de Puerto Rico. Perfil Regional de Puerto Rico. Borrador preliminar*. 138pp
- _____. **2006a**. *Plan de Uso de Terrenos de Puerto Rico. Perfil Regional, Región Norte. Borrador preliminar*. 81pp
- _____. **2006b**. *Plan de Uso de Terrenos de Puerto Rico. Perfil Regional, Región Central. Borrador preliminar*. 64pp
- KADIOĞLU, M. **1997**. Trends in air temperature data over Turkey. *International Journal of Climatology* VOL. 17, 511–520 (1997)
- KENAWAY, T., HELMER, E.H. **2007**. The Forest Types and Ages Cleared for Land Development in Puerto Rico. *GIScience & Remote Sensing*, 44, No. 4, 356–382
- KRAKAUER, N. Y. AND FUNG, I. **2008**. Is streamflow increasing? Trends in the coterminous United States. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*. 5, 785-810

- KRISHNAKUMAR, K.N., PRASADA RAO, G.S.L.H.V., GOPAKUMAR, C.S. **2009**. Rainfall trends in twentieth century over Kerala, India. *Atmospheric Environment* 43 1940–1944.
- KUEMMERLE, T., RADELOFF, V.C., PERZANOWSKI, K., HOSTERT, P. **2006**. Cross-border comparison of land cover and landscape pattern in Eastern Europe using a hybrid classification technique. *Remote Sensing of Environment* 103 449–464
- KUMAR, M., DUFFY, C.J. **2009**. Detecting Hydroclimatic Change Using Spatio-Temporal Analysis of Time Series in Colorado River Basin. *Journal of Hydrology* 03.039
- LE TELLIER, V., CARRASCO, A., ASQUITH, N. **2009**. Attempts to determine the effects of forest cover on stream flow by direct hydrological measurements in Los Negros, Bolivia. *Forest Ecology and Management* 258 1881-1888
- LEBEL, T., ALI, A. **2009**. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Journal of Hydrology* 375 52–64.
- LEGESSE, D., VALLET-COULOMB, C., GASSE, F. **2003**. Hydrological response of a catchment to climate and land use change in Tropical Africa: a case study South Central Ethiopia *Journal of Hydrology* 275 67-85
- LEOPOLDO, P.R., FRANKEN, W.K., VILLA NOVA, N.A. **1995**. Real evapotranspiration and transpiration through a tropical rain forest in central Amazonian as estimated by water balance method. *Forest Ecology and Management* 73 185-195.
- LIPOWEZKY, U. **2006**. Grayscale aerial and space image colorization using texture classification. *Pattern Recognition Letters* 27 275–286
- LI, K.Y., COE, M.T., RAMANKUTTY, N., DE JONG, R. **2007**. Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. *Journal of Hydrology* 337, 258-268.
- LI, L.J., ZHANG, L., WANG, H., WANG, J., YANG, J.W., JIANG, D.J., LI, J.Y. y QIN, D.Y. **2007**. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River Basin in China. *Hydrological Processes* 21, 3485-3491. DOI 10.1002/hyp.6485.
- LIANG, A.G. **2004**. Cases of Heavy Precipitation and Flash Floods in the Caribbean during El Niño Winters. *Journal of Hydrometeorology* Volume 5, 577-594.
- LINS, H.R., SLACK, J.R. **1999**. Streamflow trends in the United States. *Geophysical Research Letters*, Volume 26 NO. 2, 227-230.
- LLOBELL, J.P., GARCIA PEREZ, J.F. y FRIAS NAVARRO, M^a, D. **2000**. Significación estadística, importancia del efecto y replicabilidad de los datos. *Psicothema* 2000. Vol. 12, Supl. n° 2, pp. 408-412.

- LOPEZ, T.M., AIDE, M., THOMLINSON, J.R. **2001**. Urban Expansion and the Loss of Prime Agricultural Lands in Puerto Rico. *Ambio* Vol. 30 No. 1
- LOPEZ GARCÍA, M.J., CAMARASA BELMONTE, A.M., MATEU BELLÉS, J.F. **2007**. Cambios en los usos del suelo y la producción de escorrentía en ramblas mediterráneas: Carraixet y Poyo (1956-1998). *Boletín de la A.G.E.* N.º 44 - págs. 69-94
- LOPEZ MARRERO, T. M. Y VILLANUEVA COLÓN, N. **2006**. *Atlas Ambiental de Puerto Rico*. Editorial Universidad de Puerto Rico. 160pp.
- LUGO, A., WAIDE, R.B. **1993**. Catastrophic and background disturbance of tropical ecosystems at the Luquillo Experimental Forest. *Journal of Biosciences* Volume 18, Number 4, 475-481
- LUGO, A., HELMER, E. **2004**. Emerging Forest on abandoned land: Puerto Rico's new forest. *Forest Ecology and Management* 190 145-161
- LUO, Y., LIU, S., FU, S., LIU, J., GUANG, G., and ZHOU, G. **2007**. Trends of precipitation in Beijiang River Basins, Guangdong Province, China. *Hydrological Process. Wiley InterSciences*. Doi: 10.1002/hyp. 6801.
- MAGALHÃES, L.A. **2009**. *Evolución Climatico-hidrologica reciente y cambios en los usos del suelo en diversas cuencas de cabecera de los ríos Duero y Tajo*. Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Salamanca, España. 332pp.
- MAGAÑA, V.O. y GAY GARCÍA, C. **2000**. *Vulnerabilidad y adaptación regional ante el Cambio Climático y su impacto ambiental, social y económico*. Estudio realizado por: Instituto Nacional de Ecología y el Centro de Ciencias del Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México. 27pp.
- MARCANO-VEGA, H., AIDE, M.T., BAÉZ, D. **2002**. Forest regeneration in abandoned coffee plantations and pastures in the Cordillera Central of Puerto Rico. *Plant Ecology* 161, 75-87
- MARTIN, P.H., SHERMAN, R.E., FAHEY, T.J. **2004**. Forty Years of Tropical Forest Recovery from Agriculture: Structure and Floristics of Secondary and Old-growth Riparian Forests in the Dominican Republic. *Biotropica* 36(3): 297-317
- MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., CEBALLOS BARBANCHO, A., HERNÁNDEZ-SANTANA, V., CASADO LEDESMA, S., MORÁN-TEJADA, C. **2005**. Procesos hidrológicos en una cuenca forestal del Sistema Central: Cuenca Experimental de Rinconada. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 2005 N° 31 pp. 7-25 ISSN 0211-6820
- MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J. (en prensa). Cambios en la cubierta vegetal y recursos hídricos: un análisis de la interceptación en la Cuenca del Duero. *Congreso Homenaje al Duero/Douro y sus ríos: Memoria, cultura y provenir*. Zamora.

- MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., CANO, A., HERNÁNDEZ-SANTANA, V., MORÁN, C. **2007**. Evolución de la humedad del suelo en diferentes tipos de cubierta vegetal en la cuenca del Duero. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VIII. J.V. Giráldez Cervera y F.J. Jiménez Hornero*
- MARTÍN-VIDE, J., CALBÓ, J. Y SANCHÉZ-LORENZO, A. **2006**. *Tendencias recientes de la insolación en la España peninsular y Baleares (1971-2000)*. 5ta Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica.
- MARTINUZZI, S., GOULD, W.A., RAMOS GONZALEZ, O.M. **2007**. Land development, land use, and urban sprawl in Puerto Rico integrating remote sensing and population census data. *Landscape and Urban Planning* 79 (2007) 288-297
- MARTIS, A., VAN OLDENBORGH, G.J., BURGERS, G. **2001**. Predicting rainfall in the Dutch Caribbean | more than El Niño?. *Meteorological Service Netherlands Antilles, Seru Mahuma z/n, Curacao KNMI, P. O. Box 201, NL-3730 AE De Bilt, The Netherlands*. 22p.
- MAZA, J., FERNANDEZ, P., VARGAS, A., FORNERO, L., TRIPODI, D., YAÑEZ, NUÑEZ, M. **1995**. Estudios hidrológicos e hidráulicos para el ordenamiento territorial de una cuenca. *Ingeniería del Agua*. Vol. 2 Num. 1, 31-44.
- 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. *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.
- MIRÓN PÉREZ, I. J., MONTERO RUBIO, J. C., CRIADO ALVAREZ, J. J., GUTIERREZ ÁVILA, G., PAREDES BEATO, D., MAYORAL ARENAS, S., LINARES GIL, C. **2006**. Tratamiento y estudio de serie de temperaturas para su aplicación en salud pública. El caso de Castilla y la Mancha. *Rev. Esp. N° 2 Salud Pública*, 2006; 80: 113-124.
- MOLINA, A., GOVERS, G., VANACKER, V., POESEN, J., ZEELMAEKERS, E., CISNEROS, F. **2007**. Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use. *Catena* 71 357-370
- MOLNÁR, P., RAMÍREZ, J.A. **2001**. Recent Trends in Precipitation and Streamflow in the Rio Puerco Basin. *Journal of Climate*. Volume 14, 2317-2328.
- MONROE, W.H. **1969**. Geologic Map of the Aguadilla Quadrangle, Puerto Rico. US Geological Survey. Prepared in cooperation with The Commonwealth of Puerto Rico, Economic Development Administration. Industrial Research Department.

