

Hidrogeografía de una cuenca de usos múltiples ubicada en la cordillera de la Costa, Venezuela*

Joel Francisco Mejía ⁺ 

Favian Vega Méndez ^Δ 

Seiad Man Eddin Abou Asaad [‡] 

Elba Marina Mora [◊] 

Resumen

Se realizó un análisis de la cuenca del río Tirgua ubicada en la cordillera de la Costa, combinando los enfoques hidrogeográfico y de paisajes hidrológicos. Se partió de la estimación automatizada de descriptores geomorfométricos de forma, relieve y drenaje de las distintas subcuencas, los cuales fueron sometidos a un análisis estadístico para lograr su diferenciación espacial. Utilizando métodos de interpolación espacial, se estudió el comportamiento de la precipitación, temperatura y la evapotranspiración (ETP); se estimaron los caudales de las subcuencas por medio de un método indirecto y se hizo un análisis espacial de las tipologías de uso de la tierra en relación con la dinámica hidrológica. El Análisis de Componentes Principales (ACP) permitió una diferenciación intrínseca de cuatro grupos de subcuencas, explicada mayormente por parámetros de forma y de relieve. Por su parte, la respuesta hidrológica de las subcuencas es mayormente explicada por su ubicación relativa dentro de la cuenca, el relieve y la dinámica interna de los elementos del clima. La combinación de ambos enfoques resultó de gran utilidad en el estudio de cuencas con escasez de datos sistemáticos.

Palabras clave: cuenca de usos múltiples, geomorfometría, hidrogeografía, paisaje hidrológico, río Tirgua.

Ideas destacadas: artículo de investigación en el que se caracteriza una cuenca de usos múltiples de escasa información hidrométrica bajo la combinación de los enfoques hidrogeográfico y de paisajes hidrológicos, utilizando métodos hidroclimáticos indirectos, análisis estadístico y procesamiento espacial en SIG.



RECIBIDO: 20 DE AGOSTO DE 2019. | EVALUADO: 20 DE NOVIEMBRE DE 2019. | ACEPTADO: 1 DE SEPTIEMBRE DE 2020.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Mejía, Joel Francisco; Vega Méndez, Favian; Man Eddin Abou Asaad, Seiad; Mora, Elba Marina. 2021. "Hidrogeografía de una cuenca de usos múltiples ubicada en la cordillera de la Costa, Venezuela." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 30 (1): 217-238. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v30n1.81737>.

* Proyecto parcialmente financiado por el Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico de la Universidad de los Andes – CDCHT, código: FO-561-04-01-C.

+ Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela. ✉ jmejia@ula.ve – ORCID: 0000-0003-2632-1155.

Δ Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela. ✉ favianvega.mo6@gmail.com – ORCID: 0000-0002-5798-4026.

‡ Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela. ✉ seiadman.45@gmail.com – ORCID: 0000-0002-6549-2929.

◊ Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela. ✉ emmora@ula.ve – ORCID: 0000-0001-7791-9136.

✉ Correspondencia: Joel Francisco Mejía. Av. Principal Vía Chorros de Milla, Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales – ULA, CP 5101, Mérida – Venezuela.

Hydrogeography of a Multiple Use River Basin Located in the Coastal Mountain Range, Venezuela

Abstract

The Tirgua river basin located in the Coastal Mountain Range – Venezuela, was analyzed combining both the hydrogeographic and the hydrological landscapes approaches. An automated estimation of geomorphometric parameters related to: form, relief, and drainage for the watersheds was done, being processed using statistical methods to define a spatial differentiation. Precipitation, temperature and evapotranspiration were spatially analyzed using interpolation methods, the streamflow of the watersheds was estimated using an indirect method and the land use typologies were spatially considered towards the hydrological response. The Principal Component Analysis lead to discriminate four groups of watersheds, mainly explained by form and relief signatures. The hydrological response was mostly explained by the location of watersheds inside the river basin, relief and the climate dynamic. The combination of these approaches was useful in studying poorly ungauged basins.

Keywords: multiple use river basin, geomorphometry, hydrogeography, hydrological landscape, Tirgua river.

Highlights: research article in which a poorly ungauged multiple use river basin is characterized through a combination of two approaches: hydrogeographic and the hydrological landscapes, using hydroclimatological indirect methods, as well as statistical analysis and spatial processing with GIS.

Hidrogeografía de una bacía de uso múltiplo localizada na cordilheira da Costa, Venezuela

Resumo

A bacía do rio Tirgua, localizada na cordilheira da Costa, Venezuela, foi analisada adotando abordagens hidrogeográfica e hidrológica. Partiu-se da estimativa automatizada dos parâmetros geomorfométricos relacionados a: forma, relevo e drenagem para as distintas sub-bacias hidrográficas, sendo processados por método de métodos estatísticos para definir sua diferenciação espacial. A precipitação, temperatura e evapotranspiração (ETP) foram analisadas utilizando métodos de interpolação espacial; a vazão das sub-bacias foi estimada por um método indireto; e foi feita uma análise espacial das tipologias de uso do solo em relação à dinâmica hidrológica. A Análise de Componentes Principais (ACP) permitiu uma diferenciação de quatro grupos de sub-bacias: explicados principalmente por parâmetros de forma e relevo. Por sua vez, a resposta hidrológica das sub-bacias se explica principalmente por sua localização relativa dentro da bacía, o relevo e a dinâmica interna dos elementos climáticos. A combinação dessas abordagens tem sido muito útil no estudo das bacias com dados sistemáticos escassos.

Palavras-chave: bacía de uso múltiplo, geomorfometria, hidrogeografia, paisagem hidrológica, rio Tirgua

Ideias destacadas: artigo de pesquisa que caracteriza uma bacía de uso múltiplo com escassa informação hidrométrica sob a combinação de abordagens hidrogeográfica e hidrológica da paisagem, utilizando métodos hidroclimáticos indiretos, análise estatística e processamento espacial em SIG.

