

Análisis de balance hídrico en cuencas hidrográficas de la Sierra de los Órganos

Dra. Yilian María Morejón Miranda, Investigador Agregado. email: yilian@ucp.pr.rimed.cu
Dirección Provincial de Suelos y Fertilizantes, Pinar del Río.

Dra. Marina Beatriz Vega Carreño, Profesora Titular. email: mvega@civil.cujae.edu.cu
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Marianao, Habana.

Dr. Antonio Escarré Esteve, Profesor Titular. email: escarre@ua.es
Universidad de Alicante, Alicante, España.

Dr. José Luis Peralta Vital, Investigador Agregado. e-mail: peralta@cphr.edu.cu
Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR), Guanabacoa, Habana.

Dra. Arely Quintero Silveiro, Profesora Auxiliar. email: arelys@mat.upr.edu.cu
Univ. de Pinar del Río Hnos. Saíz Montes de Oca, Pinar del Río.

Dr. Julio Iván González Piedra, Profesor Auxiliar. email: igp@geo.uh.cu
Facultad de Geografía, Universidad de la Habana. Habana.

RESUMEN

La evaluación de los recursos hídricos de una cuenca o sistema de cuencas se puede hacer cuantificando los distintos componentes del balance hídrico. Con el objetivo de determinar con precisión la disponibilidad de agua superficial en los ríos de las cuencas forestales Mantua, Cuyaguaje y San Juan y Martínez, se utilizó un método de balance hídrico propuesto por Lvovitch en 1959. Se emplearon mediciones de lluvia y escurrimiento, realizadas in situ, durante un período de 23 años, mostrando una tendencia a incrementarse los procesos de transpiración sobre los escurrimientos. Solo 38% de la precipitación anual se convierte en escurrimiento en Mantua y Cuyaguaje y hasta 42% en San Juan y Martínez. En la época de seca los porcentajes de escurrimiento son 27,3%, 26,4% y 32% respectivamente.

Palabras clave: cuenca, escurrimiento, precipitación, recursos hídricos.

Analysis of water budget in the Sierra de los Órganos basins

ABSTRACT

Water resources assessment in a basin or basin system can be made by quantifying the different components of the water budget. In order to accurately establish the surface water availability in the forest basin rivers of Mantua, Cuyaguaje and San Juan y Martínez, the method of hydrological budget proposed by Lvovitch in 1959 was applied. Rainfall and runoff data in situ measurements were used during a period of 23 years. The records showed a tendency to increase transpiration over runoff processes. Only 38% of the annual precipitation turns into runoff in Mantua and Cuyaguaje rivers and up to 42% in San Juan y Martínez river. In the dry season runoff percentages are 27, 3 %, 26, 4% and 32% respectively.

Keywords: basin, runoff, rainfall, water resources.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de recursos hídricos en una zona es función del volumen anual promedio del agua que recibe, de la que vuelve a la atmósfera por transpiración y evaporación (en conjunto evapotranspiración) y también de la diferencia de disponibilidad hídrica en las épocas de lluvia y la seca o menos lluviosa. Cada una proporciona escenarios muy diferenciados que merecen análisis por separado de los balances hidrológicos.

Bosch and Hewlett (1982), estudiaron cuencas de un amplio rango de superficies, definiendo que en la estimación de balances hídricos, la escala no constituye un problema importante, por lo que es posible emplear resultados de experiencias de manejo realizadas en cuencas de unas pocas hectáreas y extrapolarlos a otras de mayores dimensiones. En cambio, aspectos de las cuencas como el relieve, las características del suelo, la vegetación y la constitución geológica, tienen una marcada influencia en la capacidad de almacenamiento y en la generación de flujos de agua a la atmósfera y a las vías de drenaje.

En resultados de gestión de cuencas forestales, la mayoría de las investigaciones sobre el comportamiento hidrológico se corresponde con países templados o fríos y son muy escasas las realizadas en climas tropicales, y mucho menos frecuente es el que se realicen análisis de diferencias en períodos menores que un año (seca y húmeda). En las cuencas cubanas, no se ha determinado si las relaciones entre la precipitación (P) y el escurrimiento (Q) y la evapotranspiración (E_A), corresponden al modelo descrito por Likens et al. (1977) para países templados húmedos (Q depende de P ; E_A es prácticamente constante) o al encontrado por Piñol et al. (1999) en el área mediterránea (E_A depende de P ; Q es poco o nada dependiente). Teniendo en cuenta estos antecedentes la presente investigación tiene como objetivos:

- Obtener información preliminar de balances hídricos a partir de la estimación de los valores medios de P , Q y de E_A , para períodos anuales completos conjuntamente con los correspondientes a las épocas húmeda y seca por separado.
- Realizar la valoración de la E_A en esos mismos sectores. De ellos, solo San Juan y Martínez se podría considerar “pequeña cuenca” según el criterio de Buttle (1998) y ninguno según el de Jones (1997).
- Analizar la dependencia o independencia de Q y E_A respecto a P , en las tres áreas de estudio, para períodos anuales completos, y para las épocas seca y lluviosa por separado.

PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Mediciones de precipitación

Las mediciones de las precipitaciones se realizaron utilizando tres pluviómetros con los registros más largos y ubicados, preferentemente, en las altitudes altas, media y baja del sector de estudio de las cuencas Mantua, Cuyaguatije y San Juan y Martínez (tabla 1). De cada uno se tomaron las observaciones de los períodos secos y húmedos de 23 años hidrológicos, comprendidas en el período 1979 al 2003.

Determinación del balance hidrológico

Los principales componentes del balance hídrico se determinaron a partir de la selección del modelo de las llamadas “Ecuaciones Diferenciadas” de Lvovitch (1959), cuya ecuación (1) fundamental se expresa a continuación (González 1988):

$$P = Q + E_A \pm \Delta S \quad (1)$$

donde: P= precipitación, Q= escurrimiento, E_A = evapotranspiración real, ΔS = cambios en el almacenamiento de agua (suelo, vegetación, aguas subterráneas, lagos naturales y artificiales, etc.).

Tabla 1. Pluviómetros utilizados en cada sector para el estudio hidrológico

Sectores superiores	Pluviómetros	Coordenadas		Altitud
		Norte	Este	
Mantua	395	280	164,5	25
	354	285,6	189,4	72
	324	287,7	180,3	195
Cuyaguaje	122	294,1	200,3	100
	291	297,4	203,9	105
	384	305	208	200
San Juan y Martínez	353	276,2	206,5	40
	254	276	207,3	38
	290	281	192,8	105

El éxito de una buena definición de año hidrológico es fundamental para el correcto uso de esta expresión ya que permite minimizar el valor de ΔS , cuya estima no resulta sencilla. En esta investigación se definió como año hidrológico de mayo a abril del próximo año; el período lluvioso comprendido de mayo a agosto y período menos lluvioso de septiembre a abril.