- MORELOCK J. RAMIREZ, W y BARRETO, M. **2003**. *The World's Coasts: ONLINE-Puerto Rico*. 26 pp
- MURPHY L.S. **1916**. *Forest of Puerto Rico, past, present and future*. US Department of Agriculture. Bulletin No. 354 Washington. 99pp
- NALEY, D.F. **1955**. Land Use in Guánica, Yauco, Guayanilla, and Peñuelas. *Symposium on the Geography of Puerto Rico*. Eds. Jones, C.F., Picó, R. University of Puerto Rico Press. Río Piedras, P.R. 305pp
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **2002**. *Climatology of the United States No. 81. Monthly Station Normal of Temperature, Precipitation, and Heating and Cooling Degree Days, 1971-2000. 66 Puerto Rico*. 13pp.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES (NRCNA). **2008**. *Hydrologic Effects of a Changing Forest Landscape* Ed: The National Acadmies Press 500 Fifth Street, N.W. Washington, DC 20001. ISBN 13-978-0-309-12108-8. 168pp.
- NEELIN, J. D., MÜNICH, M., SU, H., MEYERSON, J. E. AND HOLLOWAY, C. E. **2006**. Tropical drying trends in global warming models and observations. *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.
- NEGOCIADO DEL CENSO DE LOS EEUU. (NCEEUU). **2000**. *Perfiles de Características Demográficas Generales. Censo 2000 Puerto Rico*. 320pp
- _____. BUREAU OF THE CENSUS. **1913**. *Thirteenth Census of the United States taken in the year 1910. Volume VII. Agriculture 1909 1910, Reports by States, with statistics for counties. Nebraska-Wyoming, Alaska, Hawaii and Porto Rico*. 10pp.
- _____. ECONOMICS AND STATISTICS ADMINISTRATION. BUREAU OF THE CENSUS. **1992**. *1992 Census of Agriculture. Volume 1, Geographic Area Series. Part 52 Puerto Rico*. AC92-A-52. 270pp.
- _____. ECONOMICS AND STATISTICS ADMINISTRATION. BUREAU OF THE CENSUS. **2004**. *2002 Census of Agriculture. Puerto Rico, Volume 1 Geographic Area Series Part 52*. AC-02-A-52. 302pp.
- NIANG, A.J., OZER, A., OZER, P. **2008**. Fifty years of landscape evolution in Southwestern Mauritania by means of aerial photos. *Journal of Arid Environments* 72 97-107.
- NIEHOFF, D., FRITSCH, U., BRONSTERT, A. **2002**. Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. *Journal of Hydrology* 267 80-93

- LOUDIN, L., ANDRÉASSIAN, V., LERAT, J., MICHEL, C. **2008**. Has land cover a significant impact on mean annual streamflow? An international assessment using 1508 catchments. *Journal of Hydrology* 357, 303– 316
- PAGANO, T., GAREN, D. **2005**. A Recent Increase in Western U.S. Streamflow Variability and Persistence. *Journal of Hydrometeorology* Volume 6, 173-179.
- PARTAL, T., KAHYA, E. **2006**. Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes* 20, 2011–2026
- PASCARELLA, J.B., AIDE, T.M., SERRANO, M.I., ZIMMERMAN, J.K. **2000**. Land-Use History and Forest Regeneration in the Cayey Mountains, Puerto Rico. *Ecosystems* 3: 217-228. DOI: 10: 1007/s100210000021
- PASCARELLA, J.B., AIDE, T.M., ZIMMERMAN, J.K. **2004**. Short-term response of secondary forest to hurricane disturbance in Puerto Rico, USA. *Forest Ecology and Management* 199 379–393
- PÉREZ SUÁREZ, R., VEGA GONZÁLEZ, R. Y LIMIA MARTÍNEZ, M. **2000**. *Los ciclones tropicales que han afectado a las provincias de Ciudad de la Habana y la Habana*. Instituto de Meteorología. Agencia del Medio Ambiente. CITMA. 9 pp.
- 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. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, NO. D21, 4106
- PINARD, M.A., BARKER, M.G., TAY, J. **2000**. Soil disturbance and post-logging forest recovery on bulldozer paths in Sabah, Malaysia. *Forest Ecology and Management* 130 213±225
- PNUMA: OFICINA REGIONAL PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE, SEMARNAT. **2006**. *El Cambio Climático en América Latina y El Caribe*. ISBN 968-817-677-X. 126pp.
- PRABHAKARA RAO, P., RAJUAND, K.C.C., KAREEMUDDIN, M.D. **1982**. Application of photo-interpretation and remote sensing techniques for integrated survey of Anantapur District, Andhra Pradesh. *Journal Ind. Soc. Photo-int. 8-Remote Sensing*, Vol. 10, No. 2
- PROISY, C., COUTERON, P., FROMARD, F. **2007**. Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images. *Remote Sensing of Environment* 109 379–392
- QUEREDA, J., MONTÓN, E., ESCRIG, J., RUESCAS, A. Y MOLLÁ, B. **2004**. Evolución del vapor de agua en la interface atmosfera-mar del sureste español. *Investigaciones Geográficas* nº 33. ISSN-0213-4619.

- RAMOS CALZADO, P., GÓMEZ CAMACHO, J., PÉREZ BERNAL, F. Y PITA LÓPEZ, M. F. **2008**. A novel approach to precipitation series completion in climatological datasets: application to Andalusia. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.1657.
- RIVERA, L.W., AIDE, M.T. **1998**. Forest Recovery in karst region of Puerto Rico. *Forest Ecology and Management* 108 _1998. 63–75
- RIVERA, L.W., ZIMMERMAN, J.K., AIDE, T.M. **2000**. Forest recovery in abandoned agricultural lands in a karst region of the Dominican Republic. *Plant Ecology* 148, 115-125.
- ROCCHINI, D., DI RITA, A. **2005**. Relief effects on aerial photos geometric correction. *Applied Geography* 25 159-168.
- ROPELEWSKI, C.F., HALPERT, M.S. **1987**. Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* Volume 115, 1606-1626.
- RUBIERA TORRES, J. M., BALLESTER PÉREZ, M. Y GARCÍA CONCEPCIÓN, O. **1998**. *Temporada Ciclónica de 1997 en el Atlántico Norte*. Instituto de Meteorología. Agencia del Medio Ambiente de la República de Cuba. CITMA. 11pp.
- RUIZ, L., VARMA, M.R.R., MOHAN-KUMAR, M.S., SEKHAR, M., MARÉCHAL, J.C., DESCLOITRES, M., RIOTTE, J., KUMAR, S., KUMAR, C., BRAUN, J.J. **2010**. Water balance modelling in a tropical watershed under deciduous forest (Mule Hole, India): Regolith matrix storage buffers the groundwater recharge process. *Journal of Hydrology* 380 460-472
- 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.
- SARRIA CASTRO, M., SILVA AYÇAGUER LC. **2004**. Las pruebas de significación estadística en tres revistas biomédicas: una revisión crítica. *Rev. Panam Salud Pública*. 15 (5): 300-6
- SASAKI, N., YOSHIMOTO, A. **2010**. Benefits of tropical forest management under the new climate change agreement—a case study in Cambodia. *Environmental Sciences and Policy* 13 384–392
- SCHELLEKENS, J., SCATENA, F.N., BRUIJNZEEL, L.A., WICKEL, A.J. **1999**. Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *Journal of Hydrology* 225 168-184.
- SCHERER, R., PIKE, R.G. **2003**. *Effects of Forest Management Activities on Streamflow in the Okanagan Basin: Outcomes of a Literature Review and a*