Introducción

La región centro-norte de Venezuela es una de las más dinámicas y transformadas del país, alberga una población cercana a los 10 millones de habitantes (INE 2011b) y concentra la mayor parte de los establecimientos industriales, puertos, centros financieros, oficinas centrales de entidades públicas y privadas, y algunas de las más grandes áreas urbanas de la nación. La intensidad y magnitud de la acción antropógena ha articulado un intrincado paisaje signado por la coexistencia de distintos usos y actividades productivas en la mayoría de las cuencas hidrográficas de la cordillera de la Costa. Allí la conjunción de usos: agrícola, urbano, industrial, pecuario y conservacionista, demandan ingentes cantidades de agua y otros bienes ambientales, transforman su estatus cualitativo y generan conflictos interusos e interusuarios cada vez más complejos y difíciles de manejar.

Urge así la necesidad de monitorear y evaluar convenientemente los sistemas hidrológicos de la región a través de enfoques comprensivos y flexibles, pues su dinámica altamente cambiante y la intensificación/diversificación de los usos de la tierra pudiera estar comprometiendo a futuro, no solo la seguridad hídrica de muchas de sus cuencas, sino también su sostenibilidad ambiental. Paradójicamente, la tendencia seguida por los cambios de uso de la tierra en las cuencas del centro-norte del país es inversamente proporcional a la cantidad y calidad de información hidrometeorológica disponible, cada vez más exigua y deficiente; ello constituye un serio obstáculo en muchas zonas intracordilleranas, en las que la escasez o la simple inexistencia de información hidrométrica impiden dimensionar con adecuado nivel de precisión el estatus de sus recursos hídricos.

El enfoque hidrogeográfico

Constituye una alternativa reciente para el estudio analítico y evaluativo de cuencas, fundamentado en el análisis de las interacciones entre el sistema de paisajes y la dinámica del balance hídrico, a fin de comprender los procesos que controlan y regulan la cantidad y la calidad del agua; la “cuenca hidrográfica” es la unidad básica de análisis (Taka 2017). Este enfoque puede ser utilizado con fines descriptivos como fue el caso de la cuenca del río Kriva Reka – Kosovo (Kastrati et ál. 2010); con fines de evaluación, como la realizada en los sistemas lagunares ibéricos (Gosálvez et ál. 2009); o con fines aplicativos, como el estudio de la hidrogeografía y su influencia en la epidemiología del virus *West Nile* en el estado de New

York – EE. UU. (Walsh 2012), el estudio de inundaciones causadas por tormentas en el Himalaya (Michelsen 2015) y el estudio sistemático de cuencas en Finlandia (Taka 2017).

El enfoque de paisajes hidrológicos

The hydrological landscapes approach, propuesto por Winter (2000), representa un aporte conceptual en la hidrología moderna que complementa los análisis hidrogeográficos, al permitir sistematizar y categorizar el ambiente físico de una cuenca en función de las características fisiográficas, morfológicas, geológicas y climáticas que, en conjunto, son un punto de partida para la comprensión de la dinámica hidrológica intrarregional, como es el caso estudiado en el presente artículo. Un “paisaje hidrológico montañoso” está estructurado por 3 unidades esenciales: alta montaña (cimas y crestas), laderas disectadas y fondo de valle (Figura 1). El funcionamiento de este paisaje está gobernado por: (1) movimiento de agua superficial, controlado por las pendientes, la permeabilidad edáfica y la litológica; (2) el movimiento de agua dentro del terreno, controlado por las características hidráulicas de la litología; y (3) intercambio de agua atmosférica, controlado por el clima (Winter 2001). Este enfoque ha sido utilizado en diversos trabajos sobre hidrología teórica (Lin et ál. 2006; Wagener et ál. 2007; Wagener, Sivapalan y Mc Glynn 2008; Troch et ál. 2015; Rains et ál. 2016), y en diversas evaluaciones y regionalizaciones hidrológicas realizadas en EE. UU. y Europa (Wolock, Winter y McMahon 2004; Yadav, Wagener y Gupta 2007; Santhi et ál. 2008; Sawicz et ál. 2011; Gharari et ál. 2011; Patil y Stieglitz 2011; Patil et ál. 2013; Sawicz et ál. 2014; Leibowitz et ál. 2014).

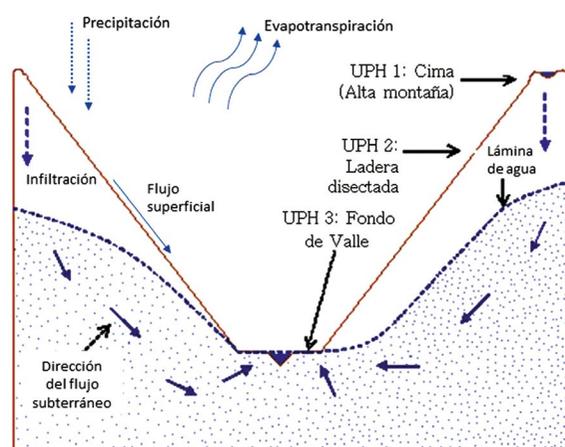


Figura 1. Diagrama conceptual de un paisaje hidrológico montañoso. Unidad de Paisaje Hidrológico (UPH). Fuente: adaptado de Winter (2001).

