

MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE FLUJOS MÍNIMOS Y FLUJOS AMBIENTALES EN LOS RÍOS Y QUEBRADAS EN PUERTO RICO

Por

**Ferdinand Quiñones, PE, Hidrólogo
Brentwood, Tennessee**

RESUMEN EJECUTIVO

En esta ponencia se presentan métodos estadísticos para estimar los flujos mínimos en los ríos y quebradas en Puerto Rico. Estos flujos mínimos, incluyendo el Q99 y el 7Q10, son las herramientas estadísticas aceptadas para estimar los flujos ambientales necesarios para la conservación de la vida acuática y la calidad del agua. Además, se evalúa el método adoptado por el DRNA en el Plan Integral de Aguas para estimar los valores de Q99, concluyéndose que el mismo es una herramienta aproximada, pero que estadísticamente no es correcta ni defendible debido a que las correlaciones utilizadas son simplificaciones que no son representativas de la hidrología que define los flujos mínimos en Puerto Rico.

INTRODUCCIÓN

La definición de los “flujos ambientales” requiere utilizar métodos científicos precisos y rigurosos que sustenten la adopción de valores de flujo en los ríos y quebradas en Puerto Rico. La definición del “flujo ambiental” en un punto de un río varía dependiendo de varios factores, incluyendo la frecuencia de los flujos; la geometría y pendiente del canal donde se determina el flujo ambiental; la diversidad de la vida acuática; y los parámetros de calidad de agua que apliquen al punto o tramo donde se pretende establecer un flujo ambiental. La

combinación de estas variables resulta en complejidades extremas que no pueden resolverse en forma simple. Aunque la frecuencia de los flujos es definida por la hidrología de la cuenca bajo estudio (definida por la lluvia, evapotranspiración, geología, las pendientes de la cuenca; y la escorrentía residual), relacionar el flujo a la vida acuática y calidad del agua resulta en relaciones multi-paramétricas de complejidad enorme. Esto resulta en la necesidad de utilizar simplificaciones estadísticas que provean valores razonables a menos que se desarrollen modelos matemáticos hidrobiológicos que provean resultados más representativos de las condiciones reales. El desarrollo de estos modelos hidrobiológicos es complejo y costoso, por lo que su utilización es mínima excepto en casos como el del Superacueducto de la Costa Norte, donde el Cuerpo de Ingenieros (COE) requirió a la AAA desarrollar un modelo simple de la hidrobiología del estuario del Río Grande de Arecibo como parte del permiso para endosar la extracción de agua de dicho río para abasto público en la Región Norte.

Ante esta complejidad, se utilizan varios métodos estadísticos que permiten estimar con cierta confiabilidad los flujos mínimos en el punto de estudio, lo que a su vez puede utilizarse para establecer los flujos ambientales. Es preciso hacer referencia a la política pública de Puerto Rico en estos momentos, que es la que se ha promulgado en el Plan Integral de Aguas (Plan de Aguas). El Plan de Aguas fue adoptado en el 2007 por el DRNA, e incluye en su lenguaje interno la adopción prospectiva de una política pública de retener en los ríos y quebradas en la Isla el 100 por ciento de lo que se ha denominado como el "Q99". El Plan de Aguas contiene estimados de los valores de Q99 en las tomas de agua la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) en Puerto Rico. Esta política pública es controversial si se aplicara a muchas de las tomas existentes en ríos y quebradas en la Isla que la AAA ha operado por décadas. En muchas instancias durante períodos de sequía, la AAA tiene que extraer casi todo el caudal de muchas tomas en ríos y quebradas para poder suplir las demandas de agua potable a los residentes y negocios en el área de servicio de

sus plantas de filtración. La aplicación retroactiva de la regla de mantener el 100 % del Q99 adoptada por el DRNA impactaría severamente el servicio de agua potable en muchas zonas rurales de la Isla. La aplicación prospectiva de la Regla como adoptada también establece retos en lugares donde el bienestar de la comunidad sería afectado si se requiere retener el 100 % del Q99. De modo, que es recomendable revisar esta regla para a templarla a las realidades hidrológicas y de abasto y demanda de agua en muchos sectores de Puerto Rico.

MÉTODOS PARA DETERMINAR LOS FLUJOS MÍNIMOS Y LOS FLUJOS AMBIENTALES

La determinación del valor numérico que debe ser el flujo ambiental en un río o quebrada envuelve un procedimiento complejo y costoso. La evaluación de la cantidad de agua que requiere la flora y fauna acuática en un río para mantenerse viable a largo plazo conlleva estudios científicos a largo plazo. El medioambiente de cada punto en un río es diferente a cualquier otro punto, y es el resultado de la interacción de un gran número de factores hidrológicos y morfológicos. Los principales factores físicos e hidrológicos que controlan el medioambiente en un punto de un río incluyen el flujo en el punto, el ancho del cauce y su profundidad, la velocidad del agua en el punto, la composición del substrato y los bancos, la pendiente aguas arriba y aguas abajo, y la presencia de partículas de sedimentos suspendidos o arrastrados. La calidad del agua en un punto es también una función compleja y resultante de los efectos combinados de las descargas de punto y dispersas en la cuenca aguas arriba del punto, la geología y geoquímica de las rocas que forman la cuenca y el cauce, y de la capacidad asimilativa del agua para oxidar o precipitar ciertos componentes. Algunas plantas y organismos pueden jugar un papel importante en la calidad del agua, como ocurre con los organismos bénticos que se alimentan de materia orgánica en el fondo del cauce, o de plantas como los jacintos de agua que absorben ciertos elementos y compuestos disueltos en el

agua. Por otro lado, la diversidad de las especies de flora y fauna que residen o transitan por el punto es también extremadamente compleja. Los estudios de Scatena y otros investigadores en varios ríos en PR (USFS, 2002) establecen la gran variedad de especies de fauna acuática que transitan o residen en los ríos costaneros. La flora de los ríos y quebradas en la Isla es también abundante y diversa, contribuyendo a la complejidad de estimar el flujo ambiental.

