

RECURSOS DE AGUA EN EL BOSQUE NACIONAL EL YUNQUE, LUQUILLO, PUERTO RICO

**Por
Ferdinand Quiñones, PE**

RESUMEN

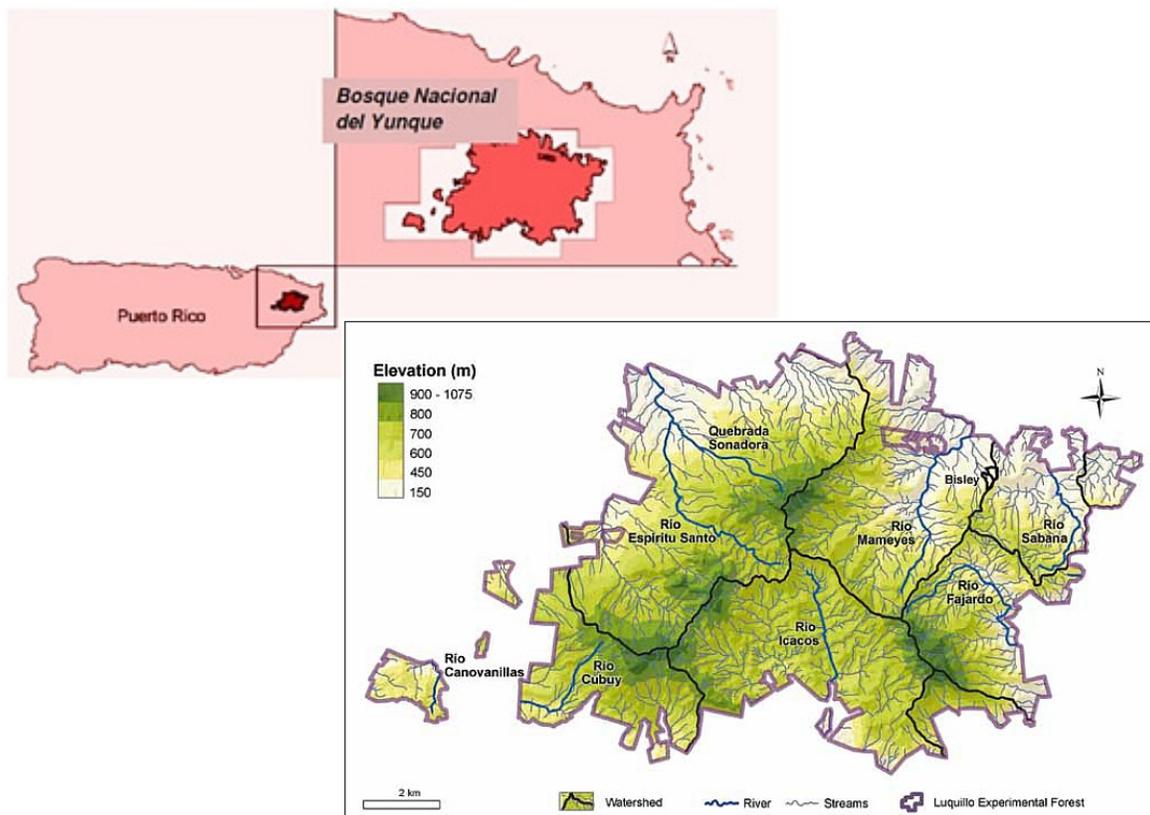
Este artículo incluye un análisis de los recursos de agua en el Bosque Nacional El Yunque, ubicado en la Sierra de Luquillo en el este de Puerto Rico. El Yunque es uno de los recursos naturales más importantes en Puerto Rico, reconocido mundialmente y parte de la red nacional de parques administrados por el Servicio Forestal Federal (USFS). El bosque lluvioso que forma parte de la reserva forestal recibe lluvias cuantiosas la mayor parte del año, que induce escorrentías extraordinarias. La escorrentía que emana de El Yunque se aumenta por la condensación de la humedad en las nubes sobre la vegetación y los suelos de la reserva. El artículo provee un análisis detallado del balance de agua en El Yunque, definiendo las variaciones espaciales y temporales de la precipitación (lluvia y condensación) y la escorrentía que emana de la reserva. Datos de estaciones pluviométricas e hidrológicas operadas por el Servicio Nacional de Meteorología (NWS) y el Servicio Geológico Federal (USGS) conjuntamente con información fisiográfica del área propia del bosque se utilizaron para el análisis. Estudios previos del clima y la hidrología de El Yunque contribuyeron a definir el ciclo hidrológico de El Yunque.

Los resultados establecen que la precipitación promedio anual en El Yunque varía de 90 a 215 pds, con un promedio de 140 pds. Estudios anteriores han establecido que aproximadamente 30 pds de lluvia se condensan en la vegetación y suelos en las laderas del bosque, contribuyendo a una escorrentía promedio anual potencial de 92 pds. El valor de la escorrentía promedio anual medida en las estaciones operadas por el USGS en los ríos que emanan de El Yunque es de aproximadamente 71 pds, siendo la diferencia de 21 pds agotada por la evapotranspiración en el bosque y sus laderas. En años de sequías severas como en el 1994, la escorrentía que emana de El Yunque se reduce a aproximadamente 104 mgd en comparación con máximos de 365 mgd en años de lluvia abundante y un promedio a largo plazo de 250 mgd. Durante sequías severas, las extracciones de agua por la AAA (67.6 mgd) reducen los flujos en los ríos que emanan de El Yunque al mínimo absoluto para el mantenimiento de la calidad del agua y la vida acuática. No existe potencial alguno para extracciones adicionales de agua en los ríos que emanan de El Yunque, excepto que se desarrollaran embalses en la parte baja de las cuencas fuera de la reserva para almacenar parte de la gran cantidad de escorrentía que fluye hacia el mar anualmente durante los meses de lluvia. La viabilidad de esto es mínima debido al desarrollo urbano extenso en los valles al norte, este y sur de las laderas de El Yunque.

INTRODUCCION

El Bosque Nacional El Yunque, anteriormente conocido como el Bosque Nacional del Caribe, es la zona de mayor lluvia en Puerto Rico. El Yunque se refiere propiamente a la montaña en la Sierra de Luquillo en el este de la Isla donde ubica el bosque lluvioso de El Yunque, con una extensión de aproximadamente 42.8 millas cuadradas (mi²) (27,392 acres). La cima del Yunque tiene una elevación de 3,492 pies (1,065 metros, m) sobre el nivel del mar. El Yunque es una reserva federal manejada por el Servicio Forestal Federal (Departamento de Agricultura Federal) con la cooperación del DRNA y otras agencias locales y federales. La reserva es uno de los recursos naturales más importantes y una de las atracciones turísticas principales en Puerto Rico. El Bosque Experimental de Luquillo tiene la misma delimitación geográfica que la de El Yunque, representando la zona de El Yunque donde se llevan a cabo investigaciones hidrológicas y ecológicas a largo plazo.