Otros factores como la dinámica de uso y cobertura del terreno afectan los procesos hidrológicos de forma importante (Wolock, Winter y McMahon 2004). El papel de la cobertura del terreno y de los usos de la tierra en la respuesta hidrológica de una cuenca ha sido destacado y analizado por diversos autores (Allan, Erickson y Fay 2003; Chang 2003; Allan 2004; Hölscher 2008; Mejía 2012; Buma y Livneh 2017). Un análisis más integrativo que combina la cobertura y uso de la tierra junto con otros factores fisiográficos, edáficos y climáticos fue realizado por Price (2011).

Ambos enfoques planteados tienen especial utilidad cuando se trata de caracterizar o evaluar cuencas sin información, o con escasa o muy poca información básica, particularmente de datos hidroclimatológicos, o bien, cuando la información disponible es de calidad dudosa. En este tipo de cuencas, la predictibilidad en la respuesta hidrológica constituye un desafío frente a los cambios antropogénicos ejercidos en el clima y en la cobertura terrestre (Sivapalan 2003; Wagener et ál. 2004).

Históricamente, los hidrólogos siempre han tratado de relacionar las características estructurales de las cuencas con sus respectivas respuestas hidrológicas (Bras 1990, citado por Wagener et ál. 2007). Estas características se clasifican en: (1) características “estáticas de forma” (geomorfológicas, morfométricas y pedológicas), (2) características “de energía” (precipitación y radiación) y (3) características de respuesta dinámica (caudal, agua subterránea, humedad del suelo), teniendo en cuenta que la forma y la funcionalidad de las cuencas dependen de la coevolución del clima, los suelos, la topografía y la vegetación (Wagener et ál. 2007; Wagener, Sivapalan y Mc Glynn 2008).

El rápido avance tecnológico en el campo de la geomática y la geoinformática permite disponer de técnicas automatizadas que facilitan la obtención de parámetros físicos y geomorfométricos con rapidez y bajo costo, que pueden orientar la caracterización y evaluación de los sistemas hidrológicos terrestres con razonable precisión (Kamp, Bolch y Olsenholler 2003; Viramontes et ál. 2007; Geritana et ál. 2009; Parra 2017).

En este sentido, el análisis hidrogeográfico presentado en este trabajo se centró en: (1) caracterizar la cuenca y sus subcuencas mediante la derivación de un conjunto de parámetros geomorfométricos claves para el comportamiento hidrogeográfico; (2) cuantificar el potencial estadístico de los parámetros para diferenciar las subcuencas a través del análisis de componentes principales —en

adelante, ACP—; (3) caracterizar el comportamiento hidrológico de las subcuencas; y (4) analizar el papel de los usos de la tierra en el comportamiento hidrológico de las subcuencas.

El entorno estudiado

El río Tirgua nace en las estribaciones del tramo occidental del sistema de la Costa, en la región centroccidental de Venezuela y se ubica entre las coordenadas 587.776 y 534.677 m. N, y 106.4976 y 113.4913 m. E. Abarca parte de los estados Carabobo, Cojedes y Yaracuy, y ocupa una superficie aproximada de 1497,3 km² (Figura 2).

Fisiográficamente se identifican tres zonas: al norte domina un paisaje de colinas y amplios valles de montaña, con pendiente entre el 20 % y el 60 %, en los cuales se asientan algunos centros urbanos importantes como Nirgua, Bejuma, Montalbán y Miranda. Hacia el centro el relieve es predominantemente accidentado y abrupto (pendiente del ≥ 40 %), mientras que al sur dominan los paisajes de colinas bajas redondeadas y planicies intermedias, con pendiente entre el 16 % y el 35 % (Paredes 2009).

La base geológica está compuesta por rocas metamórficas (esquistos, cuarcitas, metareniscas, metaconglomerados, filitas, anfibolitas, gneises), rocas sedimentarias de origen cretácico y terciario (calizas oscuras, areniscas cuarcíticas, conglomerados, lutitas, limonitas) y algunos afloramientos de origen ígneo. En los fondos de valle y en las vegas fluviales se encuentran aluviones recientes de edad cuaternaria compuestos por arenas, limos y arcillas (Gobernación del Estado Cojedes 2011). Las temperaturas medias anuales varían entre los 18 °C (sobre los 1.400 m s. n. m.), a más de 24 °C en la parte baja. Las precipitaciones varían entre 700 mm/año hacia el norte y 1.700 mm/año hacia la parte central de la cuenca. El periodo de lluvia va de mayo a octubre con un pico máximo de precipitación en julio, alternado con un periodo seco durante el resto del año (Gobernación del Estado Cojedes et ál. 2011).

Al norte de la cuenca los usos de la tierra son principalmente agropecuarios, industriales y urbanos, con predominancia de coberturas herbáceas; en la parte central dominan formaciones vegetales boscosas moderadamente intervenidas bajo la protección de dos figuras: Parque Nacional Tirgua y Zona Protectora de la cuenca alta del río Cojedes; en la parte sur predominan arbustales y matorrales junto con amplias zonas dedicadas a la ganadería, además de la ciudad de San Carlos.