La ecuación (1) solo es aplicable cuando el período de cálculo de dichos componentes es relativamente corto, es decir, que las series de observaciones no son lo suficientemente largas para ser consideradas como el status medio anual de cada uno de dichos componentes. Se trata de períodos que van desde un año hasta no más de 15 años (en dependencia del coeficiente de variación de las series de los tres componentes principales: lluvia, escurrimiento y evapotranspiración), en que los años secos y húmedos influyen notablemente en la variabilidad anual (por ejemplo, coeficiente de variación alto) y por tanto los valores medios no son tan representativos como tales (Gutiérrez 1994). Esa es la razón por la cual se hace imprescindible considerar todos los cambios en el almacenamiento del agua en los diferentes cuerpos receptores.

Contrariamente, si se trata de una estimación del balance hídrico para un período de observación lo suficientemente largo, período hiperanual, en que los coeficientes de variación de las series de cada componente no son altos, y en que se pueda considerar y confiar en un status medio de cada componente (en que se han compensado cuantitativamente años secos y años húmedos), entonces no es necesario seguir considerando los cambios de los almacenamientos y por tanto se hacen cero quedando la ecuación (2) de la forma siguiente.

$$P = Q + E_A \quad (2)$$

DETERMINACIÓN DE LOS BALANCES HÍDRICOS DE LOS TRES SECTORES INVESTIGADOS

El análisis de los parámetros precipitación, escurrimiento y evapotranspiración se realizó hasta el punto de cierre de cada uno de los sectores superiores de las cuencas Mantua, Cuyaguaje y San Juan y Martínez, donde se encuentran las estaciones hidrométricas de cada una de estas regiones hidrológicas, y se realizaron para un período de 23 años, es decir durante

los años hidrológicos comprendidos entre 1979 y 2002 ya que para este período existían medidas directas de lluvia y escurrimiento. Para lograr que la base de datos cubriera la mayor área de estudio, se realizó la interpolación de la información mensual faltante, utilizando otros pluviómetros ubicados en la misma cuenca o en las proximidades, los cuales habían sido utilizados con anterioridad. Estos sectores de estudio tienen similitud fisiográfica y están ubicados de forma consecutiva de oeste a este.

Regímenes de lluvia (P)

En la figura 1 se muestran los valores de precipitación anual estimados; donde la lluvia promedio del período es bastante similar en el caso de Mantua y Cuyaguaje (1862,8 mm y 1842,5 mm), y aproximadamente 200 mm inferior para San Juan y Martínez, con respecto a las otras dos cuencas. Un segundo aspecto a destacar es la desigual distribución de los volúmenes de precipitación entre las épocas lluviosa y seca donde para esta última los valores son aproximadamente una cuarta parte del valor total del año para las tres cuencas, y para la húmeda representan entre el 78, 76 y 79 % del agua que reciben cada año respectivamente.

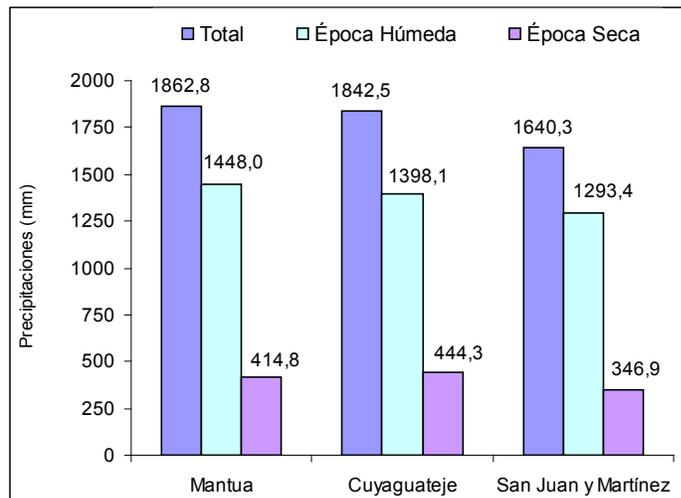


Figura 1. Valores de precipitaciones totales y por épocas (período hidrológico de 1979 –2002)

Los años hidrológicos más lluviosos de la serie estudiada, fueron los comprendidos entre 1982 - 1983 y 1995 - 1996, tanto en precipitación anual como en la correspondiente a la época húmeda, (tabla 2). En el primero de ellos resultó notable el efecto del ciclón Alberto que afectó toda esta parte del Occidente de Cuba en el mes de junio del año 1982. Por el contrario las fases de mayor sequía correspondieron a los seis meses menos húmedos de los años hidrológicos entre 1987 - 1988 y 2000 - 2001 en los que la precipitación fue inferior a los 300 mm, (tabla 2).

La reducción de las precipitaciones observadas en el año hidrológico 2000 - 2001 está en correspondencia con los resultados descritos en CITMA (2004) donde se destaca que el año 2001 estuvo caracterizado por temperaturas medias más altas de lo normal en la mayor parte del año, debido, en lo fundamental, a los altos valores registrados de la temperatura mínima, además de observarse que los acumulados de las lluvias, fueron escasos para las regiones occidental y

oriental provocando procesos de sequía severas en dichas regiones, destacándose el mes de junio como extremadamente seco para el país, constituyendo el menos lluvioso desde 1941.

Tabla 2. Precipitaciones en época seca y húmeda (mm), medidas en los sectores superiores investigados, para el período hidrológico de 1979 - 2002