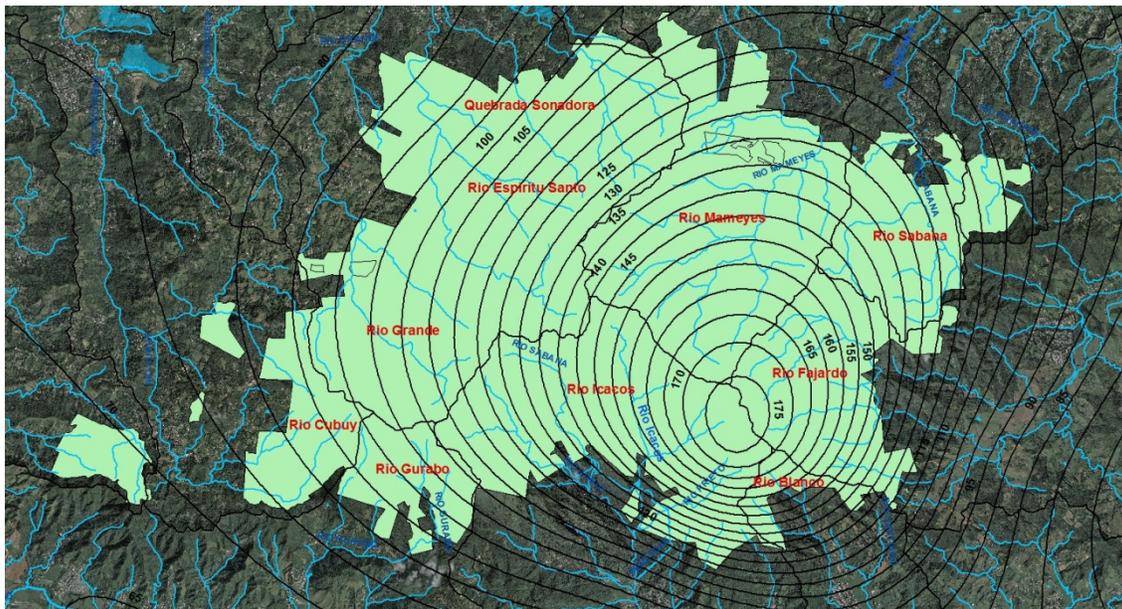
Figura 1. Localización del Bosque Nacional El Yunque y cuencas principales en la reserva.



CLIMA Y HIDROLOGIA

La características hidrológicas más prominentes de El Yunque son la lluvia copiosa con un promedio anual de aproximadamente 140 pulgadas (pds), y la abundante escorrentía que esta lluvia genera (Figura 2). Frecuentemente se cita el promedio de lluvia de El Yunque en exceso de 200 pds por año, pero este valor representa el total mayor de lluvia en la cúspide de El Yunque medida por el NWS en un año (215 pds en 1986, NWS, 2012). Como se ilustra más adelante, el balance de agua del sistema hidrológico de El Yunque revela que la cantidad de escorrentía es mayor que la resultante de la lluvia (P) menos la Evapotranspiración Actual (Eta). Esto es debido a la condensación en la vegetación y suelos de El Yunque de parte de la humedad en las nubes que arrojan la zona la mayor parte del tiempo. Ecológicamente, El Yunque es un ecosistema de gran diversidad y riqueza de especies variadas. Investigaciones sobre los bosques y la ecología de El Yunque se han llevado a cabo por décadas, y continúan al presente principalmente bajo el liderazgo del Instituto Internacional de Dasonomía Tropical ((IIDT, USDA), así como el USGS, el DRNA, y varias universidades en EUA. Estudiantes e investigadores locales, nacionales e internacionales laboran en definir las interacciones entre los diferentes componentes físicos, químicos, biológicos e hidrológicos de la reserva del Yunque.

Figura 2. Ríos principales que emanan del Bosque Nacional El Yunque y contornos de precipitación promedio anual.

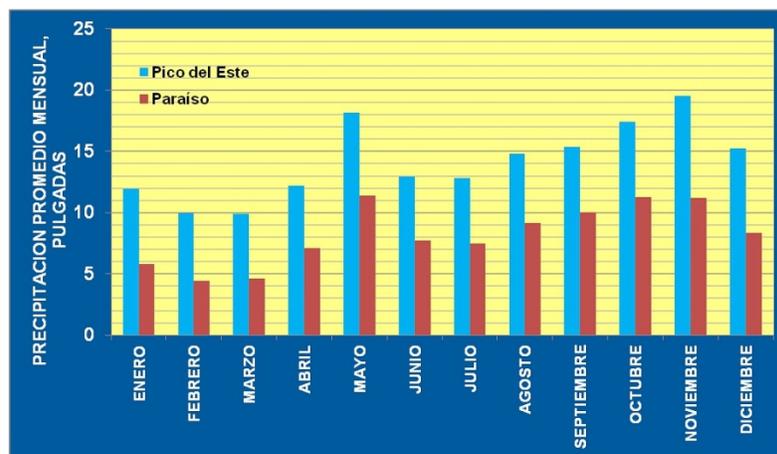


Fuente, DRNA y NWS

Estudios anteriores sobre el clima en El Yunque (particularmente el de García Martínó en 1996) documentan el aumento en lluvia con los cambios en elevación, siendo lo

inverso para la temperatura. Históricamente la lluvia en El Yunque varía en el año y entre años. Anualmente el régimen de lluvia sigue el patrón de Puerto Rico del período de sequía hasta abril, aguaceros frecuentes en mayo y junio, un segundo período seco en julio y agosto, y la temporada de lluvias y huracanes desde septiembre a diciembre. Los patrones mensuales de P en las estaciones de Paraíso (elevación de 75 m snm) y Pico del Este (750 m snm) se ilustran en la Figura 3, donde se documentan las variaciones en tiempo y con la elevación de la estación (NWS, 2012).

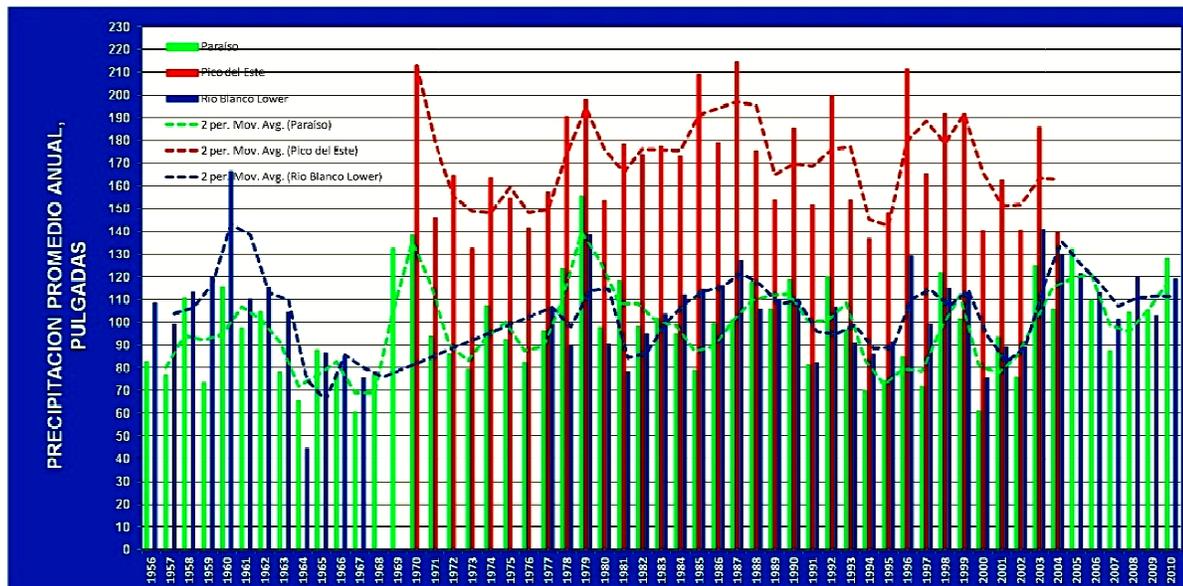
Figura 3. Precipitación promedio mensual en las estaciones de Pico del Este y Paraíso en el Bosque Nacional El Yunque, años 1956-2010 .