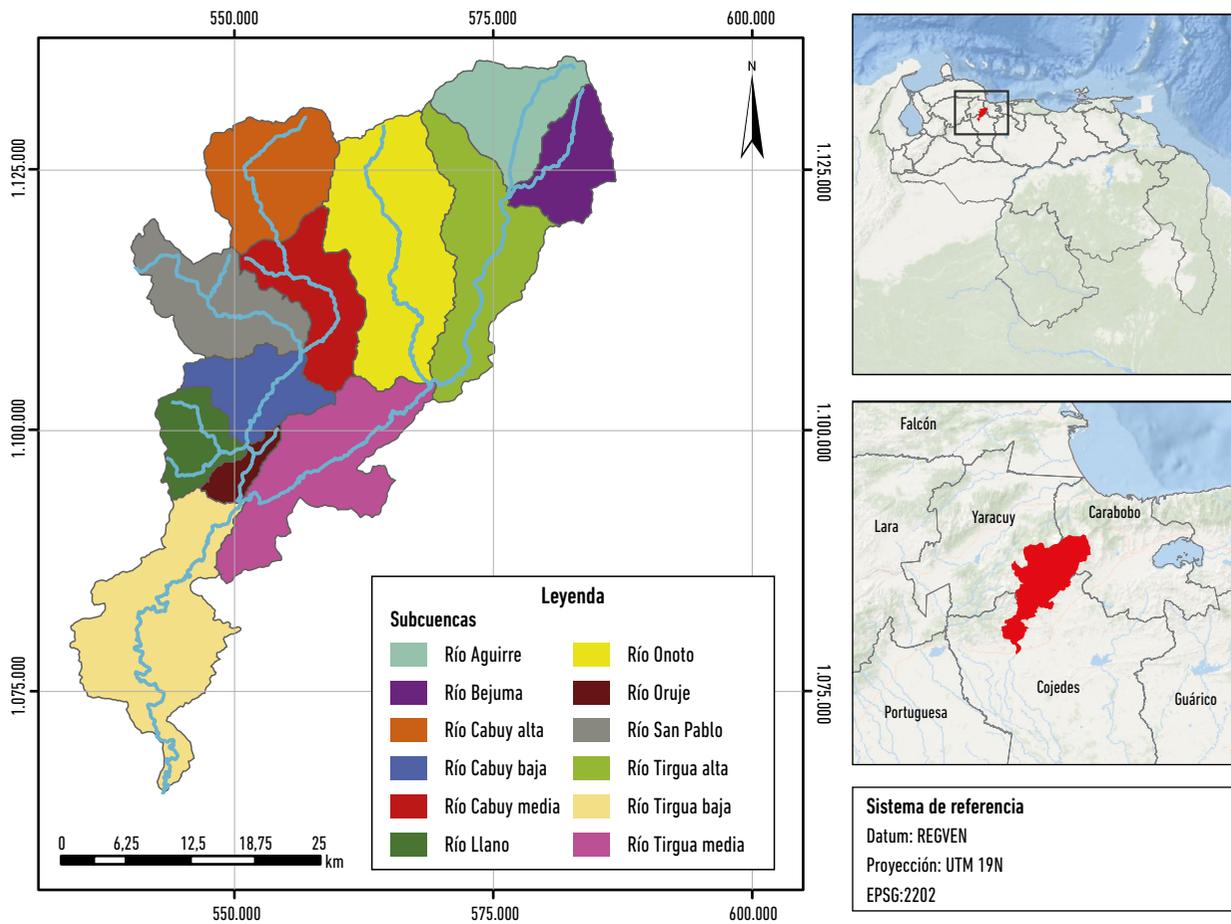


Figura 2. Localización geográfica de la cuenca del río Tirgua y estructura hidrográfica interna.
 Datos: Man y Vega (2017).

Aproximación metodológica

Los enfoques antes destacados fueron la base para concebir la aproximación metodológica de la investigación, en la que fueron combinados tres ejes de estructura y función hidrogeográfica importantes: (1) caracterización de la geomorfometría, a través de la estimación de descriptores geomorfométricos; (2) dinámica hidroclimática a través de métodos de interpolación espacial y métodos indirectos de estimación hidrológica; y (3) análisis espacial de cobertura y usos del terreno. Para ello fue seguido el procedimiento descrito a continuación.

Estadísticas hidroclimáticas

Los datos climatológicos, así como también las series hidrológicas del río Tirgua registradas en la estación hidrométrica Paso Viboral, ubicada al cierre de la cuenca, fueron obtenidos del Instituto Nacional de Tierras —en

adelante, INTI— y del Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas —en adelante, Minea—, Oficina Regional de Cojedes (Tabla 1). La información fue preprocesada para estimar los seudodatos y así completar las series históricas. Los seudodatos de temperaturas fueron obtenidos empleando el método de regresión lineal múltiple (Guevara 2003), mientras que los seudodatos de precipitación fueron estimados a través del método empírico racional deductivo (Guevara 2003) y del análisis doblemente acumulativo o curva doblemente másica (Duque 1989).

Estadísticas geoproductivas

La información sobre producción agrícola y pecuaria fue obtenida del *VII Censo Agrícola de Venezuela* (MPPAT 2008), mientras que los datos de producción industrial fueron extraídos de Bellorín (2008), del INE (2011a), y del *Registro de Actividades Capaces de Degradar el Ambiente* (Minea 2015).

Tabla 1. Estaciones climatológicas consideradas en la investigación

Estación	Serial	Norte UTM	Este UTM	Altitud (m s. n. m.)	Periodo registro
La Sierra*	-	1.094.384	545.344	930	1968 – 1999
UNELLEZ*	2.311	1.071.998	548.053	213	1980 – 2016
Tinaco	2.336	1.072.663	561.429	141	1968 – 2005
Tinaquillo	2.316	1.096.835	577.833	432	1968 – 2007
El retazo	-	1.065.731	546.629	140	1968 – 1999
San José de Chirgua	2.461	103.840	609.696	120	1968 – 1999
Chirgua–Cabeceras	1.318	1.138.084	590.519	845	1968 – 1994
Montalbán*	1.365	1.129.504	572.529	701	1968 – 2004
Chirgua	1.366	1129481	589.446	740	1968 – 1986
Bejuma – Panamericana*	1.368	1.124.270	581.152	677	1968 – 2004
Canoabo	1.370	1.139.132	579.080	298	1968 – 2004
Miranda–La Trinidad*	1.385	1.124.879	563.562	636	1968 – 2004
Palmichal*	6.380	1.140.525	583.943	1.000	1987 – 2004
Campo de Carabobo	1.397	1.106.852	592.730	486	1952 – 2016
Valencia GFV	461	1.126.682	609.962	460	1940 – 2016
Valencia–San Luis	1.387	1.123.255	603.947	548	1968 – 1999
San Felipe	1.343	1.145.658	528.706	320	1960 – 2006
Guarabao	1.354	1.132.876	521.568	260	1968 – 1999
Nirgua*	1.373	1.123.350	548.229	874	1968 – 2004
Temerla	1.380	1.134.122	562.299	435	1963 – 2001
Los Cogollos	6.357	1.122.596	533.533	590	1968 – 1999
La Marroquina	6.359	1.139.491	535.798	115	1969 – 1999
Paso Vaquira	6.360	1.124.065	527.202	360	1969 – 1999
Paso Viboral*	405	1.068.984	544.309	154	1941 – 1992