Años hidrológicos	Mantua		Cuyaguaje		San Juan y Martínez	
	seca	húmeda	seca	húmeda	seca	húmeda
1979 / 1980	520,10	1729,30	495,9	1510,6	435,4	1625,4
1980 / 1981	445,97	1354,57	444,2	1062,9	564,8	1228,0
1981 / 1982	616,13	1125,63	403,5	1088,3	626,4	1312,2
1982 / 1983	596,60	1836,00	574,6	1644,7	738,1	1782,2
1983 / 1984	350,90	1698,53	405,1	1430,1	300,2	1078,4
1984 / 1985	397,33	1204,33	460,0	1211,1	404,3	1125,3
1985 / 1986	436,93	1096,67	353,8	1125,4	287,6	1034,0
1986 / 1987	429,20	1244,47	464,8	1243,9	372,2	856,8
1987 / 1988	215,50	1507,80	243,9	1484,4	173,9	968,3
1988 / 1989	484,30	1512,23	449,2	1533,0	229,9	1466,9
1989 / 1990	388,40	1160,53	350,0	1254,7	275,9	892,3
1990 / 1991	364,97	1408,63	335,1	1134,7	209,8	992,1
1991 / 1992	305,87	1422,67	409,2	1514,7	222,4	1214,6
1992 / 1993	445,60	1683,83	724,2	1476,2	434,5	1460,3
1993 / 1994	498,70	960,67	532,3	1026,4	219,4	1029,7
1994 / 1995	486,00	1469,97	640,9	1792,7	418,8	1638,4
1995 / 1996	469,63	1882,67	480,8	1901,0	357,4	1990,0
1996 / 1997	323,40	1564,43	509,3	1416,9	375,4	1399,0
1997 / 1998	474,77	1304,00	518,6	1605,0	395,6	1528,5
1998 / 1999	296,13	1679,43	326,0	1633,7	291,3	1598,6
1999 / 2000	310,20	1443,87	330,8	1283,6	256,3	1386,6
2000 / 2001	301,63	1344,80	307,6	1368,1	128,5	1017,1
2001 / 2002	382,70	1669,50	410,4	1414,8	261,5	1123,3
Valor Medio	414,8 ± 20,7	1448,0 ± 51,8	444,3 ± 22,9	1398,1 ± 49,0	346,9 ± 30,8	1293,3 ± 63,8

Si se comparan los resultados de la figura 1, con el mapa isoyético elaborado por Gutiérrez (1994) en el estudio de la región occidental de Cuba, se puede apreciar que las cuencas investigadas se localizan mayormente en las isolíneas de 1 600 y 1 800 mm año, lo cual se puede considerar bastante coincidente, con las estimaciones aquí realizadas. En el estudio integral de la cuenca de Cuyaguaje, León (2001) realizó una investigación pluviométrica a escala 1: 50 000 para toda el área, según la cual a la parte alta que es la que se considera en esta investigación, le correspondería una precipitación anual del orden de los 1 750 mm, valor algo inferior al aquí estimado, y concretamente de 1 779 mm anuales en el pluviómetro del embalse del Mulo, en el período comprendido entre 1990 y 2000.

Más recientemente el Servicio Hidrológico Nacional (2006), realizó un exhaustivo estudio de las precipitaciones para toda Cuba en el período comprendido entre 1961 y 2000, con la aplicación del método de modelación bidimensional, que tuvo en cuenta variables topográficas diferentes, es decir; fueron consideradas áreas de llanuras, zonas de premontaña y montaña. Los valores de precipitación que se obtuvieron con este tipo de modelos coinciden sensiblemente con los valores obtenidos para la cuenca de Cuyaguajeje ($1\,822\text{ mm año}^{-1}$), no así en el caso de San Juan y Martínez que se produce una sobrestimación de 300 mm año^{-1} aproximadamente, y por el contrario una subestimación del mismo orden respecto a la cuenca del río Mantua, diferencias éstas que pudieran atribuirse a que la información utilizada no es exactamente del mismo período.

El análisis estadístico de la serie de datos de las precipitaciones ha puesto de manifiesto que no existen diferencias significativas, según prueba de Kruskal - Wallis, entre las cuencas Mantua y Cuyaguajeje, pero a su vez ambas presentan valores menores de lluvia anual que la cuenca de San Juan y Martínez, mostrando estadísticamente diferencias significativas de $p < 0,05$.

Análisis de los escurrimientos (Q)

Para definir el comportamiento estadístico de las series anuales y por épocas del escurrimiento, así como la relación entre P y Q se requiere del siguiente análisis.

En el sector superior del río Cuyaguajeje existe un área con características cársicas, cuya influencia debiera tenerse en cuenta a los efectos del establecimiento riguroso del balance hídrico. Para ello se recurrió a los estudios realizados por Gutiérrez (1994), que aborda la influencia del carso en el escurrimiento de 22 cuencas del occidente del país. El punto de mayor interés es la relación entre el nivel de carsificación y el escurrimiento fluvial. Se señala que gran parte de las precipitaciones que tienen lugar sobre territorios cársicos infiltran en su interior, lo que afecta las relaciones entre los diferentes componentes del balance hídrico.

El efecto sobre los mismos depende del grado de desarrollo cársico y del grado de ubicación dentro de la cuenca, así como de la existencia de flujos subterráneos que pueden comunicar cuencas adyacentes. En general se puede afirmar que la carsificación puede tener incidencia positiva o negativa en el escurrimiento de la cuenca cuando recibe o pierde volúmenes de agua de las cuencas vecinas. Sin embargo existen ocasiones en las que el carso también provoca una redistribución interna del escurrimiento dentro de la propia cuenca que puede no afectar el balance hídrico de la misma (Gutiérrez 1994).

En relación con los sectores superiores de las cuencas de la presente investigación, los principales resultados aportados por Gutiérrez (1994) y que sustentan la aplicación de la ecuación (3) (que se muestra más adelante) son los siguientes:

1. En los valores del coeficiente de desarrollo exocársico (K_{de}) que identifica qué porcentaje de la cuenca es cársica, le corresponde 0 % en el caso de El Tabaco en San Juan y Martínez y 27 % para V Aniversario, Cuyaguajeje. El primero clasifica como no cársico (NC) y el segundo como poco cársico (PC).
2. La influencia del carso en el escurrimiento del sector superior de la cuenca Cuyaguajeje, estimada según el coeficiente de desviación relativa (D_r), que muestra la desviación entre el coeficiente de escurrimiento de la cuenca (K_r) y el zonal (K_z) presenta un valor de + 2,0 %,

con lo que clasifica en la categoría C, la que se corresponde con los casos en los que no hay incidencia cársica significativa.

3. Con el método que compara los coeficientes de variación de los escurrimientos de la cuenca V Aniversario (sector superior) con los zonales, se obtiene un valor de $K_{de}=0,98$ y se clasifica según Batista y Rodríguez (1986) en el grupo de “zonales”, es decir, con poca afectación de los balances.
4. Con otros dos métodos propuestos por el propio Gutiérrez (1994), este sector superior se incluiría en el grupo C, que agrupa a varios sectores en los que su estructura cársica tiene muy poca influencia en los escurrimientos.

Los valores de escurrimientos anuales del sector superior de las cuencas aparecen reflejados en la figura 2. Los volúmenes anuales son muy similares para las tres cuencas, entre 719,3 y 712,9 mm, pero con diferencias entre las épocas húmeda y seca. Para la época menos lluviosa los escurrimientos están en el orden del 16 % y para la época húmeda del 84% del avenamiento total. En el año hidrológico 1982 - 1983 se produjeron los mayores valores de escurrimiento de la serie que están comprendidos entre 1 157,9 y 1 548,9 mm y se originaron como consecuencia del paso del ciclón Alberto, en el mes de junio de 1982.