Fuente, NWS

La precipitación en El Yunque aumenta con la elevación de los montes que forman la reserva forestal, según se ha documentado en las estaciones pluviométricas operadas por el NWS, el IITF y otras organizaciones. Datos en tres de las estaciones operadas por el NWS en El Yunque y su periferia se ilustran en la siguiente Figura 4. La estación de Pico del Este ubicada en las cercanías de la cima de El Yunque (descontinuada en el 2005), mientras que la de Paraíso ubicada en los lindes entre El Yunque y la cuenca baja del Río Fajardo. La estación Río Blanco Abajo ubicada en las laderas sur de El Yunque en la parte baja del Río Icacos, que forma luego el Río Blanco. La gráfica incluye los promedios acumulativos anuales (“running average”) calculado cada dos años para reflejar las tendencias a largo plazo en los patrones de lluvia. En ninguna de las tres estaciones es aparente un incremento o reducción en la lluvia promedio anual a largo plazo que recibe El Yunque.

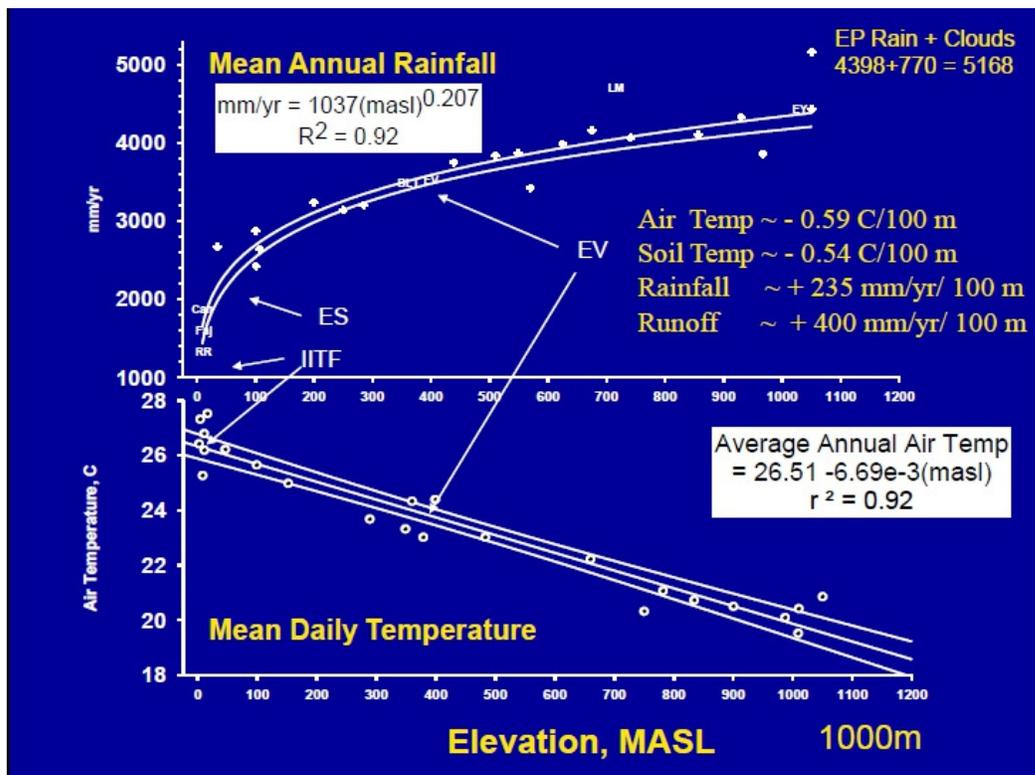
Figura 4. Precipitación promedio anual en el Bosque Nacional El Yunque, 1956-2010.



Fuente, NWS

En 1996, García Martínó llevó a cabo un estudio sobre la distribución vertical de la lluvia y temperaturas en El Yunque, como parte de su tesis de maestría. Usando los datos de lluvia disponibles, García Martínó derivó una correlación gráfica de estas relaciones, expresada en una regresión matemática de gran confiabilidad estadística (1996). Esta correlación, y las regresiones entre los valores de P_a y T contra la elevación en El Yunque (modificadas por Scatena (2006) se ilustran en la Figura 5. Las regresiones en esta figura se han utilizado por varios investigadores para estimar el ciclo hidrológico (o balance de agua) de El Yunque. Este modelo generalizado estima razonablemente los valores de P_a y T en diferentes puntos de El Yunque. Sin embargo, la distribución espacial de la lluvia en El Yunque no es uniforme en todas sus laderas. Existen diferencias en las tasas de lluvia y elevación entre las laderas sur y norte, lo cual el modelo no considera.

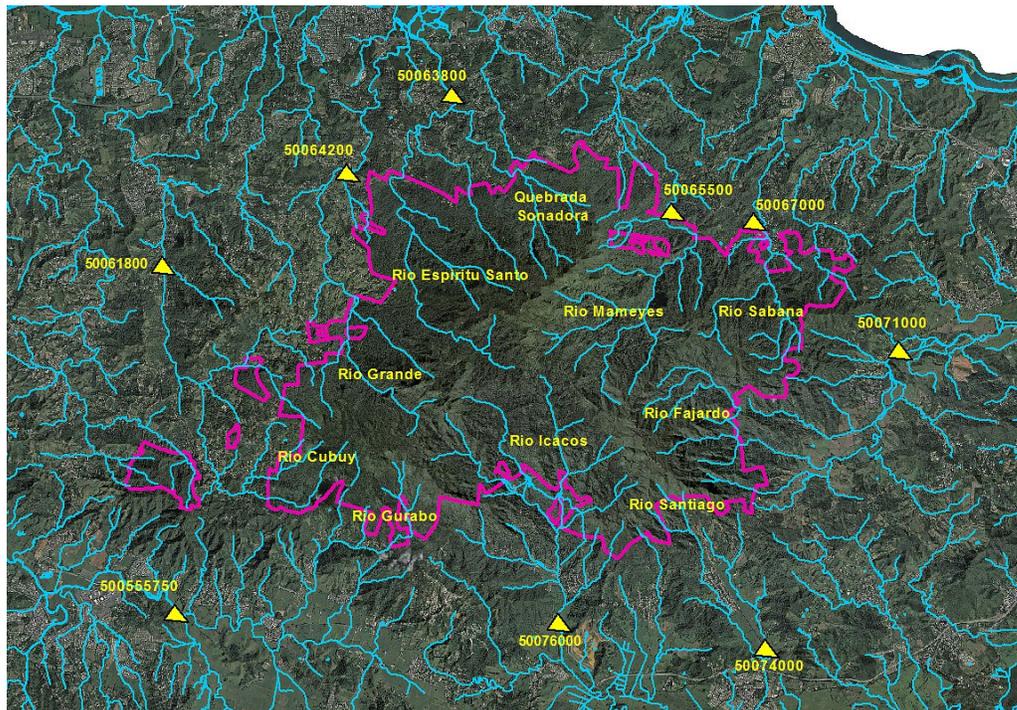
Figura 5. Correlaciones entre la elevación en el Bosque Nacional El Yunque y los valores de temperatura y la cantidad de precipitación (García Martínó, 1996)



ESCORRENTIA QUE FLUYE DESDE EL YUNQUE

Las intensas y continuas lluvias que se precipitan en El Yunque inducen escorrentías abundantes y continuas en la red de quebradas y ríos que drena el área de la reserva. Las quebradas y ríos principales, así como las estaciones en la periferia de El Yunque donde el USGS mide la escorrentía que emana del bosque, se ilustran en la Figura 6 (USGS, 2012). Los datos de flujos instantáneos, promedios diarios, y promedios anuales de Q obtenidos por el USGS permiten evaluar en tiempo y espacio el régimen de la escorrentía de El Yunque. Esta información es crucial para las investigaciones ecológicas e hidrológicas que se llevan a cabo continuamente en la reserva.