Datos: INTI-Minea, Oficina Regional de Cojedes.

Nota: (*) estaciones ubicadas dentro de la cuenca.

Caracterización de la geomorfometría de la cuenca

Se seleccionaron dos imágenes de Radar SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) de 90 m de resolución tomadas el 11 de octubre de 2015, las cuales fueron procesadas con un software de Sistema de Información Geográfica (SIG) (Arc Gis 10.2), con el fin de construir la base cartográfica para el procesamiento de la información y la obtención de parámetros geomorfométricos. Se tomó como referencia y control el mapa base de la cuenca elaborado por Paredes et ál. (2006), mientras que la toponimia y la información políticoadministrativa fueron actualizadas a partir de información del INTI-Minea (INTI 2008). Las imágenes fueron seccionadas en función del área de interés, para luego construir el modelo digital de elevaciones —en adelante, MDE—.

La delimitación de la cuenca del río Tigrúa y de las subcuencas que la conforman se realizó con el software modular *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS). Utilizando módulos especiales del software, se procedió a delimitar la red de drenaje sintético para luego determinar sus características o descriptores geomorfométricos más importantes, tanto geométricos como del relieve. Algunos descriptores fueron derivados automáticamente a través de módulos de rutina del software, mientras que otros fueron estimados a través de métodos especificados en la Tabla 2. También fue necesario derivar mapas adicionales como el de pendiente de cada subcuenca, para caracterizar debidamente el relieve y obtener la superficie de área plana en cada una.

Se consideraron para la caracterización hidrogeográfica tres tipos de descriptores: (1) de forma, (2) de relieve

Tabla 2. Descriptores geomorfométricos y climáticos seleccionados para la caracterización hidrogeográfica

Descriptor/ parámetro	Tipo de parámetro	Unidad	Descripción	Método de estimación
Ar	De forma	km ²	Superficie de drenaje común de la cuenca	Automático en SIG
Per	De forma	km	Longitud de la línea divisoria de la cuenca	Automático en SIG
Kc	De forma	[-]	Relación entre el perímetro de la cuenca y el de una circunferencia	Método de Gravelius
Cc	De forma	[-]	Relación entre la forma de la cuenca y la de un círculo	Método de Miller
Al-p	De relieve	m s. n. m.	Altitud promedio de la cuenca	Automático en SIG
Al-m	De relieve	m s. n. m.	Altitud más repetida en la cuenca	Automático en SIG
Pcp	De relieve	%	Pendiente media del cauce principal	Estimación secundaria
A-pl	De relieve	%	Porcentaje total de área plana en la cuenca (P<5%)	Método de Wolock
Dd	De drenaje	km/km ²	Longitud total de drenajes por superficie de la cuenca	Método de Strahler
Lcp	De drenaje	km	Longitud total del cauce principal	Automático en SIG
Ltc	De drenaje	km	Longitud total de los cauces de la cuenca	Automático en SIG
Tcf	De drenaje	horas	Tiempo de concentración del flujo	Kirpich/Giandotti
Perm-lit	De drenaje	[-]	Permeabilidad del estrato litológico	Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés)
I-hum	Climático	[-]	Cociente entre la pp media anual y la ETP	Método de Yadav

y (3) de drenaje. Estos resultan de vital importancia para determinar las relaciones que las condiciones morfológicas, geológicas, climáticas e hidrológicas tienen, y que permiten inferir en conjunto el comportamiento hidrológico intrínseco de cada subcuenca (Viramontes et ál. 2007; Yadav, Wagener y Gupta 2007; Sawicz et ál. 2011). De acuerdo con el enfoque de paisajes hidrológicos seguido en el trabajo, fueron agregados tres parámetros de particular relevancia que permiten ilustrar con cierta precisión la dinámica hidrológica en función del paisaje (Wolock, Winter y McMahon 2004): la proporción de áreas planas en cada subcuenca, la permeabilidad litológica y el índice de humedad. Se sintetizaron las características geomorfométricas derivadas en esta fase metodológica (véase tabla 2).

Posteriormente, con el fin de determinar el poder descriptivo y correlativo de las variables geomorfométricas seleccionadas para lograr una discriminación espacial de las subcuencas, estas fueron sometidas a un ACP, utilizando para ello el software STATISTICA 8.2.

Dinámica hidroclimática de la cuenca

Fueron estimadas las precipitaciones a nivel de la cuenca y sus subcuencas mediante el método isoyético (Aparicio 1989; Chow, Maidment y Mays 1996). Para tal fin, se calcularon los valores de precipitación media anual a partir de las 23 estaciones meteorológicas (véase tabla 1), para luego proceder a la espacialización de

los resultados obtenidos a través del método del vecino natural (*Natural neighbor*) (Hijmans et ál. 2005). La espacialización fue realizada en Arc Gis 10.2, tomando como base cartográfica el MDE de la cuenca previamente construido.