- Workshop*. Forest Research Extension Partnership (FORREX), Kamloops, B.C. FORREX Series 9. ISBN 1-894822-12-9. 52pp
- SEGUINOT BARBOSA, J. **1994**. *Geografía, Ecología y Derecho de Puerto Rico y el Caribe (Serie de Ensayos)*. Ed. First Book Publishing of Puerto Rico. 183pp.
- _____. **2005**. *Medio Ambiente, cultura y salud en el Caribe Contemporáneo*. Ed. GEO. 255pp.
- SHUKLA, J., NOBRE, C, SELLERS, P. **1990**. Amazon Deforestation and Climate Change. *Sciences Magazine* Vol. 247. 4pp.
- SILLE PUELLO, J. **2006**. Evaluación científica de los riesgos asociados a la ocurrencia de la sequía meteorológica en República Dominicana. *Jornadas Iberoamericanas en sobre inundaciones y desastres naturales*. Antigua 5-9 de julio
- SINGH, B. **1997**. Climate-related global changes in the southern Caribbean: Trinidad and Tobago. *Global and Planetary Change* 15 93-111
- SIRIWARDENA, L., FINLAYSON, B.L., McMAHON, T.A. **2006**. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. *Journal of Hydrology* 326 199-214.
- SKALOŠ, J., ENGSTOVÁ, B. **2010**. Methodology for mapping non-forest wood elements using historic cadastral maps and aerial photographs as a basis for management. *Journal of Environmental Management* 91 831-843
- SMADI, M.M., ZGHOUL, A. **2006**. A Sudden Change in Rainfall Characteristics in Amman, Jordan during the Mid 1950s. *American Journal of Environmental Sciences* 2 (3): 84-91
- STEINIGER, S., HAY, G. **2009**. Free and open source geographic information tools for landscape ecology. *Ecological Informatics* 4 183–195
- STRAND, G.H., DRAMSTAD, W., ENGAN, G. **2002**. The effect of field experience on the accuracy of identifying land cover types in aerial photographs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4 137–146
- TANAKA, N., KUME, T., YOSHIFUJI, N., TANAKA, K., TAKIZAWA, H., SHIRAKI, K., TANTASIRIN, C., TANGTHAM, N., SUZUKI, M. **2008**. A review of evapotranspiration estimates from tropical forest in Thailand and adjacent regions. *Agricultural and Forest Meteorology* 148 807-819.
- TAYANÇ, M., TORO, H. **1997**. Urbanization Effects on Regional Climate Change in the case of four large cities of Turkey. *Climatic Change* 35: 501–524
- THIESSEN, A.H., ALTER, J.C. **1911**. Climatological data for july 1911. *Monthly Weather Review*. Vol. 39. District No. 10, Great Basin

- THOMLINSON, J.R., SERRANO, M.I., LOPEZ, T.M., AIDE, T.M., ZIMMERMAN, J.K. **1996**. Land-Use dynamics in Post-Agricultural Puerto Rican Landscape (1936-1988). *Biotropica* 28(4a): 525-536
- TOBISCH, O.T. and TURNER, M.D. **1971**. *Geologic Map of the San Sebastián Quadrangle, Puerto Rico*. US Geological Survey. Prepared in cooperation with The Commonwealth of Puerto Rico, Economic Development Administration. Industrial Research Department.
- TOMER, M.D., SCHILLING, K.E. **2009**. A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology. *Journal of Hydrology* 376 24-33.
- TU, J. **2009**. Combined impact of climate and land use changes on streamflow and water quality in eastern Massachusetts, USA. *Journal of Hydrology* 379 268-283
- US DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **1977**. *Soil Survey of the Humacao Area Eastern Puerto Rico*. In cooperation with the University of Puerto Rico College of Agricultural Sciences. 103pp.
- _____. **1982**. *Soil survey of Arecibo Area Northern Puerto Rico*. In cooperation with the University of Puerto Rico College of Agricultural Sciences. 169pp.
- _____. **1975**. *Soil survey of Mayaguez Area of Western Puerto Rico*. In cooperation with the University of Puerto Rico College of Agricultural Sciences. 296pp.
- _____. **1982**. *The Forest Resources of Puerto Rico*. Resource Bulletin SO-85. Prepared by: Birdsey, R.A., Weaver, P.L. 64pp.
- _____. **1992**. *1992 Census of Agriculture Volume 1 Geographic Area Series Part 52 Puerto Rico*. 270pp.
- _____. **1997**. *The Forest Resources of Puerto Rico, 1990*. Resource Bulletin SRS-22. Prepared by: Franco, P.A., Weaver, P.L., Eggen-McIntosh, S. 54pp.
- _____. **2002**. *Soil Survey of Caribbean National Forest and Luquillo Experimental Forest, Commonwealth of Puerto Rico*. In cooperation with the International Institute of Tropical Forestry and the University of Puerto Rico, Agricultural Experiments Stations. 182pp.
- _____. **2007**. *Census of Agriculture. Municipio Profile. Fajardo, Puerto Rico*. 2pp.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **1978**. *Hydrogeology of the Karst of Puerto Rico*. Paper 1012. By: Giusti, E.V. 64pp.
- _____. **1996**. *Atlas of Ground Water in Puerto Rico and the US Virgin Islands*. Water Resources Investigation Report 94-4198. Prepared in cooperation with the

US Environmental Protection Agency (EPA). By: Veve, T.D. and Taggart, B.E. (editors). 161pp.

_____. **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. 33pp.

_____. **2002a**. *Geology and Hydrogeology of the Caribbean Islands Aquifer System of the Commonwealth of Puerto Rico and the US Virgin Islands*. Professional Paper 1419. By: Renken, R.A., Ward, W.C., Gill, I.P., Gómez Gómez, F. and Rodríguez Martínez, J. 148pp.

_____. **2002b**. *Ground Water Resources Assessment in the Rio Grande de Manati Alluvial Plain, Rio Arriba Saliente Area, Puerto Rico*. Water Resources Investigation Report 02-4132. Prepared in cooperation with the Municipality of Manati, Office of the Mayor. By: Torres González, S., Gómez Gómez, F. and Warne, A. G. 43pp.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). OFFICE OF ENVIRONMENTAL INFORMATION WASHINGTON. **2006**. *Data Quality Assessment: Statistical Methods for Practitioners*. EPA QA/G-9S. EPA/240/B-06/003. February 2006. 198pp.

VAN DO, T., OSAWA, A., TOAN-THANG, N. **2010**. Recovery process of a mountain forest after shifting cultivation in Northwestern Vietnam. *Forest Ecology and Management* 259 (2010) 1650–1659

VAN GESTEL, J. P., MANN, P., GRINDLAY, N., R. AND DOLA, J. F. **1999**. Three-phase tectonic evolution of the northern margin of Puerto Rico as inferred from an integration of a seismic reflection, well and outcrop data. *International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics*. Marine Geology 161 257-286.

VELÁZQUEZ-LOZADA, A., GONZÁLEZ, J.E., WINTER, A. **2006**. Urban heat island effect analysis for San Juan, Puerto Rico. *Atmospheric Environment* 40 1731–1741

VOSE, R.S., EASTERLING, D.R., GLEASON, B. **2005**. Maximum and minimum temperature trends for the globe: An update through 2004. *Geophysical Research Letters* Volume 32, L23822, doi:10.1029/2005GL024379

WADE, T.G., WICKHAM, J.D., ZACARELLI, N., RIITERS, K.H. **2009**. A multi-scale method of mapping urban influence. *Environmental Modelling & Software* 24 1252–1256

WARDSWORTH, F.H. **1950**. Notes on the climax forests of Puerto Rico and their destruction and conservation prior 1900. *Caribbean Forester* 11 (1): 38-47

WEATHERHEAD, E.K., HOWDEN, N.J.K. **2009**. The relationship between land use and surface water resources in the UK. *Land Use and Policy* 26S S243-S250.