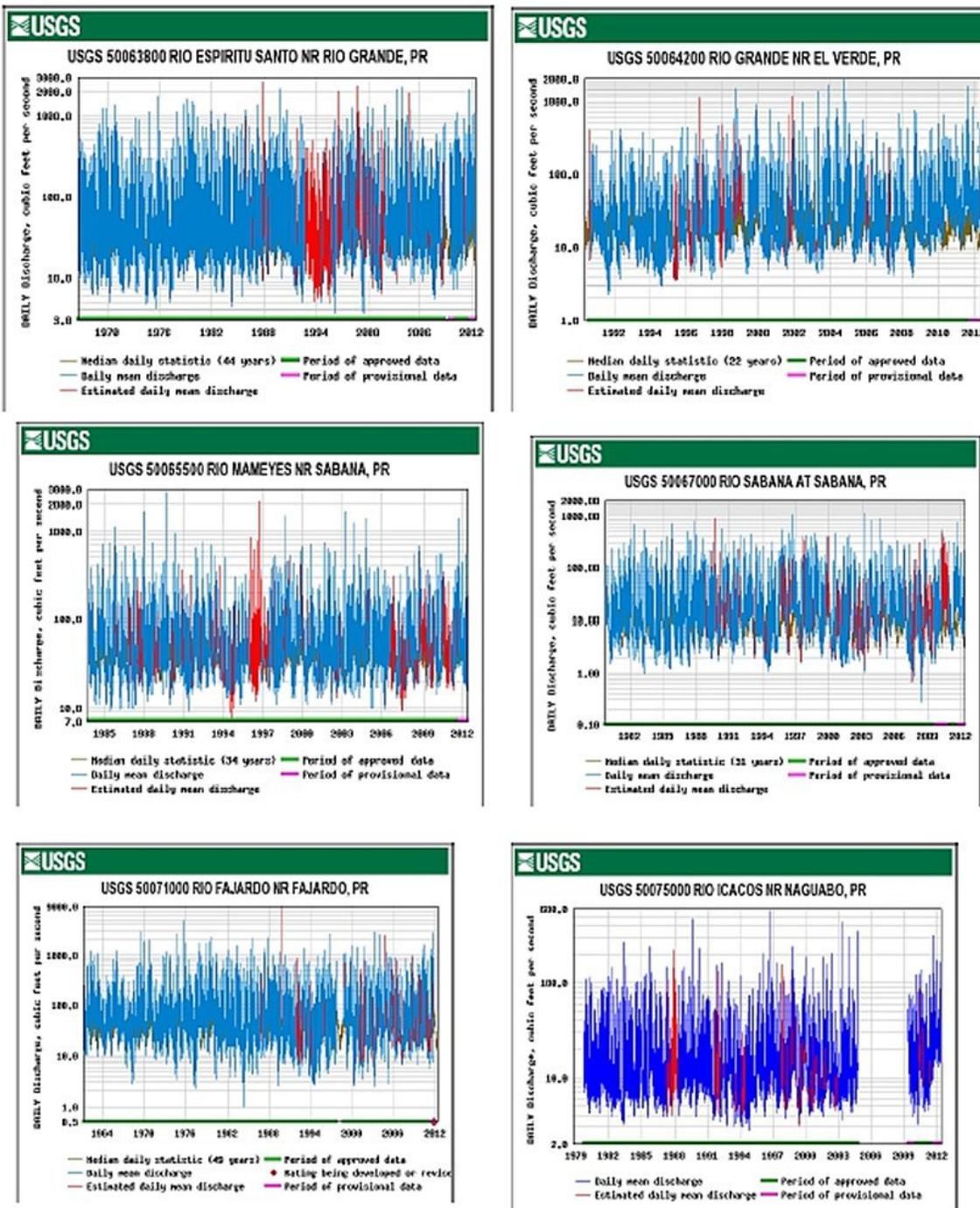
Figura 6. Estaciones de medir flujos continuos en la periferia de El Yunque.



Fuente, USGS

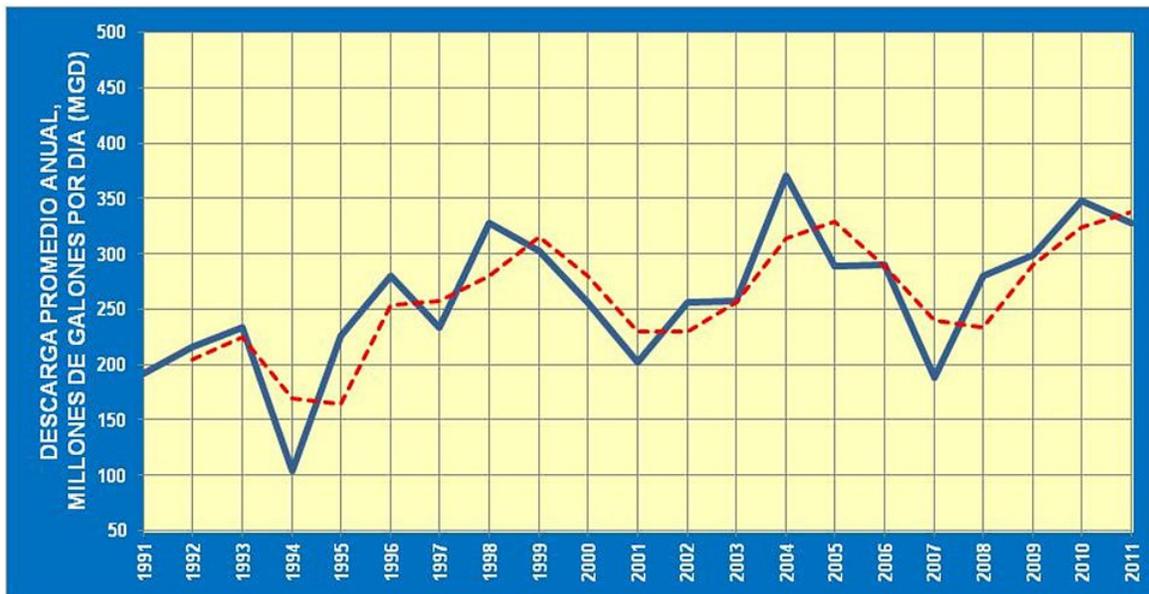
La suma total de la escorrentía proveniente de El Yunque varía anualmente en proporción a la lluvia. Los hidrogramas de los valores de Q promedio diario (Qpd) en las estaciones principales operadas por el USGS en la periferia de El Yunque para el período de 1991 al 2011 (período con el mayor número de estaciones operando) se resumen en la Figura 7. Estas series fueron analizadas para evaluar la tendencia de Q_{pa} a largo plazo. Primeramente se obtuvo el valor de Q_{pa} para el período de record de cada estación (disponible en los informes anuales de datos del USGS (*Water Resources Data for Puerto Rico, Water Year 2011*)), en su página en el Web. Estos informes incluyen el valor de Q_{pa} para el record histórico de la estación, datos que se resumen más adelante. Los hidrogramas demuestran la abundancia y consistencia de la escorrentía que proviene de El Yunque. La alta frecuencia de picos significativos resulta de los eventos extraordinarios de lluvia inducidos por vaguadas, frentes de frío, temporales y huracanes. Los efectos de las sequías periódicas que afectan a Puerto Rico también son evidentes en estos hidrogramas en la periferia de El Yunque. La gran sequía de 1994 se destaca en la mayor parte de las estaciones.