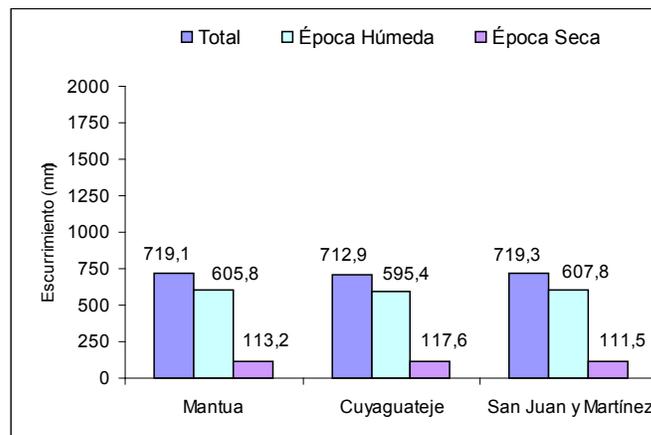


Figura 2. Valores de escurrimientos totales y por épocas (período hidrológico de 1979 al 2002)

Para comprobar si existen diferencias entre los volúmenes de escurrimiento de estos sectores se llevó a efecto un análisis estadístico con los coeficientes de escurrimiento anual para obviar el efecto de las diferencias de los volúmenes anuales de lluvia, que ya se ha probado que es menor en San Juan y Martínez que en las restantes cuencas. Con la prueba de Kruskal Wallis se puso de manifiesto que no existen diferencias significativas entre los coeficientes de escurrimiento de las cuencas Mantua, Cuyaguaje y San Juan y Martínez, con valores de 0,379 para las dos primeras y 0,420 para la otra.

Relaciones entre la precipitación (P) y el escurrimiento (Q)

Las características que se muestran en la figura 3 y figura 4, permiten realizar un análisis detallado del comportamiento de las regresiones lineales entre P y Q donde los mayores coeficientes de determinación se obtuvieron para las regresiones lineales correspondientes a la época húmeda y al período anual total, en todos los casos con un nivel de significación de $p < 0,001$; por lo que se puede afirmar que P es una buena variable para pronosticar Q y que en

los períodos hidrológicos considerados en conjunto (todo el año o los seis meses de lluvia), no parece haber demandas de recursos hídricos, por parte del bosque, que no puedan ser satisfechas. Resultados similares fueron obtenidos por Piñol et al. (1999).

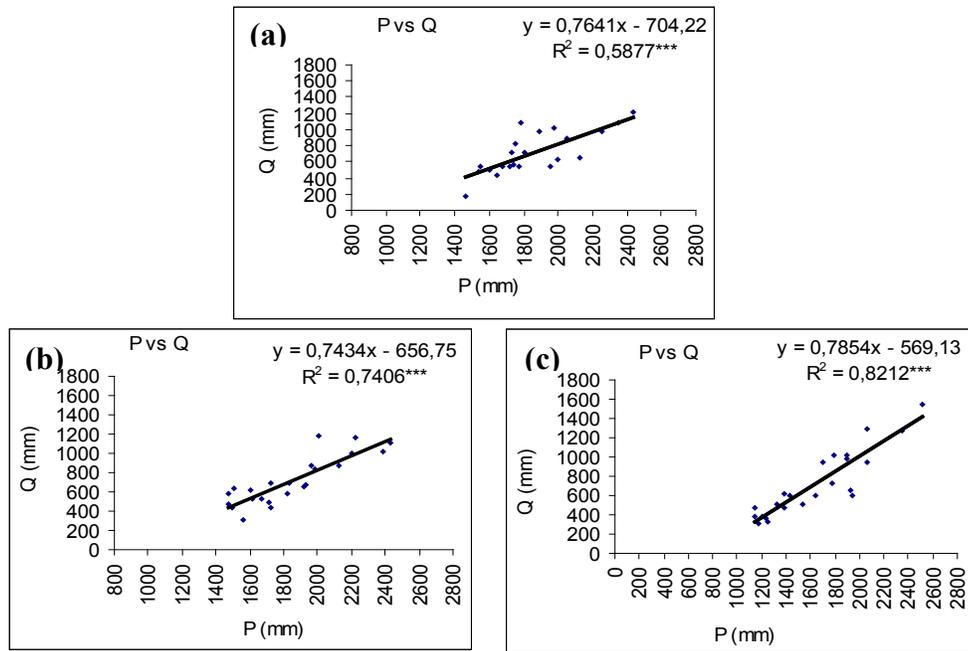


Figura 3. Regresiones lineales entre P y Q para años hidrológicos completos en los sectores superiores: (a) Mantua, (b) Cuyaguateteje y (c) San Juan

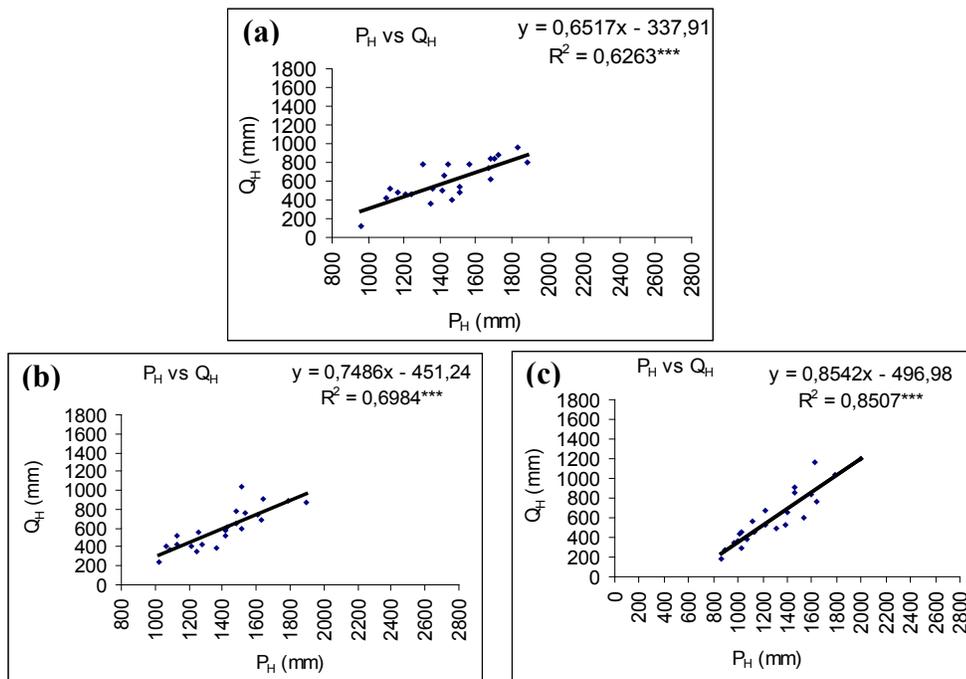


Figura 4. Regresiones lineales entre P_H y Q_H para época lluviosa en los sectores superiores: (a) Mantua, (b) Cuyaguateteje y (c) San Juan

Para los valores de P_s y Q_s , el período seco (figura 5), los modelos lineales no resultan satisfactorios. En el caso de la cuenca de Mantua la relación no es ni siquiera significativa y en las otras dos cuencas los valores de los coeficientes de determinación son menores que los correspondientes a los otros dos períodos aunque mantienen una significación de $p < 0,001$.