Como se puede apreciar de los factores antes mencionados, la interacción de los mismos en un punto de un río es extremadamente compleja. No existen métodos simples para determinar con confianza que cierta cantidad de flujo es esencial para mantener la vida acuática. Los estudios de Scatena y otros en los ríos de la Región Este de Puerto Rico correlacionan la cantidad de organismos acuáticos al flujo en ríos costaneros tales como el Mameyes y el Espíritu Santo. Sin embargo, estos estudios no evalúan las condiciones de sequías extremas cuando los flujos naturales se reducen a un mínimo. Es lógico concluir que los organismos acuáticos, incluyendo plantas y animales, están adaptados a estos eventos de sequías extraordinarias tales como la de 1967. De otro modo, el proceso de selección natural hubiera reducido la diversidad de la flora y fauna acuática en estos cuerpos de agua.

Es un poco más fácil estimar la calidad del agua durante flujos mínimos, ya que existen métodos relativamente probados para estimar la calidad resultante del agua en un punto de un río para ciertas condiciones físicas y químicas. Estos métodos incluyen generalmente la aplicación de modelos matemáticos relativamente complejos tales como QUAL2K, WASP7, y CORMIX, adoptados por la Agencia de Protección Ambiental Federal (EPA) para estimar la calidad de agua en un punto o tramo de un río. Sin embargo, la calibración de estos modelos requiere disponer de datos cuantiosos de la hidrología, morfología y química del punto o tramo a evaluarse durante un lapso de tiempo que sea hidrológicamente representativo.

Los modelos hidrobiológicos son la mejor aproximación con que disponen al presente los científicos para evaluar las interacciones entre la cantidad de flujo de agua y la vida acuática. Estos modelos permiten desarrollar relaciones cuantitativas entre parámetros físicos, químicos y biológicos, y estimar con cierto grado de confiabilidad el flujo de agua necesario para mantener la vida acuática en un punto de un río o estuario. Sin embargo, además de la recolección de datos sobre la biología del cauce bajo estudio, la calibración de estos modelos conlleva la recolección de datos de flujo para todo el régimen hidrológico, así como de las características hidráulicas del tramo del río o estuario donde ubica el punto de interés. Las simulaciones más confiables de las interacciones entre los procesos físicos e hidráulicos en un río solamente pueden lograrse mediante la aplicación de modelos tri-dimensionales. La calibración de un modelo hidrobiológico generalmente requiere varios años de datos y estudios, y un costo sustancial en cientos de miles de dólares. Al final, los modelos y resultados reflejan un estimado del flujo mínimo (ambiental) requerido para mantener la vida acuática y la calidad del agua. Este flujo ambiental puede expresarse como una función del Q99, parámetro que puede ser determinado o estimado con mucho más facilidad que el desarrollo de modelos hidrobiológicos. Algunos de los modelos hidrobiológicos e hidrodinámicos más utilizados incluyen a AQUATOX, EFDC, y EPD-RIV1, desarrollados por la EPA para aplicaciones multi-paramétricas en ríos y estuarios (USEPA, Ecosystem Research Division).

Irrespective de los métodos utilizados para definir los flujos mínimos de cauces de agua, la adopción de la cantidad de flujo necesaria para mantener la vida acuática y la calidad del agua en cuerpos de agua varía notablemente entre países y territorios. Referencias en la literatura establecen que los flujos ambientales, expresados como una función del flujo mínimo, pueden variar desde el 50 % del Q99 hasta el 200 % del Q99. En Australia hay unas reglas que permiten extraer un máximo del 90 por ciento del flujo de los ríos en las épocas de estiaje (sequía). En varios de los estados del suroeste de E.U., donde la lluvia es mínima, el mantenimiento del flujo equivalente al 200 % del

Q99 es común para preservar la calidad del agua y la vida acuática. Por otro lado, varios estados en el suroeste de EUA permiten extracciones que esencialmente secan los ríos y quebradas, en parte debido a concesiones y derechos adquiridos de extracciones de agua que exceden el flujo disponible.

Anteriormente, en Puerto Rico y en varios lugares en EUA, se utilizaba el valor del flujo mínimo de siete días consecutivos con una frecuencia de dos años (7Q2), pero este es un flujo que no es representativo de las condiciones críticas que ocurren en el medioambiente acuático durante sequías extremas, sino de sequías promedios, y en general, se ha abandonado y está bastante desacreditado. En su lugar se adoptó el valor del 7Q10 (utilizado principalmente por la JCA en permisos relacionados a calidad de agua) que es el flujo mínimo observado durante siete días consecutivo con una frecuencia de diez (10) años. Este valor de descarga o flujo tiene un 10 por ciento de probabilidad de ocurrir en un año dado, y es mucho más representativo de las sequías severas que afectan a Puerto Rico aproximadamente cada 10 años (sequías severas ocurrieron en 1967, 1974, 1984, 1994 y el 2002).

Aunque los valores de 7Q10 son hidrológicamente representativos de flujos mínimos históricos, es más confiable determinar estos flujos mínimos (y de paso definir los flujos ambientales) derivando el valor del Q99. El Q99 se deriva de las curvas de frecuencia de los datos de flujos medidos en una estación fija a una frecuencia constante. Aclaro este punto porque es posible determinar los Q99 de series de datos de flujos anuales, mensuales, o diarias. La confiabilidad de los resultados obtenidos de cada una de estas series de datos de flujo depende del período de datos. Una serie anual de 30 años de datos representa solamente 30 puntos en la curva de frecuencia que se obtiene al relacionar la cantidad de flujo al por ciento del tiempo que dicho flujo es igualado o excedido. En cambio, 15 años de datos mensuales representan 180 puntos en la curva de frecuencia. Finalmente, 10 años de datos de flujos diarios representan 3,654 puntos en la curva de frecuencia de flujos. La clave en la precisión y

confiabilidad de cada una de estas series es sin las mismas incluyeron períodos de sequías severas representativas de flujos mínimos históricos. Puede darse el caso de que una serie de datos anuales de 30 años incluya el flujo mínimo histórico del período, mientras que la serie de 10 años de datos diarios no lo incluya. En general, si se dispone de flujos diarios que incluyan un mínimo de 20 años de datos, esta serie de datos diarios es la que debe utilizarse para generar la curva de frecuencia, aún cuando pudiera disponerse del doble de datos anuales. El DRNA ha preferido tradicionalmente que se utilicen series de datos de un mínimo de 30 años de flujos diarios, de modo que la frecuencia derivada sea más representativa estadísticamente. Esto implica que los datos sean representativos de una distribución normal para la cuenca en particular donde ocurre el punto de análisis. En ausencia de datos diarios, a veces es necesario utilizar los datos de flujos mensuales y/o anuales que están disponibles en algunas estaciones operadas por el USGS.