Figura 7. Hidrogramas del flujo promedio diario en las estaciones operadas por el USGS en la periferia de El Yunque.



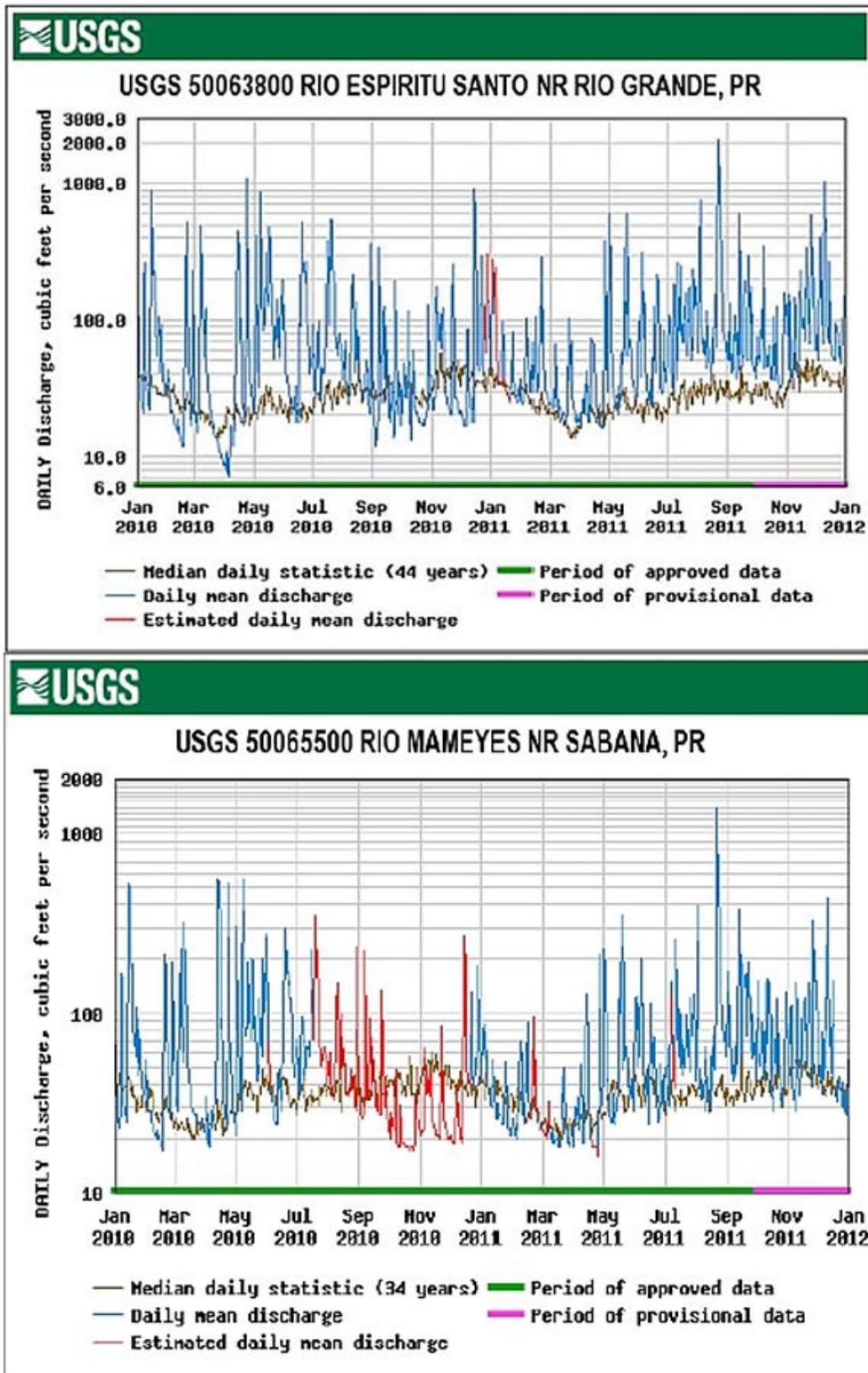
El valor total de la escorrentía Q que emana de El Yunque (la suma del flujo promedio anual, Q_{pa} , en todas las estaciones del USGS) se ilustra en millones de galones por día (mgd) en la Figura 8. El período de datos es del 1991 al 2011 y se escogió por ser el más completo de todas las estaciones del USGS. Esta figura incluye la tendencia acumulativa (“running average”, línea roja cortada) para el período de datos, reflejando un promedio al 2011 de aproximadamente 330 mgd fluyendo desde El Yunque. En comparación, el año de menor escorrentía en el período ilustrado fue el 1994, cuando ocurrió la sequía histórica que afectó casi toda la región norte de Puerto Rico. El valor de Q_{pa} emanando de El Yunque fue solamente 104 mgd, el 31 % del flujo a largo plazo. Este dato demuestra que El Yunque también sufre sequías severas periódicamente.

Figura 8. Escorrentía promedio anual que emana de El Yunque.



La tendencia de los valores de Q_{pa} en la Figura 8 sugiere un aumento en el promedio. Sin embargo, esta serie de datos es de solamente 21 años, lo que impide concluir con confianza estadística si la tendencia es real o es un ciclo temporero de lluvias y escorrentías sobre el promedio. En el 2010 y 2011 la lluvia promedio en Puerto Rico excedió los máximos históricos para la Isla. Los hidrogramas de dos de las estaciones que drenan las cuencas principales de El Yunque para el 2010-11 (Rio Espíritu Santo y Rio Mameyes) se ilustran en la siguiente Figura 9, que incluye los promedios mensuales históricos. El flujo promedio diario (Q_{pd}) en ambas estaciones excedió significativamente el valor histórico. En ambas estaciones también se destaca la sequía moderada que experimentó la Región Norte a finales del 2010.

Figura 9. Escorrentía promedio diaria en el año 2010 en las estaciones de medir flujos operadas por el USGS en los ríos Espíritu Santo y Mameyes.



Un método para comparar la extraordinaria producción de escorrentía de El Yunque es calculando su producción por milla cuadrada de área de captación y compararla con otras cuencas en Puerto Rico. En el caso de las cuencas que drenan desde El Yunque, la producción promedio anual en pies cúbicos por segundo por milla cuadrada (pcs/mi²) se ilustra en la tabla 1 abajo, variando desde un mínimo de 1.95 pcs/mi² hasta un máximo de 8.27 pcs/mi². El valor bajo de 1.95 pcs/mi² se debe a que la mayor parte de la cuenca del Rio Gurabo en el Mangó está fuera del centro de lluvia de El Yunque. La tabla también ilustra la producción en pcs/mi² de varias cuencas en los centros de lluvia de Puerto Rico, en estaciones en zonas relativamente despobladas. El rendimiento por milla cuadrada de estas cuencas es mucho menor que las de El Yunque.