- WEAVER, P.L., BIRDSEY, L.A. **1990**. Growth of Secondary Forest in Puerto Rico Between 1980 and 1985. *Turrialba* Vol. 40, No. 1, 12-22
- WENJIE, L., PENGJU, L., HONGMEI, L., WENPING, D. **2006**. Estimation of evaporation rate from soil surface using stable isotopic composition of throughfall and stream water in a tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica* Volume 26, Issue 5 1303–1311
- XIONG, L., GUO, S. **2004**. Trends test and change-point detection for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang hydrological station. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 49(1) 99-112
- XU, Z.X., TAKEUCHI, K., ISHIDAIRA, H. **2003**. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation. *Journal of Hydrology* 279 144–150
- XU, Z., LIU, Z., FU, G., CHEN, Y. **2009**. Trends of major hydroclimatic variables in the Tarim River basin during the past 50 years. *Journal of Arid Environments* 1–12
- YEH, C.T., HUANG, S.L. **2009**. Investigating spatiotemporal patterns of landscape diversity in response to urbanization. *Landscape and Urban Planning*. 93 151–162
- YUE, S., PILON, P. AND CAVADIAS, G. **2001**. Power of Mann-Kendall and Spearman's rho test for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*. 259 254-271.
- ZANG, R., DING, Y. **2010**. Forest recovery on abandoned logging roads in a tropical montane rain forest of Hainan Island, China. *Acta Oecologica* 35 462–470
- ZIEGLER, A.D., GIAMBELLUCA, T.W., TRAN, L.T., VANA, T.T., NULLET, M.A., FOX, J., DUC VIEN, T., PINTHONG, J., MAXWELL, J.F., EVETT, S. **2004**. Hydrological Consequences of landscape fragmentation in mountains northern Vietnam: evidence of accelerate overland flow generation. *Journal of Hydrology* 287 124-146.
- ZU, X., ZUCCA, C.P., WAIDE, R.B., MCDOWELL, W.H. **1995**. Long-term influence of deforestation on trees species composition and litter dynamics of a tropical rain forest in Puerto Rico. *Forest Ecology and Management* 78 147-157

-Páginas Web Consultadas

DRNA (Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico)

<http://www.drna.gobierno.pr/>

Global Forum on Oceans, Coast and Islands

<http://www.globaloceans.org/>

Instituto de Meteorología de la República de Cuba

<http://www.met.inf.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=INICIAL>

Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de la República de Cuba

<http://www.hidro.cu/>

Intergovernmental Panel for Climate Change

<http://www.ipcc.ch/index.htm>

JCA (Junta de Calidad Ambiental del Estado Libre Asociado de Puerto Rico)

<http://www.gobierno.pr/JCA/Biblioteca/Publicaciones/InformaAmbiental2004>

JP (Junta de Planificación del Estado Libre Asociado de Puerto Rico)

<http://www.gobierno.pr/OPUT/Mapas/>

Sociedad Meteorológica de Cuba (SOMETCUBA)

<http://www.met.inf.cu/sometcuba/default.htm>

<http://www.redciencia.cu/cdorigen/arca/index.htm>

The Library of the Congress. American Memory

<http://memory.loc.gov/ammem/index.html>

UPRM (Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayagüez)

<http://www.uprm.edu/biology/profs/breckon/herbarium/desecheos.html>

http://ceterisparibus.uprm.edu/articulos/vol2/mercado_laboral.htm

<http://redsismica.uprm.edu/spanish/Noticias/mareografos.php>

US Census Bureau: American Fact Finder

http://factfinder.census.gov/servlet/GCTTable?_bm=y&-geo_id=04000US72&-

[_box_head_nbr=GCT-PH1&-ds_name=DEC_2000_SF1_U&-format=ST-2](http://factfinder.census.gov/servlet/GCTTable?_box_head_nbr=GCT-PH1&-ds_name=DEC_2000_SF1_U&-format=ST-2)

<http://www.census.gov/main/www/cen2000.html>

US Climate Change Science Program

<http://www.climatechange.gov/>

USDA (United States Department of Agriculture)

http://soils.usda.gov/survey/printed_surveys/state.asp?state=Puerto%20Rico&abbr=PR

<http://www.pr.nrcs.usda.gov/technical/plants/bosques.html>

USFWS (United States Fish and Wildlife Service)

http://www.fws.gov/caribbean-ecoteam/Espanol/index_ESP.html

USGS (United States Geological Survey) Puerto Rico and the US Virgin Islands

http://pr.water.usgs.gov/public/online_pubs/index.html
http://pr.water.usgs.gov/public/caribbean/abstracts_tectonics.html
http://vi.water.usgs.gov/public/science_plan/sp_all.html#WRM
<http://pubs.usgs.gov/wdr/>
<http://waterdata.usgs.gov/pr/nwis/rt>
http://water.usgs.gov/climate_water/

US NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration)

<http://www.magazine.noaa.gov/>
<http://www.srh.noaa.gov/sju/sitemap.html>
http://www.srh.noaa.gov/rfcshare/precip_download.php
<http://www.srh.noaa.gov/sju/climate.html>
<http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/03trench/welcome.html>
<http://www.weather.gov/ohd/hdsc/>
<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/globalwarming.html#Q3>

US The Southeast Regional Climate Center

http://www.sercc.com/climateinfo/historical/historical_pr.html

UNESCO Environment and Development in coastal regions and in Small Islands

<http://www.unesco.org/csi/pub/papers3/sande.htm>

United Nations Environmental Program (UNEP)

<http://www.unep.org/themes/climatechange/>

Otras

<http://luq.lternet.edu/>
<http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/faqs.html#3>
<http://www.globaloceans.org/>
<http://www.sidsnet.org/MIM/followup-caribbean.html>
http://ec.europa.eu/environment/nature/index_en.htm
<http://cobweb.ecn.purdue.edu/runoff/>
<http://www.photosofpuertorico.com/delayer/new.htm>
<http://www.solboricua.com/>
<http://www.ceducapr.com>
<http://www.cep.unep.org/marine-issues>
<http://www.gobierno.pr/gprportal/inicio>
<http://www.prma.com//AM/Template.cfm?Section=Home2&WebsiteKey=84444e96-45ad-4747-98f9-55f40ac40d82>
<http://www.pnas.org/>
<http://www.ig.utexas.edu/CaribPlate/CaribPlate.html>
<http://www.geologica-acta.com>
<http://www.hydrology-and-earth-system-sciences.net/index.html>
<http://www.ig.utexas.edu/research/projects/caribbean/region.htm#general>

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la temperatura global en los últimos 120 años. Fuente: NOAA	26
Figura 2. Tendencias anuales de la precipitación por regiones. Fuente IPCC, 2001.	27
Figura 3. Ciclo hidrológico generalizado. Fuente USGS.....	28
Figura 4. Interacción entre el agua y la cubierta vegetal.	29
Figura 5. Ejemplo de interacción agua y usos de suelo.	30
Figura 6. Mapa Región del Caribe.....	37
Figura 7. Mapa Político de Puerto Rico: 78 Municipios.....	39
Figura 8. Mapa Expansión Urbana de Puerto Rico	41
Figura 9. Porcentaje de sectores económicos de Puerto Rico en el año 2000	42
Figura 10. Regiones Climáticas de Puerto Rico. Fuente NOAA.	44
Figura 11. Comportamiento de la precipitación y la temperatura en Arecibo, Puerto Rico. Fuente: NOAA.	44
Figura 12. Relieve y Topografía de Puerto Rico.	46
Figura 13. Regiones geomorfológicas principales de Puerto Rico. Fuente: López Marrero y Villanueva Colón, 2006	48
Figura 14. Embalses de Puerto Rico 2000. Fuente Junta de Planificación 2004.	55
Figura 15 Ríos y Quebradas de Puerto Rico. Fuente Junta de Planificación 2004	55
Figura 16. Regiones hidrográficas y cuencas principales de Puerto Rico. Fuente de Datos: JP, 2006.	56

Figura 17. Acuíferos de Puerto Rico. Fuente. Departamento de Recursos Naturales de Puerto Rico.....	58
Figura 18. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas y cuencas principales de Puerto Rico.....	63
Figura 19. Polígonos de Thiessen. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	68
Figura 20. Polígonos de Thiessen. Cuenca Río Grande de Manatí.....	68
Figura 21. Polígonos de Thiessen. Cuenca Río Culebrinas.....	69
Figura 22. Polígonos Thiessen. Cuenca Río Fajardo.....	69
Figura 23. Fotos aéreas de Arecibo 1951.....	75
Figura 24. Fotos aéreas de Arecibo 1971.....	75
Figura 25. Fotos aéreas de Arecibo 1994.....	76
Figura 26. Fotos aéreas de Arecibo 2007.....	76
Figura 27. Valores de cada píxel en una imagen.....	77
Figura 28. Aplicación de Clasificación No-Supervisada con el <i>ISO Cluster</i> y <i>Maximun Likelihood Classification</i> . Foto sin clasificar, Cuenca Río Grande de Arecibo. Fotografía Aérea 2007.....	78
Figura 29. Aplicación de Clasificación No-Supervisada con el <i>ISO Cluster</i> y <i>Maximun Likelihood Classification</i> . Foto clasificada. Cuenca Río Grande de Arecibo. Fotografía Aérea 2007.....	79
Figura 30. Ubicación del Área de Estudio. Fuente: Junta de Planificación de Puerto Rico 2004.....	83
Figura 31. Límites de la Cuenca Hidrográfica del Río Grande de Arecibo.....	84
Figura 32. Geología de la Cuenca del Río Grande de Arecibo. Briggs, 1968 ...	85
Figura 33. Distribución de la precipitación (mm) anual con algunas estaciones en la Cuenca del Río Grande de Arecibo.....	86