La ETP fue estimada a partir del método de Thornthwaite (1948), el cual se basa en valores de temperatura del aire para estimar la evapotranspiración potencial de un lugar, a través de la Ecuación 1. Los resultados fueron espacializados siguiendo el mismo procedimiento descrito en el punto anterior.

Ecuación 1.

$$ETP = 1,6 \left(\frac{10t}{I} \right)^\alpha$$

$$I = \sum_i$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

$$\alpha = 6,15 \times 10^{-7} * I^2 - 7,71 \times 10^{-5} * I + 1,792 \times 10^{-2} * I + 0,49239$$

Donde:

ETP= evapotranspiración potencial en cm/mes.

t = temperatura media mensual (°C).

i = índice calórico mensual.

Se estimaron los caudales medios de las subcuencas a través del método de Transposición de Caudales, también

conocido como método del Coeficiente de Transferencia (TAHAL Consulting Engineers LTD. 1998). Este método permite relacionar un caudal patrón registrado y medido en un punto de una cuenca con la precipitación promedio y extensión territorial de sus subdivisiones hidrográficas, para obtener el caudal promedio de cada una de ellas (Naranjo y Duque 2004). Se tomó como patrón el caudal promedio mensual medido en la estación hidrométrica Paso Viboral para el periodo 1962-1992, y, haciendo uso de las ecuaciones 2 y 3, se obtuvieron los caudales de cada subcuenca:

Ecuación 2.

$$T_c = \frac{A_{est}}{A_{pat}} * \frac{P_{p est}}{P_{p pat}}$$

Ecuación 3.

$$Q_{est_i} = Q_{pat_i} * T_c$$

Donde:

A_{est} = área de la unidad bajo estudio o subcuenca (km²).

A_{pat} = área de la cuenca patrón (km²).

P_{pest} = precipitación promedio de la unidad bajo estudio (mm).

P_{pat} = precipitación promedio de la cuenca patrón (mm).

Q_{est_i} = caudal estimado de cada unidad bajo estudio (subcuenca) para el mes i (m³/s).

Q_{pat_i} = caudal patrón para el mes i (m³/s).

Análisis espacial de cobertura y uso del terreno

El análisis de la cobertura y uso del terreno fue derivado a partir de la interpretación de una imagen Landsat 8: LC80050532016018LGN00 de 30 m de resolución, tomada el 18 de enero de 2016. Las categorías fueron identificadas a partir del índice diferencial de vegetación normalizada —en adelante, NDVI—, indicador que mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres; el índice arroja valores de intensidad del verdor de la vegetación, así como de las zonas no vegetadas, permitiendo determinar el estado de vigor de la vegetación presente en la superficie (Chuvienco 2010). El NDVI es un índice adimensional y por lo tanto sus valores van de +1 a -1; se calcula a través de la Ecuación 4:

Ecuación 4.

$$NDVI = \frac{\text{Banda 5 (Infrarrojo Cercano)} - \text{Banda 4 (Rojo)}}{\text{Banda 5 (Infrarrojo Cercano)} + \text{Banda 4 (Rojo)}}$$

Una vez estimados los valores del índice, siguió un proceso de interpretación para establecer los límites de clase que diferenciaron las tipologías de vegetación, y

luego se procedió a su respectiva validación en campo. Finalmente, se elaboró la respectiva matriz de error de la evaluación, y resultó en un nivel de precisión del 88 %.

Resultados y discusión

El río Tirgua nace en la Serranía del Interior con el nombre de río Aguirre y su longitud es de 127 km hasta el punto de cierre en el puente sobre la autopista José Antonio Páez (troncal 5) al suroeste de la ciudad de San Carlos. Tal como se observa en la figura adjunta a la Tabla 3, la cuenca tiene una forma alargada y una asimetría absoluta, ya que su área de captación y su red de drenaje se encuentran completamente en su vertiente derecha. Está conformada por 12 subcuencas de superficie y geometría variables, siendo Onoto la subcuenca de mayor tamaño, mientras que Oruje tiene la menor superficie (Tabla 3).