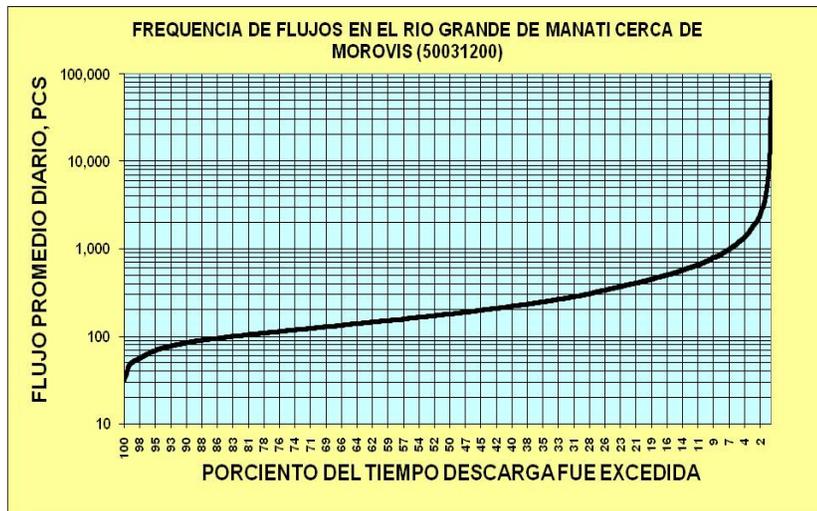


Figura 1. Frecuencia de flujos utilizada para definir el Q99.

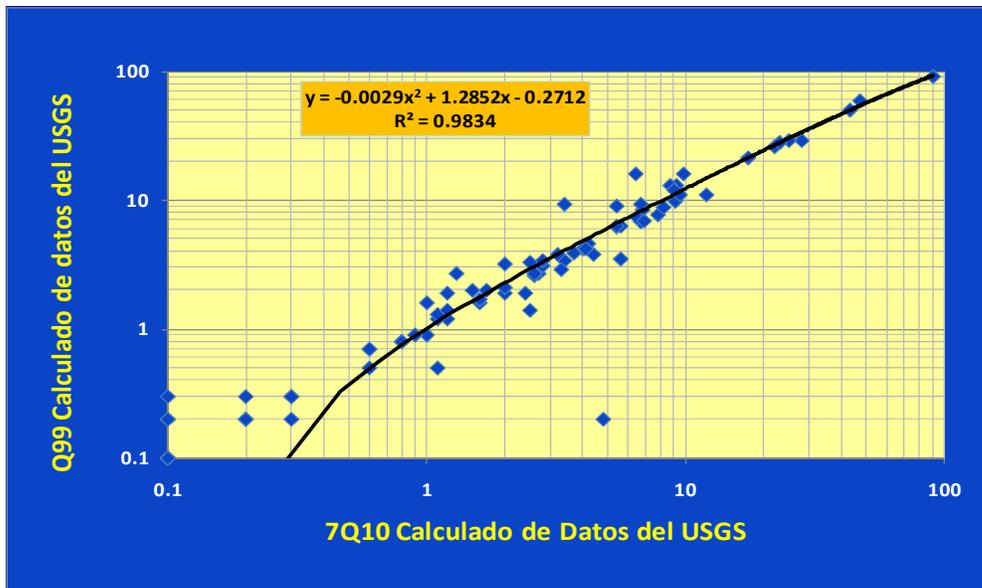


Figura 2. Correlación entre valores de Q99 y 7Q10 en estaciones del USGS.

Aunque el USGS ha operado u opera estaciones para medir flujos en un gran número de puntos en los ríos y quebradas en PR, en muchos de los lugares donde la AAA opera tomas de agua para sus plantas de filtración no se dispone de datos de flujo. Los datos del USGS a través de la Isla se pueden utilizar para estimar los valores de Q99 y flujos ambientales en los lugares donde no existen medidas de flujo actuales. El USGS también opera programas de flujos mínimos en cuencas pequeñas a través de la Isla, y periódicamente lleva a cabo proyectos que pueden incluir varias cuencas o una zona o región de la Isla donde se determinan los flujos mínimos durante períodos de estiaje.

**VALORES DE Q99 EN EL PLAN INTEGRAL DE AGUAS DE PUERTO RICO
PROMULGADO POR EL DRNA EN EL 2007**

Los valores de Q99 adoptados en el Plan de Aguas en las tomas que opera la AAA fueron determinados por el Doctor Greg Morris (referido de aquí en adelante como GMA) utilizando correlaciones matemáticas relativamente simples. En este artículo se hace referencia a esta “Regla” derivada por GMA,

ya que son los valores de Q99 el punto de referencia para definir los flujos ambientales. El flujo residual (ambiental) a permanecer en un río o quebrada para mantener la vida acuática y la calidad del agua luego de autorizar extracciones, puede variar desde el 50 % del Q99 a un número mucho mayor, quizás hasta el 200 % del Q99. En un río o quebrada donde el flujo mínimo Q99 es 10 millones de galones por día (mgd), el flujo residual dejando el 50 % del Q99 serían 5 mgd, mientras que si la vida acuática y la calidad del agua requieren una cantidad mayor de agua, el 200 % del Q99 sería equivalente a 20 mgd. La política pública vigente adoptada por el DRNA en el Plan Integral de Aguas requiere que prospectivamente se mantenga un flujo residual del 100 % del Q99, por lo que en este ejemplo, serían los 10 mgd representados por el Q99.