Como ya se ha señalado, en esos seis meses estas cuencas reciben solo entre el 20 y el 24 % de la lluvia del año, pero los bosques que las cubren tienen una demanda de evaporación (E_T) según datos de evaporímetros ubicados en el sector superior de la cuenca San Juan y Martínez y Cuyaguaje del 48 % del total del año aproximadamente, y es normal que la competencia entre el flujo de escurrimiento y el transpiratorio, que requiere el mantenimiento del bosque alterara las condiciones de producción de los escurrimientos. La regresión lineal con significaciones, con probabilidades menores de $p < 0,01$ ó $0,001$ de los coeficientes de determinación es lo más habitual en la literatura existente sobre relaciones entre las P y Q anuales y así ocurre en nueve de las quince referencias recopiladas en Piñol et al. (1999).

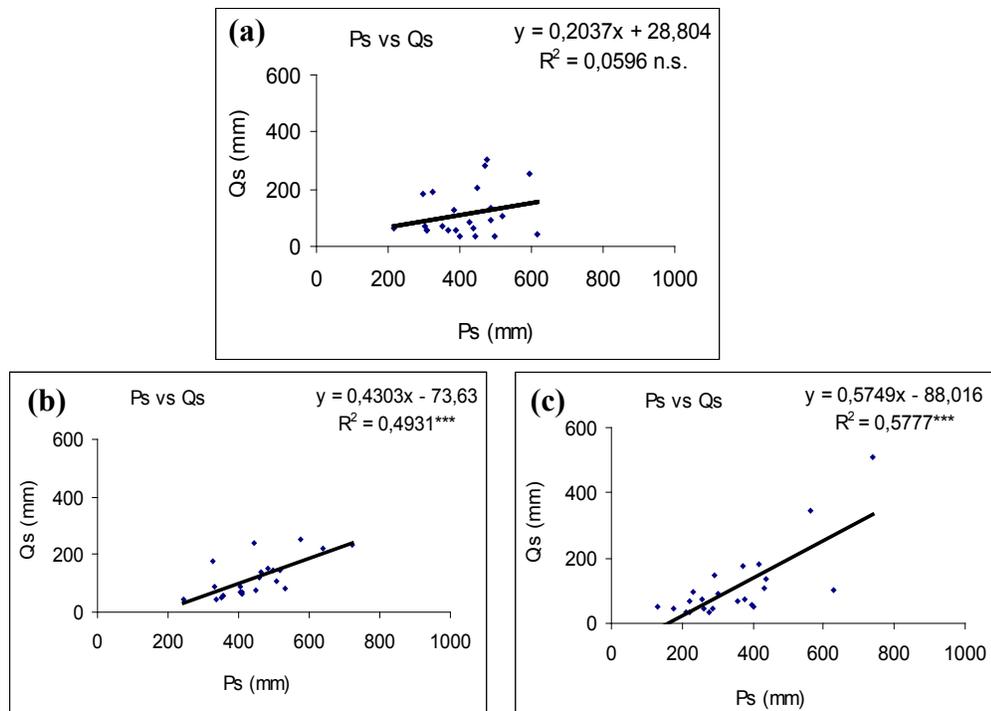


Figura 5. Regresiones lineales entre P_s y Q_s para el período seco en los sectores superiores: (a) Mantua, (b) Cuyaguaje y (c) San Juan

Los resultados obtenidos en esta investigación coinciden con los encontrados por Likens et al. (1977), donde se muestra la existencia de una clara dependencia estadística entre P y Q en el conjunto de cuencas experimentales de Hubbard Brook. En la figura 6 aparece la buena correlación existente entre esas dos mismas variables, pero en diferentes estaciones de un amplio rango del volumen de la lluvia anual donde se han incluido los catorce bosques tropicales con datos de balances hidrológicos recopilados por Richards (1996), una cuenca estudiada por Bosch and Hewlett (1982) y las tres cuencas en las que se basa. El valor medio del coeficiente de escurrimiento de los catorce valores de series anuales es 0,53, claramente superior, como es de esperar en los trópicos lluviosos, al 0,36 que estima Schlesinger (2000) para el conjunto del área continental del planeta.

En el caso concreto de los pinares, el coeficiente de escurrimiento estimado por Meng et al. (2001) en *Pinus armandii* en bosques de China fue 0,17 con una lluvia anual de 1000 mm, mientras que en las cuencas de *Pinus ponderosa* de Arizona recopiladas por Bosch and Hewlett (1982), los valores oscilaron entre 0,10 y 0,26 para un rango de precipitación entre 580 y 815 mm al año, todos ellos inferiores a los promedios encontrados para el período de estudio, Mantua y Cuyaguaje (0,38) y San Juan y Martínez (0,42), pero en rango de precipitación todos ellos superiores a 1600 mm.año⁻¹.

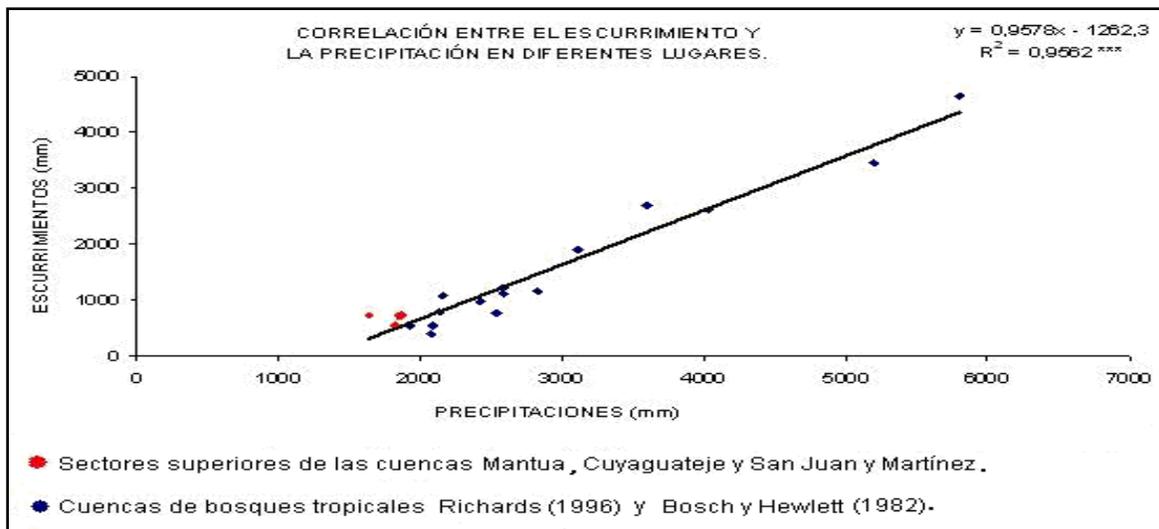


Figura 6. Relación entre los escurrimientos y la precipitación en cuencas de Asia, África, América y Oceanía

CARACTERIZACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL

La evapotranspiración real (E_A) fue estimada por la diferencia de precipitación menos el escurrimiento a partir de la ecuación (3):

$$E_A = P - Q \quad (3)$$

En la figura 7 están representados los valores de E_A anual y los correspondientes a las épocas seca y lluviosa. Si se comparan los coeficientes de evapotranspiración se aprecia que los valores son idénticos para Mantua y Cuyaguaje (0,61) mientras que en San Juan y Martínez es 0,56, menor valor que puede explicarse por la menor densidad de vegetación de pinares y latifolias. A partir de los resultados anteriores, se observa menos desequilibrio en la distribución del flujo de E_A entre las épocas seca y lluviosa en relación con la correspondiente al escurrimiento ya que en este caso los porcentajes para los seis meses del período menos lluvioso oscilan entre el 25 y el 29 %.

Respecto a la precipitación recibida en cada una de las épocas, las cuencas pierden por E_A entre el 68 y el 73 % en la época seca y entre el 53 y el 58 % en la lluviosa. Con los valores totales de E_A y P en los años hidrológicos se aprecia que en estos sectores el flujo a la atmósfera representa entre el 56 y el 62 % de la lluvia recolectada. Estas cifras ponen de manifiesto que en esta zona del occidente de Cuba, en el mejor de los casos, los escurrimientos solo alcanzan el 40 % de la lluvia incidente. Es importante destacar la magnitud de estos valores porcentuales ya

que ponen de manifiesto que en esta zona, en el mejor de los casos, los escurrimientos solo alcanzan el 38 % de la lluvia incidente.

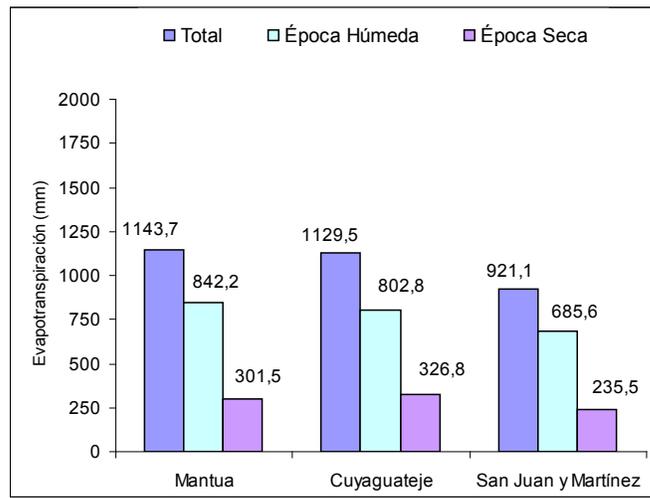


Figura 7. Valores de evapotranspiración total y por épocas (período hidrológico de 1979 al 2002)

Relación de la evapotranspiración con la precipitación

En la figura 8 se representan las regresiones lineales entre la E_A anual con las respectivas precipitaciones. Se aprecia en este caso que la relación entre ambas variables es significativa en los sectores superiores del Cuyaguaje y de San Juan y Martínez, y no lo es para Mantua. En los dos primeros casos, el valor de E_T es ligeramente superior al de P , y en esas condiciones existe, incluso en todo el año, una cierta dependencia entre E_A y P .

En el caso del sector superior del río Mantua, no es posible decir con precisión cuál es la magnitud de la relación entre E_T y P , ya que no existe información del evaporímetro. En el análisis detallado de los datos también se aprecia que los valores de las desviaciones típicas de las variables E_T y P son apreciablemente mayores en Mantua que en los otros dos sectores. Estos resultados contrastan con los obtenidos por Likens et al. (1977), donde P es considerablemente mayor que E_T y el valor de la E_A se mantiene prácticamente constante, ya que el proceso transpiratorio no resulta casi nunca afectado por la falta de disponibilidad de agua (Roberts 1999).

Por otra parte, en el período húmedo (figura 9) la cuenca de San Juan y Martínez no mostró significación en la relación E_A y P , (figura 9 c); en la cuenca del Cuyaguaje la regresión tiene una significación de $p < 0,05$ (figura 9 b); y en Mantua es donde mejor resulta la aplicación del modelo ya que la significación de la relación es de $p < 0,001$ (figura 9 a). Para intentar explicar este gradiente de significación se puede afirmar que en San Juan y Martínez, en el período húmedo, se evapotranspira solo el 53 % de la precipitación que se recibe, en el Cuyaguaje ese valor porcentual es del 57 % y en el caso de Mantua del 58 %. Los valores de E_T correspondientes a esa época en los dos primeros sectores son respectivamente 941 y 1 000 mm, mientras que los volúmenes de lluvia son 1 293 y 1 398 mm, en cada caso.