Tabla 1. Escorrentía promedio anual en pies cúbicos por segundo (pcs) y en pcs/milla cuadrada (pcs/mi²) y por milla cuadrada de drenaje en las estaciones de medir flujos del USGS en la periferia de El Yunque y otras estaciones fuera de El Yunque.

RIO	ESTACION USGS	AREA CAPTACION EN ESTACION USGS, Mi ²	ESCORRENTIA PROMEDIO ANUAL (Qpa), PCS	ESCORRENTIA PROMEDIO ANUAL (Qpa) POR mi ² , PCS/mi ²
Gurabo cerca del Mangó	50055750	22.30	43.40	1.95
Canóvanas en Campo Rico (Cubuy)	50061800	9.84	28.50	2.90
Espiritu Santo cerca Rio Grande	50063800	8.62	59.50	6.90
Grande en el Verde	50064200	7.31	42.30	5.79
Mameyes en Sabana	50065500	6.88	56.90	8.27
Sabana en Sabana	50067000	3.96	20.40	5.15
Fajardo cerca Fajardo	50071000	14.90	68.10	4.57
Santiago en Naguabo	50074000	4.99	25.00	5.01
Blanco cerca de Florida	50076000	12.30	95.70	7.78
Tanamá cerca Utuado	50028000	18.40	50.90	2.77
Bauta cerca de Orocovis	50034000	16.70	40.20	2.41
Grande Patillas cerca de Patillas	50092000	18.30	63.20	3.45
Rosario cerca de Hormigueros	50136400	18.30	53.90	2.95

BALANCE DE AGUA DE EL YUNQUE

El ciclo hidrológico o balance del agua del área que comprende el Bosque Nacional de El Yunque (definido también en las investigaciones como el Bosque Experimental de Luquillo, "LEF") ha sido estimado por varios investigadores. En mayo del 2012, el Instituto Internacional de Dasonomía Tropical publicó un informe titulado "Luquillo Experimental Forest: Research History and Opportunities" (IIDT, 2012), donde se resumen entre otros temas varios de los estudios sobre la hidrología y el balance de agua en El Yunque. En estos estudios la finalidad fue estimar la precipitación promedio anual (Pa), la escorrentía promedio anual (Qpa), y la evapotranspiración actual (Eta) en

los lindes de El Yunque. Los estimados de lluvia incluyen evaluaciones de la contribución de la condensación (C) directa sobre la cubierta de El Yunque separada de la precipitación pluvial. Los estimados de escorrentía se basan en datos de las estaciones de medir Q operadas por el USGS. La diferencia entre la suma de Pa más C (precipitación total) menos Qpa se asume corresponde a Eta. El factor de infiltración a los suelos y acuíferos no se considera, pues en el ciclo hidrológico anual estos factores son menores ya que el almacenaje mínimo que ocurre está en equilibrio (la cantidad que se infiltra es igual a la que retorna a las quebradas). En el área de El Yunque no existen rocas ni depósitos no-consolidados que formen acuíferos de importancia. Las rocas son generalmente de origen volcánico, induradas y de baja porosidad. Los suelos son de poco espesor y lo empinado de las laderas de El Yunque promueve que el agua que se infiltra a los suelos descargue rápidamente a los cientos de quebradas y riachuelos en el bosque. Los estimados del balance de agua en El Yunque obtenido en los estudios llevados a cabo como parte de las investigaciones del IIDT y el LEF se resumen en la siguiente Figura 10 del estudio de Crooks, Scatena y otros (2007).

Figura 10. Balance hidrológico en El Yunque estimado por Instituto Internacional de Dasonomía Tropical del Departamento de Comercio Federal.

Table 18. Comparison of water budgets for the Luquillo Experimental Forest. Numbers in parentheses indicate the percentage of total precipitation in each component.

Study	Precipitation (mm yr ⁻¹)	Runoff (mm yr ⁻¹)	Evapotranspiration (mm yr ⁻¹)
Lugo (1986)			(42%)
Naumann (1994)	3,390	2,070 (61%)	1,320 (39%)
García Martinó et al. (1996)	3,869	2,526 (65%)	1,338 (35%)
Crook et al. (2007)	3,580	2,280 (64%)	1,300 (36%)
Wu et al. (2006)*			1,021

*Based on model of evapotranspiration by Granger and Gray (1989).

En la siguiente sección se presenta un análisis del balance de agua en El Yunque en el cual el valor de P promedio anual (**Pa**) en los lindes de la reserva se obtuvo integrando celdas de tamaño igual con zonas de lluvias del mismo valor (basado en los mapas de **Pa** del NWS). El valor de la escorrentía **Qpa** que emana de El Yunque se obtuvo de los datos medidos en las estaciones que opera el USGS, con correcciones para tomar en cuenta las áreas de drenaje entre los lindes de El Yunque y la ubicación de estas estaciones. Este método utiliza datos de campo actualizados que toma en cuenta las diferentes tasas de aumento de lluvia con elevación en las diferentes laderas de El Yunque.

El primer paso en calcular el balance de agua de El Yunque consistió en determinar la cantidad total de lluvia anual (**Pa**) que se precipita sobre el área del bosque. Como se

anterior y la tabla siguiente son en pulgadas anuales. Estos cálculos resultaron en un valor promedio de **Pa** para el área que ocupa la reserva de El Yunque de aproximadamente 126.4 pulgadas anuales (3,212 milímetros).

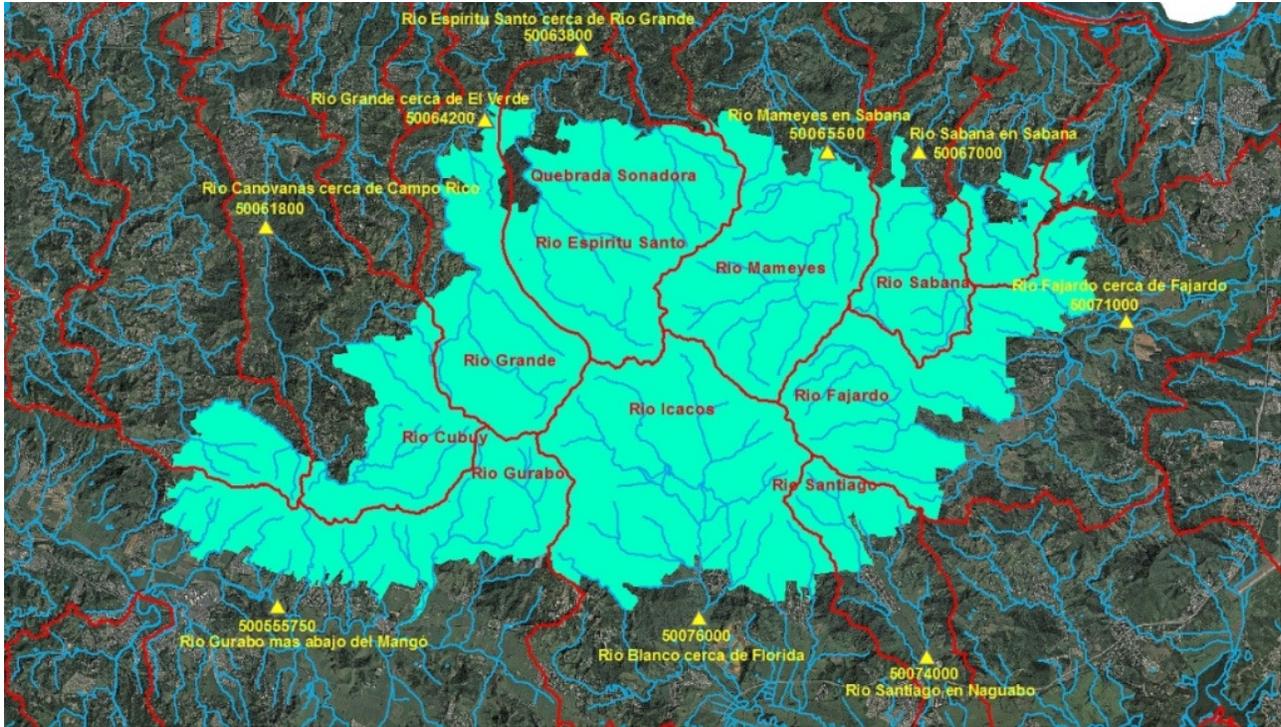
Tabla 2. Matriz de cálculos para estimar la precipitación promedio anual en las cuencas principales de El Yunque.