Es obvio que el DRNA adoptó esta política pública de mantener un flujo residual equivalente al 100 % del Q99 utilizando los datos de flujo medidos en las estaciones que opera el USGS al presente y los datos históricos similares de estaciones descontinuadas. La Regla desarrollada por GMA e incluida en el Plan Integral de Aguas se basa en una serie de regresiones matemáticas derivadas utilizando parte de los datos del USGS. La Regla incluye varias regresiones las cuales se consideran a continuación:

La primera regresión (Figura 3) se derivó correlacionando valores del Q99 obtenidos de una fórmula exponencial contra los valores del Q99 calculados de los datos del USGS. Esta fórmula provee una primera aproximación para estimar los Q99 en los lugares en donde no se han medido flujos. Sin embargo, como se discute posteriormente, la aplicación de esta regresión a todo Puerto Rico no es hidrológicamente correcta, como se documenta más adelante.

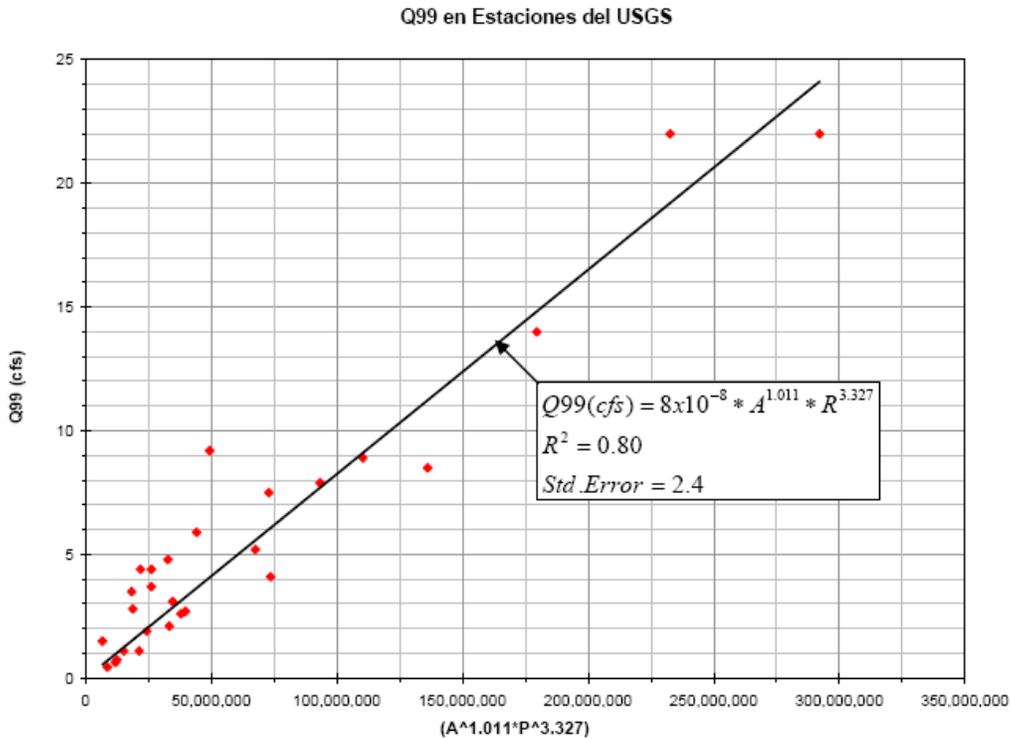


Figura 3. Regresión adoptada por el DRNA para estimar Q99

La segunda regresión en la Regla derivada por GMA se basa en otra correlación de los flujos promedios (Q50) y los valores de Q99 los lugares donde el USGS opera estaciones de medir flujo (Figura 2). La regresión se utilizó para estimar el valor de los Q99 en lugares donde la AAA opera tomas de agua y donde no existen datos de flujo. Esta regresión es una relación lineal comparativa que no es correcta y que sin lugar a dudas resulta en estimados erróneos de los valores de Q99.

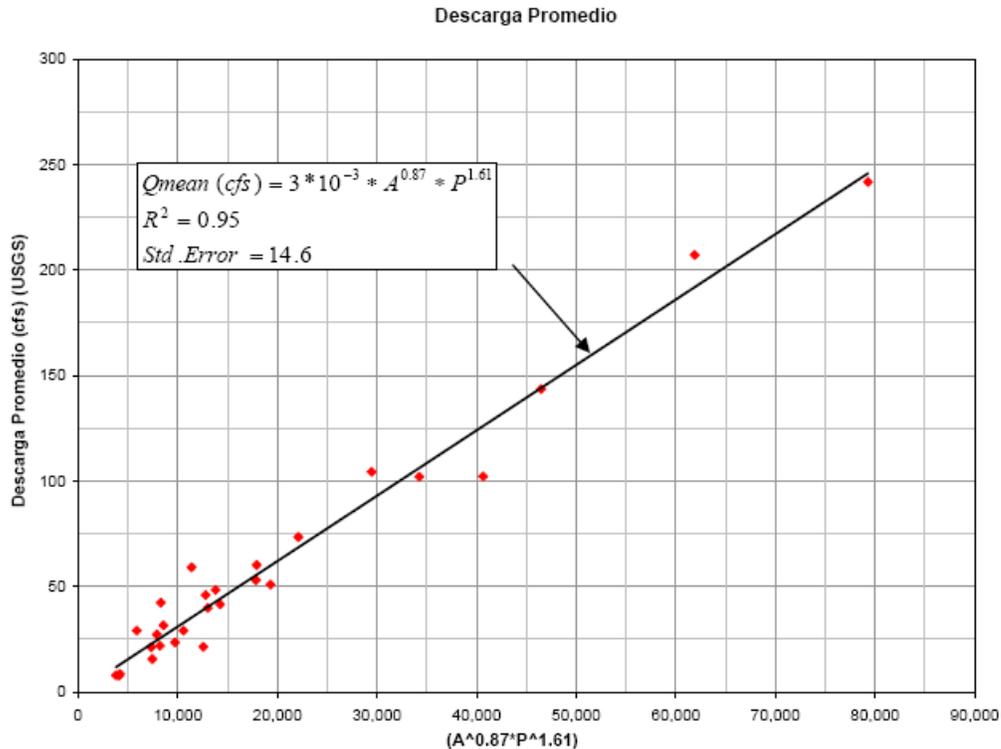


Figura 4. Regresión para estimar valores de Q99 utilizando Q50 (promedio).