Figura 34. Cuenca Río Grande de Arecibo y municipios limítrofes.	88
Figura 35. Límites de la Cuenca Hidrográfica del Río Grande de Manatí.	89
Figura 36. Geología Cuenca Río Grande de Manatí.	90
Figura 37. Distribución de la precipitación (mm) anual con algunas estaciones en la Cuenca del Río Grande de Manatí.	91
Figura 38. Cuenca Río Grande de Manatí y municipios limítrofes.	93
Figura 39. Límites de la Cuenca Hidrográfica del Río Fajardo.	94
Figura 40. Geología Cuenca del Río Fajardo.	95
Figura 41. Distribución de la precipitación (mm) anual por estaciones en la Cuenca del Río Fajardo.	96
Figura 42. Cuenca Río Fajardo y municipios limítrofes.	98
Figura 43. Límites de la Cuenca Hidrográfica del Río Culebrinas.	99
Figura 44. Geología Cuenca Río Culebrinas	100
Figura 45. Distribución de la precipitación (mm) anual con algunas estaciones en la Cuenca del Río Culebrinas.	101
Figura 46. Cuenca Río Culebrinas y municipios limítrofes.	102
Figura 47. Distribución Espacial de la precipitación media anual.	105
Figura 48. Precipitación media mensual en las estaciones Pico del Este y Ensenada (A) y media de Puerto Rico (B).	106
Figura 49. Coeficiente de variación (%) para toda la isla.	109
Figura 50. Ubicación de estaciones climáticas en la cuenca del Río Grande de Arecibo.	109
Figura 51. Precipitación Media Mensual en la estación de Adjuntas 1NW, 1955- 2006. Cuenca Río Grande de Arecibo.	111

Figura 52. Precipitación Media Mensual en la estación de Adjuntas Substation, 1970-2006. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	112
Figura 53. Precipitación Media Mensual en la estación de Dos Bocas, 1948-2006. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	112
Figura 54. Precipitación Media Mensual en la estación de Montebello, 1970-2001. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	113
Figura 55. Precipitación Media Mensual en la estación de Cerro Maravilla, 1970-2006. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	113
Figura 56. Precipitación Media Mensual en la estación de Peñuelas, 1972-2003. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	114
Figura 57. Precipitación Media Mensual en la estación de Corral Viejo, 1971-2007. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	115
Figura 58. Precipitación Media Mensual en la estación de Aceituna 1955-2005. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	115
Figura 59. Ubicación de estaciones climáticas en la cuenca del Río Grande de Manatí.....	116
Figura 60. Precipitación Media Mensual en la estación de Negro-Corozal (1976-2007)	118
Figura 61. Precipitación Media Mensual en la estación de Aceituna (1955-2005)	119
Figura 62. Precipitación Media Mensual en la estación de Morovis (1957-2006)	119
Figura 63. Precipitación Media Mensual en la estación de Manatí 3E (1956-2006)	120

Figura 64. Ubicación de estaciones climáticas en la cuenca del Río Culebrinas.	120
Figura 65. Precipitación Media Mensual en la estación de Coloso (1948-2007)	122
Figura 66. Precipitación Media Mensual en la estación de San Sebastián (1956-1996)	123
Figura 67. Precipitación Media Mensual en la estación de Mora Camp (1955-2007)	123
Figura 68. Precipitación Media Mensual en la estación de Guajataca Dam (1955-2006)	124
Figura 69. Ubicación de estaciones climáticas en la cuenca del Río Fajardo	124
Figura 70. Precipitación Media Mensual. Paraíso	126
Figura 71. Precipitación Media Mensual (A) Pico del Este y (B) Fajardo.	127
Figura 72. Temperatura media mensual	128
Figura 73. Temperatura media anual (°C).	130
Figura 74. Temperatura media mensual. Estación Dos Bocas. Cuenca Río Grande de Arecibo (1948-2006)	130
Figura 75. Temperatura media mensual. Estación Manatí. Cuenca Río Grande de Manatí (1956-2006)	132
Figura 76. Temperatura media mensual. Estación Coloso. Cuenca Río Culebrinas (1948-2007).	133
Figura 77. Temperatura media mensual. Estación Fajardo. Cuenca Río Fajardo (1948-1995).	134
Figura 78. Temperatura media mensual. Estación Pico del Este. Cuenca Río Fajardo (1970-2004).	135

Figura 79. Evapotranspiración Potencial (ETP) anual (mm). Isla de Puerto Rico	136
Figura 80. Precipitación media mensual (mm) y evapotranspiración potencial (mm) mensual. A) Estación Pico del Este y San Juan WSFO, B) Promedio de la isla.	137
Figura 81. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual en Adjuntas Substation.	138
Figura 82. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual en Dos Bocas.	139
Figura 83. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual en la estación de Manatí.	140
Figura 84. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual. Estación de Isabela.	141
Figura 85. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual. Estación de Coloso.	141
Figura 86. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual. Estación de Fajardo.	142
Figura 87. Precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual. Estación Pico del Este.	142
Figura 88. Tendencias de la precipitación total anual con Mann-Kendall.	147
Figura 89. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (uak) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (uak^*) serie temporal inversa. Ensenada, comienzo en 1967.	148

Figura 90. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (uak) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (uak^*) serie temporal inversa. Ponce, comienzo 1959.	148
Figura 91. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (uak) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (uak^*) serie temporal inversa. Santa Isabel, comienzo 1980.	148
Figura 92. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (uak) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (uak^*) serie temporal inversa. Dorado, comienzo 1962.	149
Figura 93. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (uak) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (uak^*) serie temporal inversa. Mayagüez, comienzo 1963.	149
Figura 94. Número de estaciones donde se confirman las tendencias anuales mes a mes. A) Estaciones con meses positivos. Azul, Rho Spearman y Verde, Mann-Kendall. B) Estaciones con meses negativos. Rojo Rho Spearman, y Amarillo, Mann-Kendall	151
Figura 95. Tendencias de la precipitación total anual con Mann-Kendall en la Región Hidrográfica Cibuco-Guajataca.	155
Figura 96. Evolución de precipitación total anual. Adjuntas Substation	156
Figura 97. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (uak) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (uak^*) serie temporal inversa. Adjuntas Substation, comienzo 1980	157
Figura 98. Evolución de precipitación total anual. Corral Viejo.....	157

Figura 99. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. Corral Viejo, comienzo 1972.	158
Figura 100. Evolución de precipitación total anual. Cerro Maravilla.....	158
Figura 101. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. Cerro Maravilla, comienzo 1978.....	159
Figura 102. Cantidad de estaciones con tendencias negativas (A) y positivas (B) de la precipitación total mensual en la Cuenca del Río Grande de Arecibo.	160
Figura 103. Evolución de la precipitación total del mes de abril. Peñuelas ..	161
Figura 104. Evolución de la precipitación total del mes de mayo. Adjuntas Substation	161
Figura 105. Evolución de la precipitación total anual. Negro-Corozal.....	162
Figura 106. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. Negro Coroza, comienzo 1979.	163
Figura 107. Cantidad de estaciones con tendencias negativas (A) y positivas (B) de la precipitación total mensual en la Cuenca del Río Grande de Manatí.	164
Figura 108. Evolución de la precipitación total en el mes de junio. Manatí..	165
Figura 109. Evolución de la precipitación total en el mes de agosto. Cerro Maravilla.....	165
Figura 110. Tendencias de la precipitación total anual con Mann-Kendall en la Región Hidrográfica Culebrinas-Guanajibo.....	166