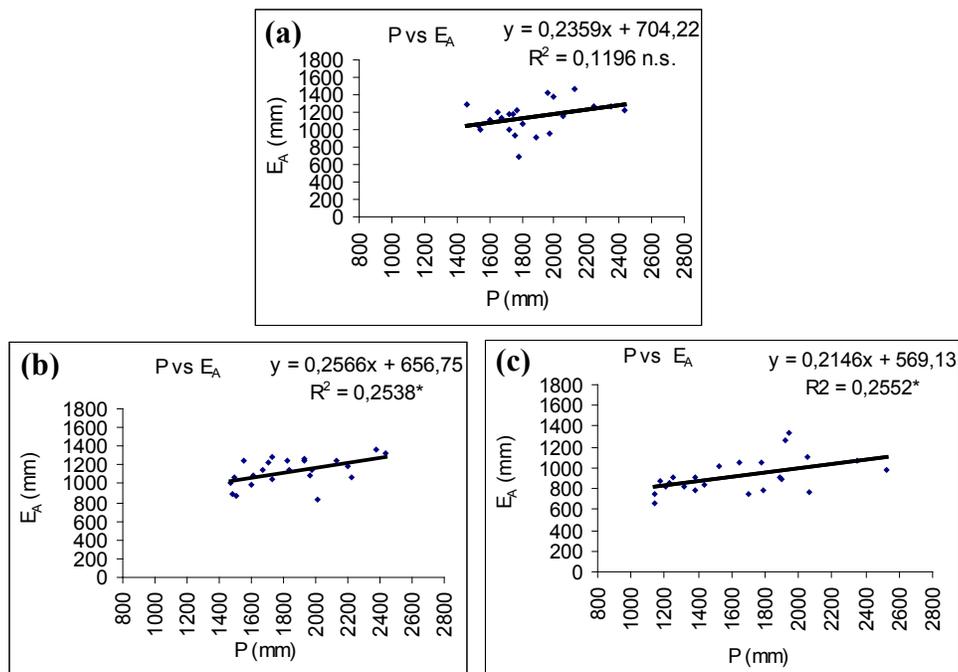


Figura 8. Regresiones lineales entre P y E_A para los años hidrológicos completos en las cuencas: (a) Mantua, (b) Cuyaguateteje y (c) San Juan y Martínez

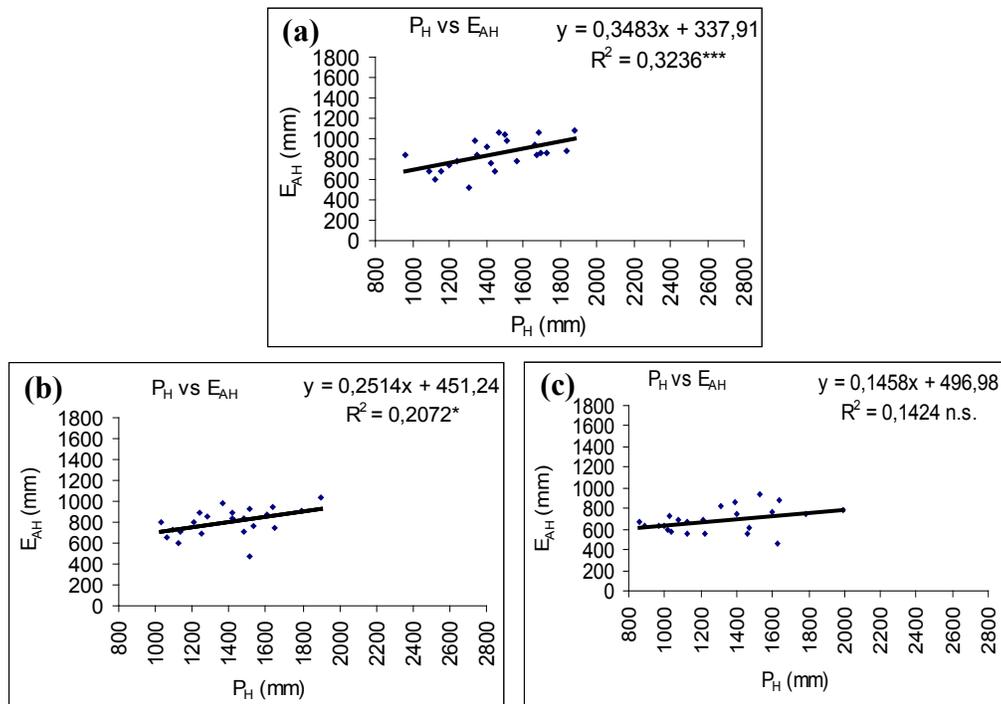


Figura 9. Regresiones lineales entre P_H y E_{AH} para época húmeda en los sectores superiores: (a) Mantua, (b) Cuyaguateteje y (c) San Juan y Martínez

Lo más relevante en este estudio, son los resultados obtenidos en el período seco en las tres áreas (figura 10), donde se muestra que las regresiones lineales son muy significativas ($p < 0,001$). Todo ello parece indicar que la lluvia caída durante este período tiene siempre una respuesta en el flujo atmosférico debido a que la vegetación mantiene una capacidad de transpiración que supera la disponibilidad de agua en el suelo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las características y capacidad de almacenamiento de agua de la cuenca y la distribución anual de los valores de P y E_T pueden afectar esta respuesta de E_A a P en condiciones de sequía.

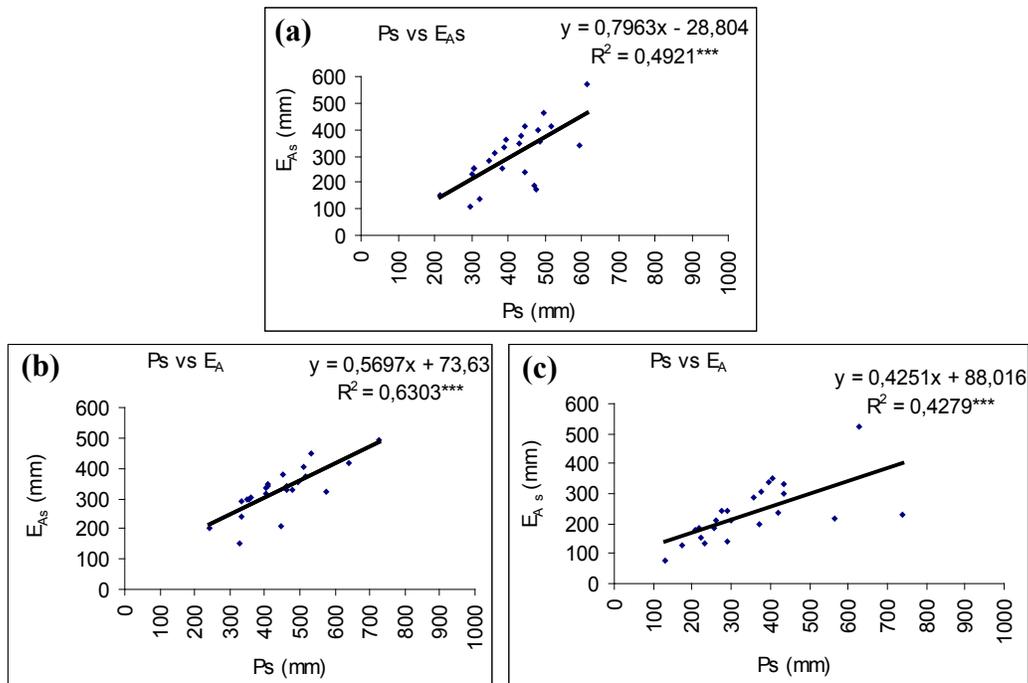


Figura 10. Regresiones lineales entre P_s y E_{As} para la época seca en los sectores superiores: (a) Mantua, (b) Cuyaguaje y (c) San Juan y Martínez

Los coeficientes de E_A están comprendidos entre 0,56 y 0,62, valores que se consideran acordes con los mosaicos de formaciones vegetales que predominan en los sectores superiores de las tres cuencas investigadas, bosques densos de pinos y latifolias. Resultados similares encuentra Plasencia (2010), en un estudio realizado en la estación la Amistad, en la región Occidental de Pinar del Río, en una cuenca control con pinar natural muy denso, el coeficiente de E_A fue de 0,71, valor que se corresponde con los reportados para otros bosques de pino del mundo (Bosch and Hewlett 1982), (Meng et al. 2001).