La regresión de los parámetros de Q50 contra el Q99 asume que ambos regímenes hidrológicos son proporcionales, lo cual es incorrecto. La relación de descarga cuando un río está en estiaje no es proporcional al flujo promedio. El flujo promedio representa un régimen de descarga de mayor magnitud, ya que en el promedio se incluyen los eventos de crecidas cuando la lluvia es abundante. El flujo en estiaje (sequía), que representa el Q99, no incluye crecidas significativas en el cauce. La regresión derivada por GMA y adoptada por el DRNA es hidrológicamente incorrecta y estadísticamente no-significativa, pues el flujo mínimo surge principalmente de descargas de agua subterránea en la cuenca, y no es proporcional al flujo promedio. Hidrológicamente este proceso no es lineal como se adopta en la regresión. No es necesario un análisis estadístico riguroso para demostrar esta conclusión, pero si auscultamos

el hidrograma de un río en cualquiera de las cuencas en la Isla, podemos observar la intensidad de las crecidas que ocurren con gran frecuencia (Figura 3).

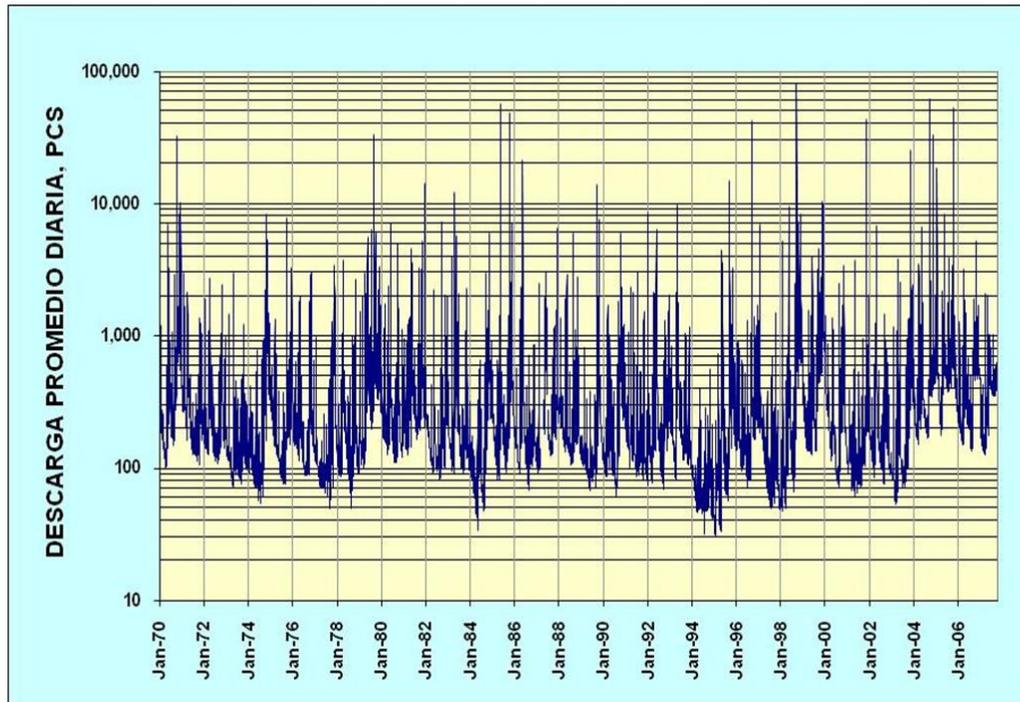


Figura 5. Variación en los flujos en el Río Grande de Manatí en Morovis.

El DRNA se enfrentará a retos administrativos y legales cuando intente adoptar esta Regla, ya que cualquier usuario público o privado de las aguas que discurren por los ríos y quebradas en la Isla, disputará sin mucha dificultad la validez de los estimados que se hagan del Q99. En el caso del peor escenario en que el DRNA le solicite u ordene a un usuario que reduzca la cantidad de agua que está extrayendo o propone extraer usando como base el Q99 estimado con la Regla, el usuario podría disputar sin dificultad el cálculo al presentar un estudio en el cual indique que la herramienta preliminar que se adoptó estadísticamente no representa el régimen hidrológico de esa cuenca.

Es imprescindible que el DRNA revise la Regla adoptada y el método a utilizarse para estimar los flujos ambientales en lugares donde no existen datos de flujo. Para lograr derivar una herramienta que sea confiable, estadísticamente significativa, y legalmente defendible, es necesario considerar los siguientes elementos que en la derivación de la Regla vigente aparentemente no se consideraron:

Es necesario examinar con rigor todos los datos de flujos en Puerto Rico disponibles en los archivos del USGS; los datos de flujos de estaciones operadas por la antigua Autoridad de las Fuentes Fluviales (AFF) y por la AEE; y datos de flujos en la Región Oeste obtenidos por el Instituto de Investigaciones de Recursos de Agua de Recinto Universitario de Mayagüez. .

Los datos de flujo del USGS incluyen 24 estaciones que tienen 30 años de operación y que proveen una base estadística confiable para derivar correlaciones y regresiones regionales como se recomienda más adelante para mejorar los estimados de Q99 del DRNA.

Además, los datos del USGS incluyen 63 estaciones de flujo continuo diario que tienen por lo menos 15 años de datos y están dispersas por toda la Isla y eso nos permitiría hacer unos análisis hidrológicos más precisos y mejorar la herramienta. Es necesario evaluar la validez estadística de datos de estaciones que han operado por períodos menores de 30 años. Es muy posible que en un período de 15 años que incluya sequías extremas los datos sean estadísticamente significativos.

La determinación de valores de Q99 y flujos ambientales no debe limitarse al uso de regresiones matemáticas. Existen otros métodos que proveen resultados confiables que a veces resultan más precisos que una regresión que incluye un error estándar significativo. Uno de estos métodos son las comparaciones hidrográficas entre un punto donde existe una estación de medir flujos en una

cuenca cercana al punto de interés. La comparación hidrográfica permite analizar las descargas en ambas cuencas día por día, utilizando unos coeficientes que se pueden derivar en una forma relativamente simple de los hidrogramas que se obtienen de las curvas de flujos que deriva el USGS en la estación donde se miden los flujos.

Al presente están disponibles sistemas computarizados donde los hidrogramas de dos estaciones se pueden analizar conjuntamente, facilitando el análisis hidrográfico.