Precip	Mameyes	Mwtd	EspSanto	ESWtd	RGrande	RGWtd	Cubuy	CubWtd	Gurabo	GurWtd	Icacos	IcaWtd	Santiago	SanWtd	Fajardo	FajWtd	Sabana	SabWtd
175.0	2.5	437.5									3.5	612.5			2.0	350.0		
170.0	4.5	765.0									4.0	680.0			4.5	765.0		
165.0	5.5	907.5									4.0	660.0	1.5	247.5	4.5	742.5		
160.0	7.0	1,120.0									5.5	880.0	1.0	160.0	5.0	800.0		
155.0	8.0	1,240.0									5.5	852.5	1.5	232.5	6.0	930.0		
150.0	9.0	1,350.0									6.0	900.0	1.0	150.0	5.5	825.0	2.0	300.0
145.0	11.0	1,595.0									7.0	1,015.0	1.0	145.0	3.0	435.0	3.5	507.5
140.0	11.5	1,610.0	2.0	280.0							6.0	840.0	1.0	140.0	1.5	210.0	4.5	630.0
135.0	11.5	1,552.5	3.0	405.0							6.5	877.5	1.0	135.0	2.5	337.5	7.0	945.0
130.0	6.0	780.0	9.5	1,235.0							7.5	975.0	1.5	195.0	2.0	260.0	8.0	1,040.0
125.0	4.0	500.0	11.0	1,375.0							8.0	1,000.0	0.5	62.5	2.0	250.0	6.5	812.5
120.0	4.0	480.0	10.0	1,200.0	1.0	120.0					7.5	900.0					4.5	540.0
115.0	3.0	345.0	10.5	1,207.5	3.5	402.5					6.0	690.0					3.5	402.5
110.0	1.0	110.0	11.5	1,265.0	5.0	550.0					4.5	495.0					1.5	165.0
105.0			12.5	1,312.5	7.5	787.5					4.0	420.0						
100.0			9.0	900.0	9.0	900.0			3.5	350.0	2.5	250.0						
95.0			8.0	760.0	11.0	1,045.0			6.5	617.5								
90.0			7.5	675.0	4.0	360.0	5.5	495.0	5.0	450.0								
85.0			2.0	170.0			8.5	722.5	3.0	255.0								
80.0							6.0	480.0										
75.0							1.0	75.0										
Sum cells	88.5	12,792.5	96.5	10,785.0	41.0	4,165.0	21.0	1,772.5	18.0	1,672.5	88.0	12,047.5	10.0	1,467.5	38.5	5,905.0	41.0	5,342.5
Wtd Ave		144.5		111.8		101.6		84.4		92.9		136.9		146.8		153.4		130.3
Sum all cells		442.5																
Sum Wtd Prod		55,950.0																
Ave All		126.4 in		3,211.6 mm			QY	1,790.0		Eta=PYa-QY		1,421.6	Eta/QY	0.4				

Calculado el valor de P promedio anual (**Pa**) en el área de El Yunque, se procedió a determinar el monto de la escorrentía anual (**Qpa**). Los efluentes principales de El Yunque son los ríos Espíritu Santo; Mameyes; Rio Grande; Sabana; Fajardo; Icacos; Cubuy; Gurabo; y Santiago, que descargan hacia las costas norte y este-sureste (excepto el Rio Gurabo que retorna hacia el norte como tributario del Rio Grande de Loíza). El Rio Icacos es un tributario del Rio Blanco que fluye hacia Naguabo. La escorrentía descargada por estos ríos es determinada en las estaciones hidrográficas operadas por el USGS (Figura 12), donde se mide el flujo instantáneo cada 15 minutos (hasta cada 5 minutos durante crecientes). Utilizando estos datos, el USGS determina los valores del Q promedio diario (**Qpd**) y el Q promedio anual (**Qpa**) en cada estación. Estos valores son publicados por el USGS en su página en la Internet (<http://pr.water.usgs.gov>).

Las ubicaciones de las estaciones del USGS en la Figura 12 incluyen áreas de drenaje mayores que el área de las cuencas dentro de la reserva de El Yunque. Esto requiere que para obtener el valor neto de **Qpa** que emana de la reserva de El Yunque, los valores de **Qpa** individuales medidos por el USGS necesitan ajustarse para descontar la contribución de las áreas entre los lindes del Yunque y las estaciones.

Figuras 12. Ubicación de las estaciones de medir flujos operadas por el USGS en la periferia de El Yunque y matriz de cálculos para estimar la escorrentía promedio anual total que emana de El Yunque.



Datos de las estaciones, incluyendo el valor de Q_{pa} para el período de record de las estaciones se resumen en la Tabla 3 siguiente. El valor de Q_{pa} en la tabla de las estaciones del USGS es expresado en pulgadas para facilitar el cálculo final del balance de agua en El Yunque. Este valor de Q_{pa} en pulgadas se obtiene multiplicando el valor en pies cúbicos por segundo (pcs) por el área de captación de cada estación (mi^2), insertando los factores de conversión correspondientes para cambiar de unidades de pies cúbicos por segundo (pcs) a pulgadas por año. Multiplicando por 25.4 las pulgadas por año se obtienen milímetros de Pa anuales. La escorrentía total incluye ajustes por las extracciones de la AAA para las plantas de filtración aguas arriba de las estaciones (un promedio de 67.6 pcs, equivalente a 105 millones de galones por día, mgd). El valor ajustado de Q_{pa} incluyendo estas extracciones promedio diarias (en pcs) se ilustra en la última columna de la tabla en millones de metros cúbicos por año ($Mm^3/año$) para luego comparar este flujo anual con la escorrentía en El Yunque (Q_Y).

Las contribuciones a **Qpa** de las áreas fuera de El Yunque se calcularon utilizando comparaciones entre los valores de Pa pesados sobre toda la cuenca y sobre las áreas de interés. También se utilizó la razón del área de captación fuera de los lindes de El Yunque en relación al área total en las estaciones del USGS. Estos cálculos de ilustran en la siguiente Tabla 4.

Tabla 4. Matriz de cálculos del balance de escorrentía promedio anual que emana de El Yunque calculado de los datos de las estaciones operadas por el USGS.