En la tabla 2 se resume el comportamiento de los tres componentes del balance hídrico para cada uno de los sectores investigados. La lluvia promedio del período es bastante similar en el caso de Mantua y Cuyaguaje e inferior en el caso de San Juan y Martínez. Los volúmenes de escurrimiento anuales son muy similares para las tres cuencas, mientras que los valores de evapotranspiración son mucho menores en San Juan y Martínez resultado en el que tiene una

marcada incidencia la menor densidad de vegetación de pinares y latifolias que presenta esta cuenca en su composición florística.

En estudios precedentes, González (1981) estima un valor de evapotranspiración para el sector superior V Aniversario del río Cuyaguaje de 854 mm, y de 850 para el cierre El Tabaco, en el río San Juan y Martínez. Posteriormente Gutiérrez (1994) estima valores para estos mismos sectores de 956 y 979 mm respectivamente, que se aproximan más a los obtenidos en esta investigación, pero debe tenerse en cuenta que cada una de las investigaciones mencionadas se realiza en períodos de años no coincidentes.

Tabla 2. Resumen del balance hídrico hiperanual (mm) para los tres sectores

SECTORES	LLUVIA (P)	ESCURRIMIENTO (Q)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (E _A)
Mantua	1 863 ± 54,5	719 ± 54,3	1144 ± 37,2
Cuyaguaje	1 842 ± 60,3	713 ± 52,1	1129 ± 30,7
S.J. Martínez	1 640 ± 83,1	719 ± 72,0	921 ± 35,3

En INRH (2000) con datos de los afluentes Guasimal y Frío, ambos ubicados en la cuenca del río Cuyaguaje, se calculan valores de evapotranspiración de 874 y 967 mm respectivamente. En este mismo estudio se da un valor de evapotranspiración de 972 mm para el cierre del embalse El Mulo, ubicado en el sector superior Cuyaguaje, para el que también León (2001) estimó un valor de 719 mm.

CONCLUSIONES

- En los sectores superiores de las cuencas Mantua y Cuyaguaje, solo el 38 % de la precipitación anual se convierte en escurrimiento, y hasta el 42 % en el caso del de San Juan y Martínez. En las épocas secas los porcentajes de escurrimiento son 27,3, 26,4 y 32 % respectivamente.
- No existen diferencias significativas entre los coeficientes de escurrimiento de los tres sectores, por lo que, en coincidencia con lo investigado por Gutiérrez (1994) debe descartarse la existencia de pérdidas subterráneas relevantes en el sector superior del Cuyaguaje. Es decir, se demuestra el cumplimiento lineal de los valores de escurrimiento con las características geomorfológicas y geológicas de las zonas de estudio.
- Las regresiones lineales entre P y Q en el conjunto del año, y para la época húmeda, son en todos los casos muy significativos ($p < 0,001$). Sin embargo la intensa competencia entre las vías de transpiración y escurrimiento se pone de manifiesto en esta área de la Sierra de los Órganos, dado que las regresiones lineales entre P y E_A en época seca, son las más significativas.

REFERENCIAS

- Buttle J. M.** (1998). "Fundamentals of small catchments hydrology". In: Isotope tracers in catchment hydrology, (Kendall C. and Mc Donnell J.J. eds.) pp. 1-43. Elsevier. Holland.
- Batista J. L. y Rodríguez J.** (1986). "Determinación de la influencia del carso en el régimen de escurrimiento de los ríos de Cuba". Resultados preliminares. Ciencias de la Tierra y del Espacio. 12:56-83. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana.
- Bosch J. M. and Hewlett J. D.** (1982). "A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration". Journal of Hydrology. 55:2-23. Elsevier, Amsterdam, Holland.
- CITMA** (2004). "Estrategia Ambiental Nacional". Dirección de Política Ambiental, Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), La Habana, 35 pp.
- Gutiérrez H. J. E.** (1994). "Regularidades espaciales y temporales de los recursos hídricos del Occidente de la Isla de Cuba", Tesis doctoral, Facultad de Geografía, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba.
- González J. I.** (1981). "El escurrimiento fluvial y el balance hídrico del Occidente de Cuba". Tesis de Candidatura. Univ. Estatal de Moscú, 180 p., Moscú, Unión Soviética.
- González J. I.** (1988). "Hidrología Práctica". Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de La Habana, Cuba.
- INRH** (2000). "Catálogo de Cuencas Hidrográficas: Río Cuyaguaje", Informe técnico, 16 pp. Instituto Nacional Recursos Hidráulicos, Pinar del Río.
- Jones J. A. A.** (1997). "Global Hydrology: processes, resources and environmental management": Addison Wesley Longman (Pearson Education), pp.1-20. United Kingdom.
- Likens G. E., Bormann F. H., Pierce R. S., Eaton J. S. and Johnson N. M.** (1977). "Biogeochemistry of a forested ecosystem". Editorial Springer-Verlag New York, Inc. New York.
- Lvovitch S. A.** (1959). "Hidrología Práctica". Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de La Habana, Cuba, 110 p.
- León J. J.** (2001). "Nuevas perspectivas para el uso del agua y la gestión de los recursos vegetales en la cuenca del río Cuyaguaje". Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, España.
- Meng G., Lang N., Fang X., Li G., Yuan C. and Wen S.** (2001). "Hydrological properties and water balance of Pinus armandii in Central Dian Plateau, Yunnan Province". Forest Research-Chinese Academy of Forestry; 14 (78-84), Beijing, China.
- Piñol J., Ávila A. and Escarré A.** (1999). "Water-balance in catchments". In: Ecology of Mediterranean evergreen oak forest. (Rodà F., Retana J., Gracia C. A., Bellot J. Eds.) (pp. 283-295). Ed. Springer-Verlag, Series Ecological Studies 137, Berlin, Germany.
- Plasencia T.** (2010). "Caracterización hidrológica en los ecosistemas de pinares naturales con y sin manejo en la Estación Hidrológica Forestal Amistad, Alturas de Pizarra". Tesis de doctorado, Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba
- Schlesinger W. H.** (2000). "Biogeoquímica. Un análisis del cambio global". Editorial Ariel Ciencia. Barcelona, España.