Una deficiencia significativa adicional de la Regla para estimar valores de Q99 adoptada en el Plan Integral de Aguas es su aplicación a todo Puerto Rico. La generalización de las regresiones y aplicación a toda la Isla asume que la hidrología de las aguas superficiales y subterráneas es uniforme. Hidrológicamente esta asunción es incorrecta, pues la hidrología de las cuencas en la Isla es variada, ya que es una función de varios factores físicos, climáticos, morfológicos y geológicos. Es incorrecto generalizar que los flujos mínimos en la Isla responden a correlaciones uniformes entre los parámetros que los afectan.

La geología de una cuenca es un factor de gran importancia en la magnitud de los flujos mínimos. Puerto Rico cuenta con una geología variada que incluye varias regiones de importancia, incluyendo la región central de rocas volcánicas; la región de las rocas calizas, denominadas en forma general la zona del carso en el norte de la Isla, con una pequeña sección de rocas calizas en los valles del sur; los valles de depósitos marinos y aluviales costaneros, tanto en el norte como en el sur; y la región del Valle de Lajas. Los flujos mínimos en los cauces de ríos y quebradas en estas regiones difieren marcadamente para las mismas condiciones de lluvia. Esto se debe a que la cantidad de agua que se infiltra al subsuelo, y se descarga posteriormente como flujos mínimos, varía significativamente debido a la geología en cada región. Como ejemplos

demostrativos, en la zona de rocas calizas del norte, y en particular en la Región del Carso, la mayor parte de la escorrentía se infiltra al subsuelo y descarga directamente a acuíferos profundos donde fluye hacia los valles costaneros del norte. Como ejemplo, el Río Lajas en Toa Alta, que es un río de tamaño mediano o pequeño que drena estrictamente zona caliza, se alimenta de una serie de manantiales que surgen en diferentes puntos en la zona y que no necesariamente dependen del área de captación aproximada que se pueda estimar, ni depende de la lluvia que cae en esa zona de la cuenca de ese pequeño río, porque hay una serie de interconexiones con sumideros que pueden venir de otras zonas aledañas en la cuenca del Río Cibuco, o de la cuenca baja del Río Mavilla, y el flujo en el Río Lajas no se pueden correlacionar en forma fácil. En comparación, en la región de rocas volcánicas induradas de la Cordillera Central, la infiltración es mínima en comparación con la zona del carso, resultando en flujos mínimos que se agotan con mayor rapidez que en las zonas de rocas calizas más permeables.

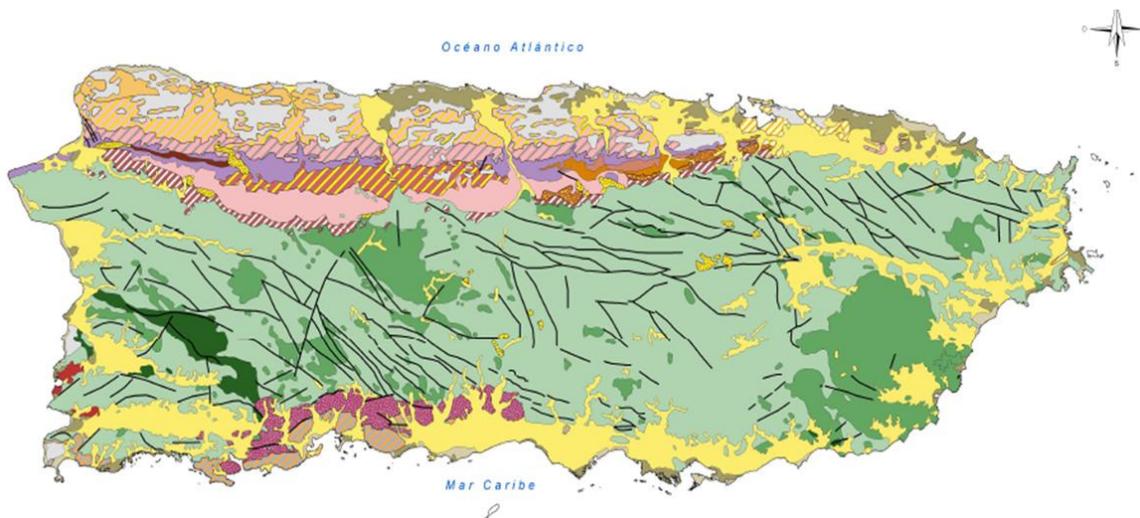


Figura 6. Variación en la geología de las regiones de Puerto Rico.

La técnica y estrategia correcta para estimar los flujos mínimos requiere la derivación de regresiones multi paramétricas regionales. Esta técnica fue utilizada para la determinación de flujos máximos en la Isla por el Instituto de Investigaciones de Recursos de Agua. Es necesario evaluar la confiabilidad estadística de las regresiones generalizadas versus regresiones regionales que incluyan como mínimo las regiones centrales, del carso, los valles costaneros del norte y sur, y el Valle de Lajas. Esto conlleva un análisis sistemático de los datos disponibles desde el punto de vista estadístico e hidrológico.

El otro parámetro de importancia en el régimen de sequía es la elevación de la cuenca y los cambios de elevación del cauce (la pendiente). Las cuencas en la zona central y este de Puerto Rico exhiben pendientes abruptas que resultan en escorrentías que alcanzan altas velocidades y crecientes que se disipan relativamente rápido. En comparación, una vez los cauces penetran a la Zona del Carso, las pendientes de las cuencas disminuyen significativamente y el régimen de descarga de agua subterránea, que es la que alimenta los ríos durante la época de estiaje, no es igual en la zona volcánica. En la zona de rocas calizas, donde las pendientes son menores, el agua descarga verticalmente hasta que llega a las zonas saturadas o se encuentra con un sumidero horizontal hasta un canal de conducción, descargando eventualmente a otros cauces como ocurre en el Río Encantado en Manatí. Este río descarga al Río Grande de Manatí en un manantial cuantioso, que aún en época de sequía puede tener una cantidad mucho mayor de agua que el mismo Río Grande de Manatí en el punto de descarga.