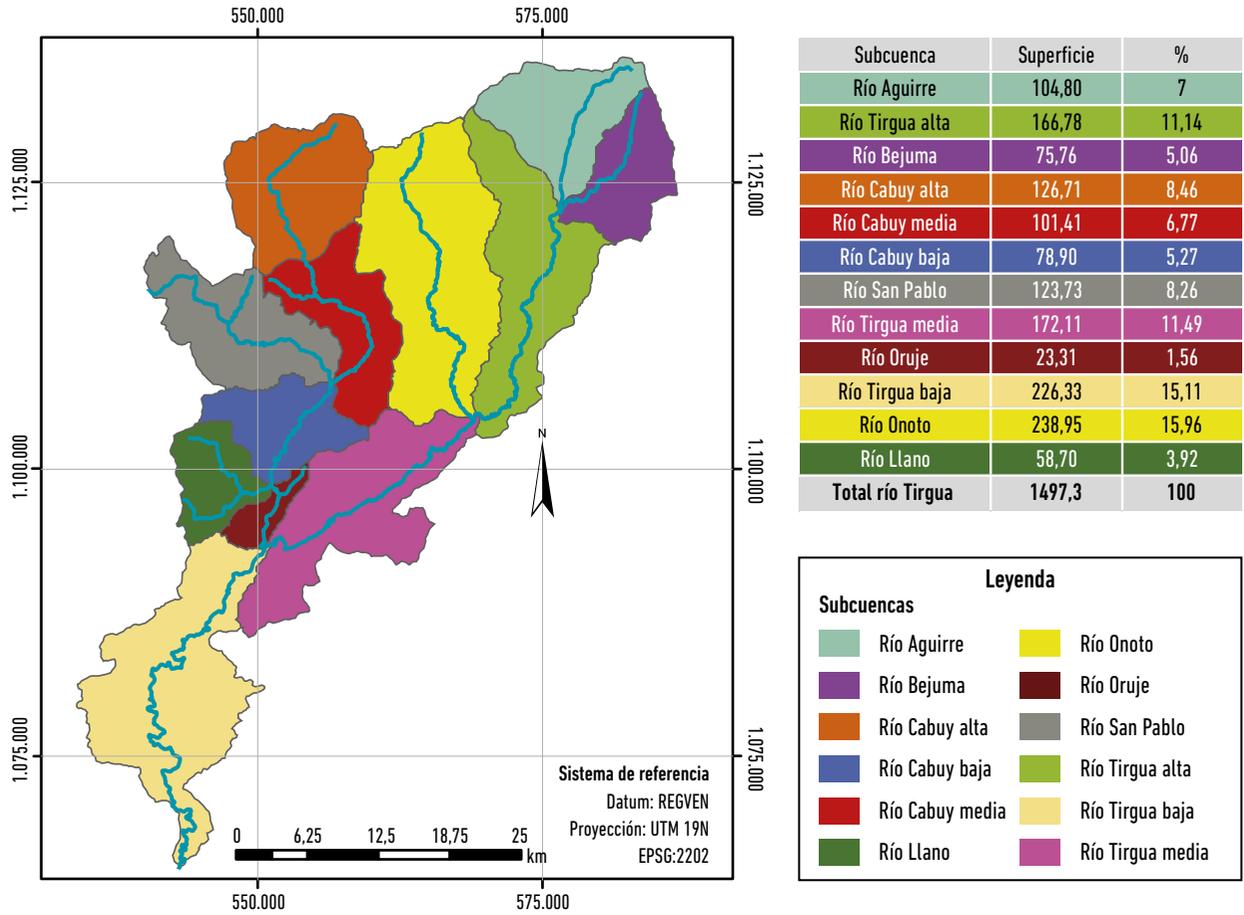
Dentro de la cuenca se encuentra uno de los principales acuíferos subterráneos de la región occidental de Venezuela: el Gran Acuífero de Nirgua y Salom, perteneciente a la Provincia Hidrogeológica de Nirgua-Montalbán (Jegat 2016), el cual constituye la principal fuente de agua de poblaciones de las parroquias Nirgua, Salom (estado Yaracuy), Miranda y Montalbán (estado Carabobo). El acuífero cuenta con unas reservas permanentes de 687.000.000 m³ y su recarga tiene estrecha relación con la dinámica hidrogeológica de la cuenca del río Cabuy (Grisolía y Rojas 2005).

Geomorfometría de la cuenca del río Tirgua

La Figura 3 muestra el set de descriptores geomorfológicos representados en un gráfico de coordenadas paralelas, en el que cada subcuenca se identifica cromáticamente con el color especificado en la Tabla 3. Es importante destacar que, debido a su homogeneidad intrínseca resultante, el descriptor permeabilidad litológica (Perm-lit) fue excluido de la evaluación estadística; no obstante, fue considerado para complementar la discusión de los resultados.

Los descriptores de forma muestran un comportamiento heterogéneo y denotan que las subcuencas son distintas entre sí en cuanto a: área (Ar), perímetro (Per) y circularidad (Cc). En cuanto a los descriptores de relieve, se muestran algunas tendencias a la homogeneidad en cuanto a la altitud. Seis subcuencas acusan valores casi iguales de altitud modal (Al-m), mientras nueve subcuencas muestran que la altitud promedio (Al-p) se ubica en rangos de valores bastante similares entre sí. De lo anterior se deriva el comportamiento de la pendiente del

Tabla 3. Cuenca del río Tirgua y subcuencas que la conforman



Datos: imágenes de Radar SRTM (11.10.2015) de 90 m de resolución.

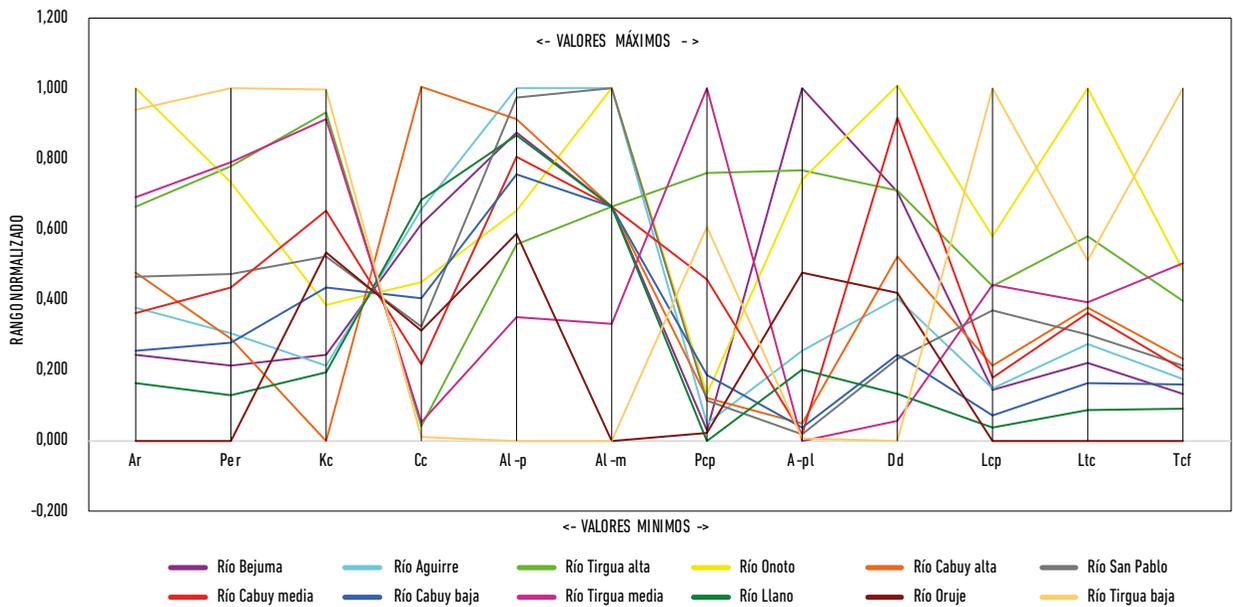


Figura 3. Descriptores geomorfométricos de las subcuencas mostrados de forma paralela. Datos: procesamiento en Arc Gis 10.2 y cálculos propios. Nota: las subcuencas están cromáticamente identificadas, con el mismo color de la Tabla 3.