RIO	ESTACION USGS	AREA CAPTACION EN ESTACION USGS, mi ²	AREA CAPTACION EN EL YUNQUE, mi ²	AREA CAPTACION ENTRE USGS Y YUNQUE, mi ²	PRECIPI-TACION PROMEDIO AREA FUERA YUNQUE, pulgadas	PRECIPI-TACION PROMEDIO AREA YUNQUE, Py pulgadas	mm	PRECIPI-TACION PROMEDIO (Pa) AREA TOTAL, pulgadas	ESCORRENTIA PROMEDIO (Q) AREA TOTAL, pulgadas	ESCORRENTIA EN EL YUNQUE QY=(PY/Pa)*(Qa) pulgadas	ESCORRENTIA PROMEDIO ANUAL EN EL YUNQUE (QY), millones metros cúbicos, Mm ³
Gurabo	50055750	22.30	2.06	20.24	68.00	93	2,362	70.31	27.93	36.94	5,009,923
Mameyes	50065500	6.88	6.70	0.18	125.00	144	3,658	143.50	39.32	39.45	17,403,344
Cubuy	50061800	9.84	9.19	0.65	75.00	85	2,159	84.34	101.01	101.80	61,596,869
Esp Santo	50063800	8.62	5.17	3.45	91.00	112	2,845	103.60	78.55	84.92	28,906,704
R Grande	50064200	7.31	4.64	2.67	86.00	102	2,591	96.16	121.43	128.81	39,350,056
Sabana	50067000	3.96	3.12	0.84	122.00	130	3,302	128.30	76.78	77.80	15,981,598
Fajardo	50071000	14.90	4.27	10.63	101.00	153	3,886	115.90	64.86	85.62	24,071,538
Santiago	50074000	4.99	0.64	4.35	65.00	140	3,556	74.62	68.01	127.60	5,376,542
Icacos	50076000	12.30	7.04	5.26	93.00	137	3,480	118.18	127.88	148.24	68,711,538
	TOTALES	91.10	42.83	48.27			3,026.20			92.35	266,408,112
									milímetros	2,346	
											9,401,542,266
											215,830

BALANCE DE AGUA EN EL YUNQUE

Los cálculos en las secciones y páginas anteriores nos permiten cuantificar los componentes principales del balance de agua del área que comprende el Bosque Nacional de El Yunque. Como se ilustrara anteriormente, este balance está definido por la ecuación siguiente:

$$QY = Qpa - Qo \text{ donde}$$

QY es la escorrentía generada en los lindes del Yunque

Qpa es la escorrentía total medida en las estaciones del USGS en la periferia del Yunque

Qo es la escorrentía generada en las áreas entre el Yunque y las estaciones del USGS

Estos valores se calcularon luego de determinar los valores de la lluvia promedio anual (**Pa**) en cada una de las cuencas principales que se originan en El Yunque. Los valores de **Pa** fueron segregados en sus componentes relativos al área dentro de los lindes del Yunque (**PY**), el área entre estos lindes y las estaciones del USGS en la periferia del bosque (**Po**), y el área general de captación en las estaciones del USGS (**Pa**).

Los valores correspondientes (en pulgadas y milímetros) de **QY** y **Qpa** son como sigue:

- Escorrentía promedio anual en los lindes del Yunque: (**QY**) = 92.35 pds (2,346 mm), equivalente a 266.4 millones de metros cúbicos (Mm³) por año
- Escorrentía promedio anual en las estaciones del USGS en la periferia de El Yunque (**Qpa**) = 71.05 pds (1,805 mm), equivalente a un flujo de 426.2 Mm³ por año
- El valor de la evapotranspiración actual (**Eta**) en los lindes de El Yunque se estimó como la diferencia entre el valor de **PY** menos **QY** (3,212 mm menos 2,346 mm = 866 mm). Esto resulta en un valor de **Eta** de solamente el 27 % de **PY**, lo que es extremadamente bajo comparado con los estimados anteriores. Es obvio que la diferencia se debe a que en este análisis no se separó en los lindes de El Yunque la contribución de la condensación directa de humedad sobre la cubierta del bosque. Estudios anteriores (Scatena, 2006) estiman esta contribución a la escorrentía del Yunque en aproximadamente 770 mm (18 % de la **PY** que registran los pluviómetros). Si añadimos esta condensación al valor de **PY** en El Yunque, resulta en una **PY** ajustada de 3,982 mm, lo que a su vez resulta en un valor de **Eta** de 1,636 mm, o el 42 % de **PY** ajustada. Este valor es comparable a los otros estudios citados en la página anterior.

CONCLUSIONES

La importancia hidrológica de El Yunque en Puerto Rico puede apreciarse mejor si comparamos su producción promedio anual de escorrentía (**Qpa**) con la que genera la cuenca del Río Grande de Manatí en Manatí. El USGS opera la estación 50038100 cerca de Manatí, donde el área de captación es de 197 millas cuadradas (mi²) y el flujo promedio anual es de 110,900 millones de galones (mg, equivalentes a 420.1 millones de metros cúbicos (Mm³)). En comparación y como se ilustra en las tablas anteriores, el flujo promedio anual de las cuencas en la periferia de El Yunque, con un área de captación combinada de 91.1 mi² (la mitad de la de la estación en el Río Grande de Manatí), es de 112,500 mg (426.2 Mm³), lo que es levemente mayor que la escorrentía en Manatí. Por otro lado, no debe asumirse que los ríos que emanan de El Yunque son una fuente potencial de extracciones extraordinarias adicionales de agua para usos domésticos, agrícolas o industriales. Como se indicara anteriormente, durante años de sequías severas como la de 1994, la escorrentía que emana de El Yunque puede ser tan baja como 104 mgd. Luego de las extracciones anuales de 67.6 mgd por parte de la AAA en los ríos que emanan del bosque y su periferia, los flujos residuales son apenas suficientes para el mantenimiento de la calidad del agua y la vida acuática.

REFERENCIAS

- Crook K.E., Scatena, F.N., Pringle C.M., 2007. Water Withdrawn from the Luquillo Experimental Forest in 2004. USDA Forest Service General Technical Report IITF-GTR-34.
- García-Martinó, A., Warner, G.S., Scatena, F.N., and Civco, D.L., 1996. Rainfall, Runoff and Elevation Relationships in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*, Vol. 32, No. 4, 41-24.
- Heartsill-Scalley T., Scatena F.N., Estrada C., McDowell W.H., Lugo A.E., 2007. Disturbance and long-term patterns of rainfall and throughfall nutrient fluxes in a subtropical forest in Puerto Rico. *Journal of Hydrology*, 33:472-485.
- Luquillo Experimental Forest: Research History and Opportunities, 2012. US Forest Service, USDA, 148 p.
- National Weather Service, US National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012. Precipitation data for Puerto Rico and the US Virgin Islands from 1955-2010, NWS Web page.
- Wei Wu, Hall C.A.S., Scatena F.N., 2007 Modeling the impact of land use change on the stream flows at the meso-scale watershed level in North-Eastern Puerto Rico. *Hydrological Processes* V21 DOI: 10.1002/hyp.6515 Scatena F.N. 2006. Editor. *Water Quality Trading in the Lower Delaware River Basin: A Resource for Practitioners* A Report to the William Penn Foundation. Institute of Environmental Studies University of Pennsylvania, 86 pages.
- U.S. Geological Survey, 1990-2011, Water Resources Data for Puerto Rico, annual reports of water data for Puerto Rico published by the Caribbean Science Center of the U.S. Geological Survey.