Figura 111. Precipitación media anual. Cuenca Río Culebrinas. 1956-1996. .	167
Figura 112. Precipitación total anual. Coloso	167
Figura 113. Precipitación total anual. San Sebastián	167
Figura 114. Evolución de la precipitación total mensual del mes de junio. Coloso.....	169
Figura 115. Evolución de la precipitación total mensual del mes de julio. Coloso.....	169
Figura 116. Tendencias de la precipitación total anual con Mann-Kendall en la Región Hidrográfica del Este.	170
Figura 117. Precipitación media anual. Cuenca Río Fajardo. 1970-1995.....	171
Figura 118. Evolución de la precipitación total anual. Paraíso.	171
Figura 119. Evolución de la precipitación total anual. Pico del Este.	172
Figura 120. Evolución de la precipitación total del mes de octubre. Pico del Este.....	173
Figura 121. Evolución de la precipitación total del mes de marzo. Paraíso...	173
Figura 122. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. A) Adjuntas Substation y B) Cayey.....	175
Figura 123. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. C) Coloso y D) Corozal Substation.....	176
Figura 124. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. E) Dos Bocas y F) Fajardo.	177

Figura 125. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. G) Gurabo Substation, H) Isabela Substation, I) Juncos.	178
Figura 126. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. J) Lajas, K) Mayagüez.	179
Figura 127. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. L) Pico del Este 1988, M) Ponce 1956, sig. 1960-1969 y 2000-2007	180
Figura 128. Mann-Kendall secuencial. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. N) Río Piedras y Ñ) San Juan	181
Figura 129. Mann-Kendall secuencial. Temperatura Máxima Anual. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. A) Adjuntas Substation y B) Coloso.	184
Figura 130. Mann-Kendall secuencial. Temperatura Máxima Anual. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. A) Corozal Substation, B) Dos Bocas y C) Fajardo.	185
Figura 131. Mann-Kendall secuencial. Temperatura Máxima Anual. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. A) Gurabo Substation, B) Isabela Substation y C) Juncos.	186
Figura 132. Mann-Kendall secuencial. Temperatura Máxima Anual. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. A) Lajas Substation, B) Manatí y C) Mayagüez.	187

Figura 133. Mann-Kendall secuencial. Temperatura Máxima Anual. Línea azul (<i>uak</i>) serie temporal sentido normal, línea roja entrecortada (<i>uak*</i>) serie temporal inversa. A) Ponce, B) Río Piedras y C) San Juan.	188
Figura 134. Cuenca Río Grande de Arecibo y ubicación de estación hidrológica 50028000 Río Tanamá NR Utuado.....	193
Figura 135. Caudal Relativo. Río Tanamá (1960-2004).	194
Figura 136. Aportación abril y precipitación. Cuenca Río Grande de Arecibo.	195
Figura 137. Huracán <i>Georges</i> al paso por la isla de Puerto Rico 21-22 de septiembre de 1998. Fuente: NASA.....	196
Figura 138. Caudales diarios y sus coeficientes Qx3, Qx5, Qx10 del caudal medio en el periodo hidrológico de 1960-2004. Río Tanamá	196
Figura 139. Distribución de Frecuencias de los caudales diarios. Río Tanamá (1960-2004).....	197
Figura 140. Coeficiente de variación anual. Río Tanamá (1960-2004)	197
Figura 141. Aportación Anual, representación de la mediana y línea de tendencia. Río Tanamá (1960-2004)	199
Figura 142. Cuenca Río Grande de Manatí y ubicación de la estación de USGS 50035000 Río Grande de Manatí, PR, ubicada en el municipio de Ciales.	201
Figura 143. Caudal Relativo. Río Grande de Manatí (1960-2004).....	202
Figura 144. Aportación del mes de mayo y precipitación media. Cuenca Río Grande de Manatí.....	203
Figura 145. Huracán <i>Hortense</i> al paso por la isla de Puerto Rico. 10 de septiembre de 1996. Fuente: NOAA.....	204

Figura 146. Caudales diarios y sus coeficientes Q_{x3} , Q_{x5} , Q_{x10} del caudal medio en el periodo hidrológico de 1960-2004. Río Grande de Manatí.	204
Figura 147. Distribución de Frecuencias de los caudales diarios. Río Grande de Manatí (1960-2004).....	205
Figura 148. Coeficiente de variación anual. Río Grande de Manatí (1960-2004)	206
Figura 149. Aportación Anual, representación de la mediana y línea de tendencia. Río Grande de Manatí (1960-2004).....	207
Figura 150. Evolución del caudal máximo mensual en el mes de octubre. Río Grande de Manatí.	209
Figura 151. Cuenca Río Culebrinas y ubicación de la estación de USGS 50147800 Río Culebrinas PR, ubicada en el municipio de Moca.	210
Figura 152. Caudal Relativo Río Culebrinas 1967-2007.	211
Figura 153. Caudal medio del mes de marzo. Cuenca Río Culebrinas.....	212
Figura 154. Caudales diarios y sus coeficientes Q_{x3} , Q_{x5} , Q_{x10} del caudal medio en el periodo hidrológico de 1967-2007. Río Culebrinas.	213
Figura 155. Distribución de Frecuencias de los caudales diarios. Río Culebrinas (1967-2007).	213
Figura 156. Coeficiente de variación anual. Río Culebrinas (1967-2007).	215
Figura 157. Aportación Anual, representación de la mediana y línea de tendencia. Río Culebrinas 1967-2007.	215
Figura 158. Evolución del caudal máximo mensual en el mes de septiembre. Río Culebrinas.....	217
Figura 159. Evolución del caudal máximo mensual en el mes de agosto. Río Culebrinas	218

Figura 160. Cuenca Río Fajardo y ubicación de la estación del USGS 50071000 Río Fajardo, ubicada en el mismo municipio de Fajardo.	219
Figura 161. Caudal Relativo. Río Fajardo 1961-2007.	220
Figura 162. Caudal medio de septiembre y precipitación media. Cuenca Río Fajardo	221
Figura 163. Huracán Hugo antes de pasar por la isla de Puerto Rico.	222
Figura 164. Caudales diarios y sus coeficientes Qx3, Qx5, Qx10 del caudal medio en el periodo hidrológico de 1961-2007. Río Fajardo	222
Figura 165. Distribución de Frecuencias de los caudales diarios. Río Fajardo 1961-2007.	223
Figura 166. Coeficiente de variación anual. Río Fajardo 1961-2007.....	224
Figura 167. Aportación Anual, representación de la mediana y línea de tendencia. Río Fajardo 1961-2007.	225
Figura 168. Evolución del caudal máximo mensual en el mes de enero. Río Fajardo	226
Figura 169. Aumento poblacional en la isla de Puerto Rico. Fuente: Ayala, 1996.	231
Figura 170. Migración de puertorriqueños hacia Estados Unidos. Fuente: Ayala, 1996.	231
Figura 171. Evolución de la cubierta forestal en la isla de Puerto Rico. Fuente: Murphy, 1916; Wadsworth, 1950; USDC, 1913; USDA, 1982, 1997.....	233
Figura 172. Mapa de la distribución de las tierras de cultivo en la isla de Puerto Rico en 1928. “ <i>American Memory Collection Web Site of the Library of Congress, Washignton</i> ”	234

Figura 173. Evolución de la población en los municipios de la Cuenca del Río Grande de Arecibo. Fuente: NCEEUU y JP (2006).	237
Figura 174. Porcentaje de sectores económicos por municipios para el 2002. Cuenca Río Grande de Arecibo. Fuente. JP (2006). Otros: comercio, transporte y almacenamiento, finanzas bienes raíces y seguros, y minería.	237
Figura 175. Evolución de la cobertura vegetal y usos de suelo en los últimas décadas. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	238
Figura 176. Cubierta de terreno y usos de suelo 1951. Cuenca Río Grande de Arecibo.	239
Figura 177. Cubierta de terreno y usos de suelo 1971. Cuenca Río Grande de Arecibo.	240
Figura 178. Cubierta de terreno y usos de suelo 1994. Cuenca Río Grande de Arecibo.	241
Figura 179. Cubierta de terreno y usos de suelo 2007. Cuenca Río Grande de Arecibo.	242
Figura 180. Evolución de la población en los municipios de la Cuenca del Río Grande de Manatí. Fuente: NCEEUU y JP (2006)	245
Figura 181. Porcentaje de sectores económicos por municipios para el 2002. Cuenca del Río Grande de Manatí. Fuente: JP (2006)	245
Figura 182. Evolución de la cobertura vegetal y usos de suelo en los últimas décadas. Cuenca Río Grande de Manatí.	246
Figura 183. Cubierta de terreno y usos de suelo 1951. Cuenca Río Grande de Manatí.....	247
Figura 184. Cubierta de terreno y usos de suelo 1971. Cuenca Río Grande de Manatí.....	248