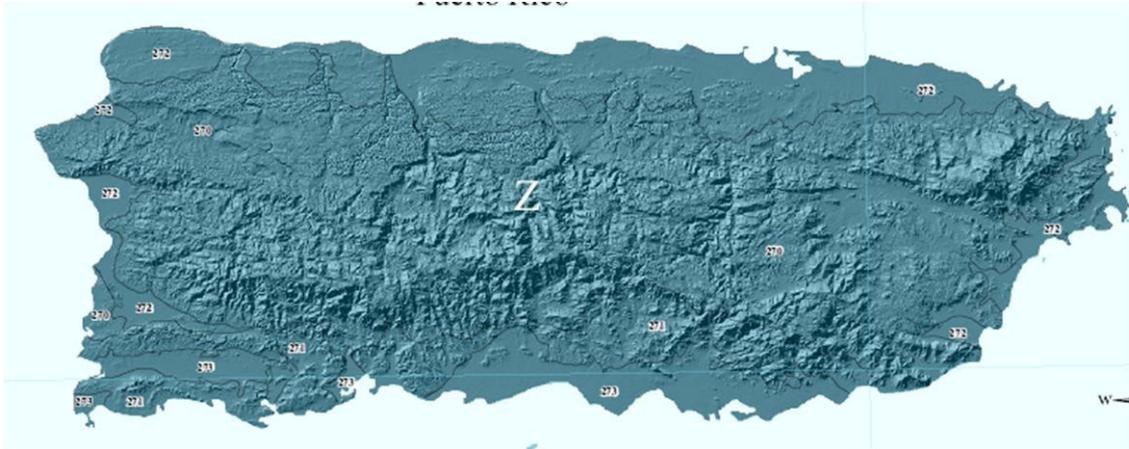


Figura 7. Variaciones en la fisiografía de las cuencas en Puerto Rico.

El análisis para estimar valores de Q99 llevado a cabo por el DRNA no aparenta haber tomado en cuenta una serie de estudios de flujos mínimos regionales llevados a cabo por el USGS. Estos datos, incluyendo regresiones para estimar el valor del Q99 en lugares donde no se llevaron a cabo determinaciones del flujo, están disponibles en una serie de publicaciones del USGS.

El primer estudio incluye datos de flujos mínimos en una serie de estaciones permanentes y temporeras que históricamente mantuvo el USGS (y que mantiene todavía un número de ellas) en la regiones Central y Norte. Estos datos son de gran valor para estimar flujos mínimos en la Región del Carso mediante regresiones regionales.

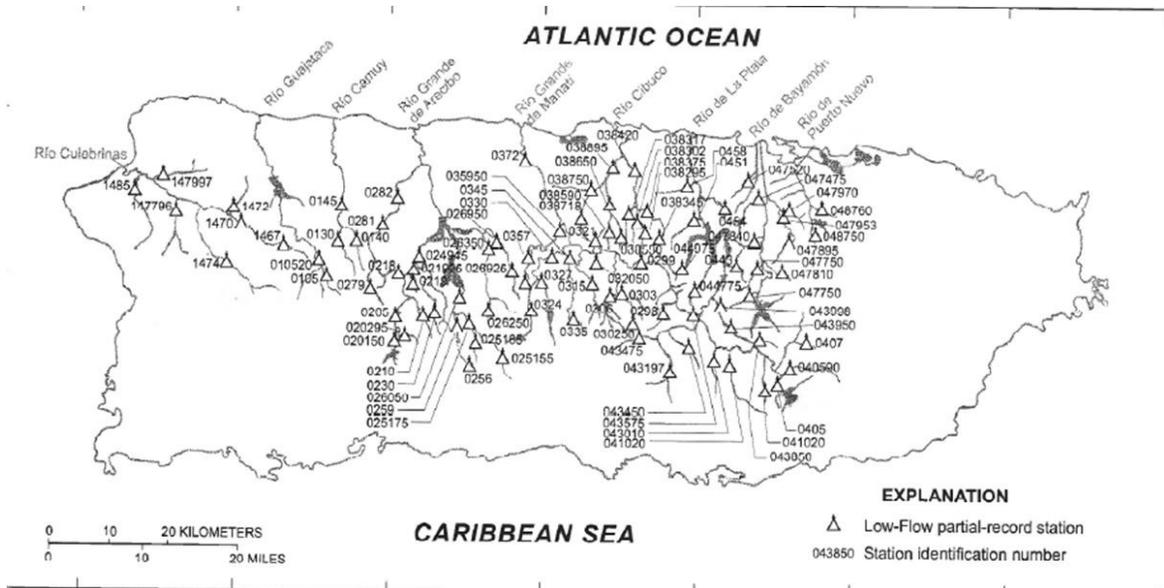


Figura 8. Estaciones de flujos mínimos en la Regiones Norte y Central

El segundo estudio incluye las regiones Sur y Oeste, e incluye análisis similares a los de las regiones Norte y Central.

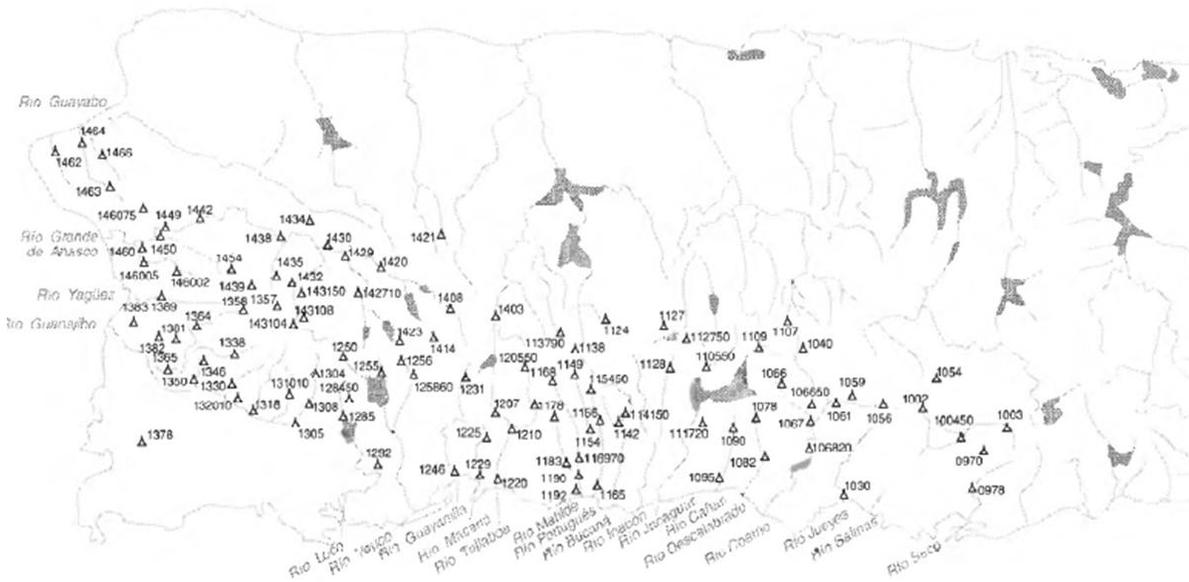


Figura 9. Estaciones de flujos mínimos en la Regiones Sur y Oeste.