Figura 185. Cubierta de terreno y usos de suelo 1994. Cuenca Río Grande de Manatí.....	249
Figura 186. Cubierta de terreno y usos de suelo 2007. Cuenca Río Grande de Manatí.....	250
Figura 187. Evolución de la población en los municipios de la Cuenca del Río Culebrinas. Fuente: NCEEUU y JP (2006).....	251
Figura 188. Evolución de la cobertura vegetal y usos de suelo en los últimas décadas. Cuenca Río Culebrinas.....	252
Figura 189. Cubierta de terreno y usos de suelo 1951. Cuenca Río Culebrinas	253
Figura 190. Cubierta de terreno y usos de suelo 1971. Cuenca Río Culebrinas	254
Figura 191. Cubierta de terreno y usos de suelo 1994. Cuenca Río Culebrinas	255
Figura 192. Cubierta de terreno y usos de suelo 2007. Cuenca Río Culebrinas.....	256
Figura 193. Evolución de la población en los municipios de la Cuenca del Río Fajardo. Fuente: NCEEUU y JP (2006)	257
Figura 194. Porcentaje de sectores económicos por municipios para el 2002. Cuenca del Río Fajardo. Fuente: JP (2006)	258
Figura 195. Evolución de la cobertura vegetal y usos de suelo en los últimas décadas. Cuenca Río Fajardo.....	259
Figura 196. Cubierta de terreno y usos de suelo 1951. Cuenca Río Fajardo ..	260
Figura 197. Cubierta de terreno y usos de suelo 1971. Cuenca Río Fajardo ..	261
Figura 198. Cubierta de terreno y usos de suelo 1994. Cuenca Río Fajardo..	262

Figura 199. Cubierta de terreno y usos de suelo 2007. Cuenca Río Fajardo ..	263
Figura 200. Precipitación media mensual para cada cuenca.	271
Figura 201. Precipitación media anual por cuenca.	271
Figura 202. Evolución de precipitación anual en cada cuenca.	272
Figura 203. Precipitación total anual en las cuencas con valores normalizados.	272
Figura 204. Comportamiento de la temperatura media mensual por cuencas.	275
Figura 205. Comportamiento de la precipitación y temperatura en la estación Pico del Este. Cuenca Río Fajardo.....	276
Figura 206. Evolución de la temperatura media anual por estación en la isla de Puerto Rico.	276
Figura 207. Evolución de la temperatura media anual en las estaciones de las cuencas estudiadas.	277
Figura 208. Valores de la temperatura media anual normalizados por estaciones.	277
Figura 209. Evolución de la temperatura media anual en la isla de Puerto Rico.	278
Figura 210. Caudales relativos de los cuatro ríos estudiados.	279
Figura 211. Caudal Específico en los cuatro ríos estudiados.....	280
Figura 212. Percentiles 25, 50 y 75 de los caudales mensuales. A) Río Tanamá y B) Río Fajardo.	281
Figura 213. Percentiles 25, 50 y 75 de los caudales mensuales. A) Río Culebrinas y B) Río Grande de Manatí.	282
Figura 214. Resultados de Rho Spearman para cada río.	284

Figura 215. Relación entre la precipitación total y la aportación anual. A) Río Tanamá y B) Río Grande de Manatí	285
Figura 216. Relación entre la precipitación total anual y la aportación anual. A) Río Fajardo y B) Río Culebrinas.....	287
Figura 217. Evolución de la superficie forestal en cada una de las cuencas estudiadas.....	289
Figura 218. Evolución de la superficie agrícola en cada una de las cuencas estudiadas.....	290
Figura 219. Evolución de los pastos y arbustos en cada una de las cuencas estudiadas.....	290

LISTA DE TABLAS

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Incremento demográfico de Puerto Rico. Fuente: Villanueva Colón, 2002 y NCEEUU. http://www.census.gov/	40
Tabla 2. Zonas Ecológicas Naturales de Puerto Rico. Fuente DRNA.....	51
Tabla 3. Población Rural y Urbana de Puerto Rico. Fuente Villanueva Colón, 2002.	52
Tabla 4. Estaciones meteorológicas utilizadas en la isla. Altitud en metros sobre el nivel medio del mar. Fuente NOAA.	64
Tabla 5. Estaciones hidrológicas utilizadas. Altitud en metros sobre el nivel medio del mar. Fuente USGS.	65
Tabla 6. Polígonos de Thiessen en cada cuenca.	67
Tabla 7. Representación de Variables y Unidades utilizadas para el análisis hidrológico.	74
Tabla 8. Información de las fotos aéreas utilizadas.	74
Tabla 9. Precipitación media mensual y anual (mm) para todas las estaciones.	107
Tabla 10. Precipitación (mm) Media, Máxima, Mínima y coeficiente de variación (CV) anual (%) para cada estación.	108
Tabla 11. Precipitación (mm) Media mensual por estación, media anual y coeficiente de variación anual (CV, %). Cuenca Río Grande de Arecibo.....	110
Tabla 12. Precipitación Media, Máxima y Mínima anual de las estaciones en la Cuenca Río Grande de Arecibo.	110
Tabla 13. Coeficiente de variación (CV, %) anual y mensual. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	111

Tabla 14. Precipitación (mm) media mensual y anual por estación y coeficiente de variación (CV, %) anual. Cuenca del Río Grande de Manatí....	117
Tabla 15. Precipitación Media, Máxima y Mínima anual para la cuenca y por estación. Cuenca Río Grande Manatí	117
Tabla 16. Coeficiente de variación (CV, %) anual y mensual. Cuenca Río Grande de Manatí.....	118
Tabla 17. Precipitación (mm) media mensual y anual por estación y coeficiente de variación anual (CV, %). Cuenca del Río Culebrinas.....	121
Tabla 18. Precipitación Media, Máxima y Mínima anual para la cuenca y por estación. Cuenca Río Culebrinas.	121
Tabla 19. Coeficiente de variación (CV, %) anual y mensual. Cuenca Río Culebrinas.....	122
Tabla 20. Precipitación (mm) media mensual y anual por estación y coeficiente de variación (CV, %) anual. Cuenca del Río Fajardo.....	125
Tabla 21. Precipitación Media, Máxima y Mínima anual para la cuenca y por estación. Cuenca Río Fajardo.	125
Tabla 22. Coeficiente de variación (CV, %) anual y mensual. Cuenca Río Fajardo	126
Tabla 23. Temperatura (°C) media anual, media anual mínima, media anual máxima, desviación estándar y coeficiente de variación.....	129
Tabla 24. Valores característicos de la temperatura. Cuenca Río Grande de Arecibo (1949-2006)	131
Tabla 25. Valores característicos de la temperatura. Cuenca Río Grande de Manatí (1956-2006).....	132

Tabla 26. Valores Característicos de la temperatura. Cuenca Río Culebrinas (1948-2007).....	133
Tabla 27. Valores Característicos de la temperatura. Cuenca Río Fajardo (1948-1995).....	134
Tabla 28. Valores Característicos de la temperatura. Cuenca Río Fajardo (Pico del Este 1970-2004).....	135
Tabla 29. Precipitación media mensual (mm) y evapotranspiración potencial (mm) mensual.	137
Tabla 30. Evapotranspiración Potencial mensual y anual. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	138
Tabla 31. Evapotranspiración Potencial mensual y anual. Cuenca Río Grande de Manatí.....	139
Tabla 32. Evapotranspiración Potencial mensual y anual. Cuenca Río Culebrinas.....	140
Tabla 33. Evapotranspiración Potencial mensual y anual. Cuenca Río Fajardo.....	142
Tabla 34. Coeficiente de Correlación (r_s) entre el tiempo y la precipitación anual. Análisis de Mann-Kendall para la precipitación total anual por estación para todo Puerto Rico.	146
Tabla 35. Coeficiente de Correlación (r_s) anual para cada uno de los 12 meses.....	152
Tabla 36. Análisis de Mann-Kendall anual para cada uno de los 12 meses.....	153
Tabla 37. Tendencias de la precipitación total anual con Rho Spearman y Mann-Kendall. Cuenca Río Grande de Arecibo.....	156

Tabla 38. Tendencias de la precipitación mensual con Rho Spearman. Cuenca Río Grande de Arecibo	159
Tabla 39. Tendencias de la precipitación mensual con Mann-Kendall. Cuenca Río Grande de Arecibo	160
Tabla 40. Tendencias de la Precipitación total anual por estación	162
Tabla 41. Tendencias de la precipitación mensual con Rho Spearman. Cuenca Río Grande de Manatí.....	163
Tabla 42. Tendencias con Mann-Kendall de la precipitación total mensual. .	164
Tabla 43. Tendencias con Rho Spearman y Mann-Kendall de la precipitación total anual. Cuenca Río Culebrinas	166
Tabla 44. Tendencias de la precipitación mensual con Rho Spearman. Cuenca Río Culebrinas.....	168
Tabla 45. Tendencias de la precipitación total mensual con Mann-Kendall. Cuenca Río Culebrinas	168
Tabla 46. Tendencias de la precipitación total anual. Cuenca Río Fajardo...	170
Tabla 47. Tendencias de la precipitación mensual por estación con Rho Spearman. Cuenca Río Fajardo.....	172
Tabla 48. Tendencias de la precipitación mensual por estación con Mann-Kendall. Cuenca Río Fajardo.	172
Tabla 49. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y el estadístico Mann-Kendall entre tiempo y temperatura media anual.....	174
Tabla 50. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) entre tiempo y temperatura media mensual.	182
Tabla 51. El estadístico Mann-Kendall entre tiempo y temperatura media mensual.....	182

Tabla 52. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y el estadístico Mann-Kendall entre tiempo y temperatura máxima anual.	183
Tabla 53. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y el estadístico Mann-Kendall entre tiempo y temperatura mínima anual.	183
Tabla 54. Datos de Caudal (Q) medio, caudal relativo, coeficiente de variación (CV) y caudal específico. Río Tanamá (1960-2004)	195
Tabla 55. Valores Característicos de la aportación media anual y mensual. Río Tanamá (1960-2004).....	198
Tabla 56. Coeficiente de Correlación entre tiempo y aportación mensual y anual. Río Tanamá (1960-2004)	199
Tabla 57. Coeficiente de Correlación entre tiempo y caudal máximo mensual y anual. Río Tanamá (1960-2004).....	200
Tabla 58. Datos de Caudal (Q) medio, caudal relativo, coeficiente de variación (CV) y caudal específico. Río Grande de Manatí (1960-2004)	203
Tabla 59. Valores Característicos de la aportación media anual y mensual. Río Grande de Manatí (1960-2004).....	206
Tabla 60. Coeficiente de Correlación entre tiempo y aportación mensual y anual. Río Grande de Manatí (1960-2004).....	208
Tabla 61. Coeficiente de Correlación entre tiempo y caudal máximo mensual y anual. Río Grande de Manatí (1960-2004).....	208
Tabla 62. Datos de Caudal (Q) medio, caudal relativo, coeficiente de variación (CV) y caudal específico. Río Culebrinas (1967-2007)	212
Tabla 63. Valores Característicos de la aportación media anual y mensual. Río Culebrinas (1967-2007).....	214

Tabla 64. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y estadístico Mann-Kendall entre tiempo y aportación mensual y anual. Río Culebrinas (1967-2007).	216
Tabla 65. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y estadístico Mann-Kendall entre tiempo y caudal máximo mensual y anual. Río Culebrinas (1967-2007).	217
Tabla 66. Datos de Caudal (Q) medio, caudal relativo, coeficiente de variación (CV) y caudal específico. Río Fajardo 1961-2007	221
Tabla 67. Valores Característicos de la aportación media anual y mensual. Río Fajardo 1961-2007	223
Tabla 68. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y estadístico Mann-Kendall entre tiempo y aportación mensual y anual. Río Fajardo 1961-2007	225
Tabla 69. Coeficiente de Correlación (Rho Spearman) y estadístico Mann-Kendall entre tiempo y caudal máximo mensual y anual. Río Fajardo 1961-2007	226
Tabla 70. Área y Población (N° de habitantes) por municipios de la cuenca del Río Grande de Arecibo. Fuente. NCEEUU y JP (2006).	237
Tabla 71. Usos de suelo y cubierta de terrenos (km ²) en la Cuenca del Río Grande de Arecibo	238
Tabla 72. Área y población (N° de habitantes) por municipio en la Cuenca del Río Grande de Manatí. Fuente: NCEEUU y JP (2006)	245
Tabla 73. Usos de suelo y cubierta de terrenos (km ²) en la Cuenca del Río Grande de Manatí	246
Tabla 74. Área y población (N° de habitantes) por municipio en la Cuenca del Río Culebrinas. Fuente: NCEEUU y JP (2006).	251

Tabla 75. Usos de suelo y cubierta de terrenos (km ²) en la Cuenca del Río Culebrinas	252
Tabla 76. Área y población (N° de habitantes) por municipio en la Cuenca del Fajardo. Fuente: NCEEUU y JP (2006)	257
Tabla 77. Porcentaje de sectores económicos por municipios para el 2002. Cuenca Río Fajardo. Fuente: NCEEUU y JP (2006).....	258
Tabla 78. Usos de suelo y cubierta de terrenos (km ²) en la Cuenca del Río de Fajardo	258
Tabla 79. Tendencias de la precipitación mensual en cada cuenca con Rho Spearman.....	273
Tabla 80. Tendencias de la precipitación mensual en cada cuenca con Mann-Kendall.....	273
Tabla 81. Comparación de la variabilidad anual y mensual de los cuatro ríos.	280
Tabla 82. Comparación evolutiva de la aportación anual en los cuatro ríos.	283
Tabla 83. Comparación de la evolución de la aportación media mensual y anual en todos los ríos. Rho Spearman.	283
Tabla 84. Comparación de la evolución de la aportación media mensual y anual en los cuatro ríos. Mann-Kendall	284
Tabla 85. Comparación de los coeficientes de correlación entre el tiempo, la precipitación media anual y mensual, y la aportación anual y mensual. Río Grande de Manatí y Río Tanamá.....	286
Tabla 86. Comparación del estadístico Mann-Kendall (S) para la precipitación media mensual y anual, y la aportación mensual y anual. Río Grande de Manatí y Río Tanamá.	286

Tabla 87. Comparación de los coeficientes de correlación entre el tiempo, la precipitación media anual y mensual, y la aportación anual y mensual. Río Culebrinas y Río Fajardo. 288

Tabla 88. Comparación del estadístico Mann-Kendall (S) para la precipitación media mensual y anual, y la aportación mensual y anual. Río Culebrinas y Río Fajardo. 288

LISTA DE FOTOS

LISTA DE FOTOS

Foto 1. Río Tanamá, en Arecibo.	194
Foto 2. Río Grande de Manatí en Ciales.	202
Foto 3. Río Culebrinas en Moca.	211
Foto 4. Río Fajardo, en Fajardo.	220
Foto 5. Finca de Tabaco en el municipio de Cayey. Puerto Rico. Principios del siglo XX. Fuente: “ <i>American Memory Collection Web Site of the Library of Congress, Washignton</i> ”.	235
Foto 6. Finca de Tabaco en el municipio de Barranquitas, Puerto Rico. Principios del siglo XX. Fuente: “ <i>American Memory Collection Web Site of the Library of Congress, Washignton</i> ”.	235
Foto 7. Siembra de café sin sombra en Maricao, Puerto Rico.	236
Foto 8. Llanuras aluviales del Río Grande de Manatí. Barrio Montebello, Manatí. Finca de ganado para leche.	243
Foto 9. Siembra de tubérculos (ñame y batata, entre otros) en el municipio de Manatí, Puerto Rico.	244
Foto 10. Niebla Bosque Pluvial Tropical, El Yunque.	295
Foto 11. Densidad de Vegetación en Bosque Pluvial Tropical, El Yunque.	296
Foto 12. Niebla en el municipio de Adjuntas.	296

LISTA DE ACRÓNIMOS

LISTA DE ACRÓNIMOS

DRNA- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico

EPA- *Environmental Protection Agency*

JCA- Junta de Calidad de Ambiental

JP- Junta de Planificación

MK- Mann-Kendall

MKS- Mann-Kendall Secuencial

NCEEUU- Negociado del Censo de los Estados Unidos

NOAA- *National Oceanographic and Atmospheric Administration*

RS- Rho Spearman

USDA- *US Department of Agriculture*

USGS- *US Geological Survey*