El tercer estudio es de la región Este, donde también existe una gama de información que necesitamos aprovechar y utilizar para mejorar la herramienta adoptada.

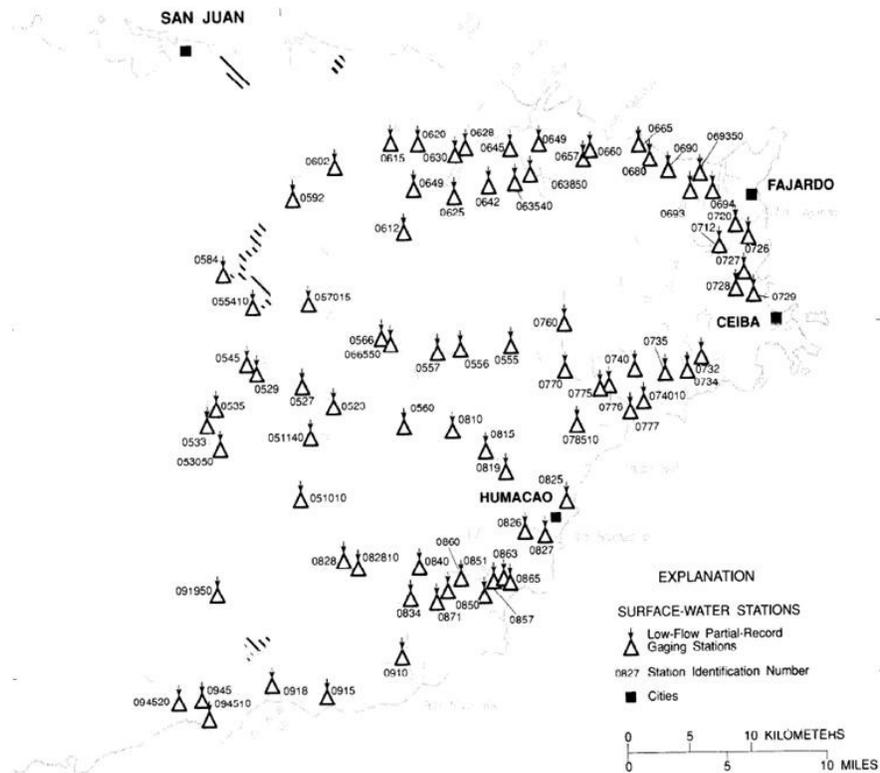


Figura 10. Estaciones de flujos mínimos en la Región Este.

En conclusión, la derivación o estimación de los flujos ambientales en los ríos y quebradas en Puerto Rico no es un proceso simple. Determinar el flujo mínimo como una función del Q99 no es complejo y existen suficientes datos en la Isla para obtener estimados confiables en la mayor parte de las cuencas. Sin embargo, es necesario revisar la herramienta adoptada por el DRNA en el Plan Integral de Aguas para estimar los valores de Q99, ya que las regresiones utilizadas no son estadísticamente correctas. Es también erróneo generalizar la aplicación de una regresión para estimar valores de Q99 a todo Puerto Rico, ya que existen diferencias hidrológicas significativas entre varias de las regiones que forman la Isla. No existe base científica para extrapolar los valores de flujos mínimos representados por el Q99 para estimar los flujos ambientales. La

determinación de la cantidad de flujo requerido para el mantenimiento de la vida acuática y la calidad del agua en un río o quebrada conlleva un análisis complejo de parámetros físicos, químicos, morfológicos y biológicos. Esto puede lograrse solamente mediante estudios sistemáticos complejos de larga duración y alto costo.

REFERENCIAS

Santiago-Rivera, Luis, 1992, Low-flow characteristics at selected sites on streams in eastern Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 92-4063, 46 p.

Santiago-Rivera, Luis, 1996, Low-flow characteristics at selected sites on streams in southern and western Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4147, 46 p.

Santiago-Rivera, Luis, 1998, Low-flow characteristics at selected sites on streams in northern and central Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4200, 53 p.

Scatena F.N. 2004. A survey of methods for setting minimum instream flows standards in the Caribbean Basin. *River Research and Applications* Vol 20: 127-135.

Covich A.P., Crowl T.A., Scatena F.N., 2003. Effects of extreme low flows on freshwater shrimps in a perennial tropical stream. *Freshwater Biology* V48: 1199-1206

Covich A.P., Crowl T.A., Scatena F.N., 2000. Linking habitat stability to floods and droughts: effects on shrimp in montane streams, Puerto Rico. *Verhandlungen Internationale Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnologie* Vol. 27: 2430-2434

Covich A.P., Crowl T.A., Johnson S.L., Scatena F.N. 1998. Effects of drought on pool morphology and benthic macroinvertebrates in headwater streams of the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *American Water Resources Association TPS-98-2*: 91-96.

AFS Policy Statement #9: Effects of Altered Stream Flows, on Fishery Resources, 2007.

INSTREAM FLOWS IN WASHINGTON STATE OF WASHINGTON: PAST, PRESENT AND FUTURE, 2000.

IUCN – The World Conservation Union: Water Law Series – Issue 7, Environmental Flows, 2007.

MINIMUM FLOWS AND LEVELS: ANALYSIS OF FLORIDA PROGRAMS
University of Florida College of Law, Florida Department of Environmental Protection, December 9, 1996.