cauce principal (Pcp), la cual notablemente se muestra homogénea, ya que en ocho subcuencas la pendiente oscila entre el 1 % y el 6 %. De igual forma, la proporción de superficie plana (A-pl) denota que la mayoría de las subcuencas posee laderas inclinadas y, en consecuencia, las superficies planas son pocas o inexistentes. Solamente las subcuencas Bejuma, Tirgua alta y Onoto poseen una apreciable proporción de área plana, lo que indica un potencial aporte a los almacenamientos subterráneos.

Los descriptores de flujo muestran también patrones heterogéneos, sobre todo la densidad de drenaje (Dd); sin embargo, la longitud del cauce principal (Lcp) y el tiempo de concentración de flujo (Tcf) se muestran tendencialmente muy similares. La mayoría de las subcuencas concentran sus flujos entre 2 y 4 horas después de un evento de precipitación.

Los descriptores geomorfométricos fueron procesados estadísticamente con el fin de describir cuantitativamente su comportamiento, y así lograr una diferenciación o discriminación espacial entre subcuencas. El análisis de componentes principales (ACP), se realizó a partir de la matriz de los datos estandarizados.

La Tabla 4 muestra la proporción de varianza explicada por los componentes principales obtenidos a partir del ACP, observándose que el 87,55 % de la carga explicativa de la varianza de los descriptores se concentra en los tres primeros componentes. Los mismos fueron seleccionados bajo el criterio de que un CP debe explicar al menos el 10 % de la varianza total de los datos. Por tanto, el 22,98 % restante corresponde a la suma de los otros 9 componentes calculados. Para fines de este trabajo se consideró la

interpretación de los dos primeros componentes, ya que son los que tienen un mayor aporte a la descripción de la variabilidad del comportamiento de los descriptores geomorfométricos en la cuenca.

La Tabla 5 muestra las cargas explicativas de los descriptores geomorfométricos en cada uno de los componentes principales. El CP1 agrupa a todos los descriptores de forma, 3 descriptores de drenaje (Ltc, Lcp y Tcf), y dos descriptores de relieve (Al-p y Pcp). En el CP2, por su parte, la variabilidad intersubcuencas está mayormente explicada por la altitud modal (Al-m), la densidad de drenaje (Dd) y la longitud total de cauces (Ltc). En el CP3 la variabilidad espacial es explicada por la proporción de área plana en las subcuencas (A-pl).

La Figura 4 muestra el círculo de correlaciones de los descriptores geomorfométricos, combinando los CP1 y CP2. Estos dos componentes muestran en los cuadrantes II, III y IV las diferentes correlaciones entre los descriptores geomorfométricos; se pudieron observar, en primer lugar, correlaciones simples positivas y negativas estadísticamente significativas entre varios de los descriptores, mostrando a su vez contribuciones importantes en la explicación de la variabilidad. En segundo lugar, aparecen descriptores como Pcp, A-pl, Dd, Al-m y Cc que, aun cuando su contribución no es importante, se encuentran altamente correlacionados de forma positiva con otros; tal es el caso de Al-p con respecto a Cc y de A-pl con Dd. Otras correlaciones positivas importantes se observan entre Kc con Pcp, Lcp con Per y Tcf con Lcp. Correlaciones inversas o negativas estadísticamente significativas las muestran los descriptores Cc y Al-p con Kc y Pcp.

Tabla 4. Varianza explicada por los componentes principales

Componente principal	Valor propio	% de la Varianza total	Valor propio acumulado	Varianza acumulada %
1	6,648617	55,40514	6,64862	55,4051
2	2,593834	21,61528	9,24245	77,0204
3	1,263740	10,53117	10,50619	87,5516
4	0,806619	6,72182	11,31281	94,2734
5	0,343337	2,86114	11,65615	97,1346
6	0,243105	2,02587	11,89925	99,1604
7	0,074108	0,61757	11,97336	99,7780
8	0,022815	0,19013	11,99617	99,9681
9	0,002916	0,02430	11,99909	99,9924
10	0,000733	0,00611	11,99982	99,9985
11	0,000176	0,00147	12	100

Datos: derivados de procesamiento en STATISTICA 8.2.

Tabla 5. Carga explicativa de los componentes principales

Variable	Componentes Principales		
	1	2	3
Ar	-0,82912	-0,49132	0,24586
Per	-0,95136	-0,24763	0,11652
Kc	-0,85385	0,28533	-0,32502
Cc	0,77827	-0,27246	0,39264
Al-p	0,87764	-0,31201	0,14306
Al-m	0,39670	-0,71324	0,28643
Pcp	-0,81736	0,17304	-0,14460
A-pl	0,13625	-0,52586	-0,68952
Dd	0,18794	-0,76142	-0,48018
Lcp	-0,91312	-0,20194	0,20986
Ltc	-0,60478	-0,77205	0,05721
Tcf	-0,93391	-0,07963	0,23059

Datos: derivados de procesamiento en STATISTICA 8.2.

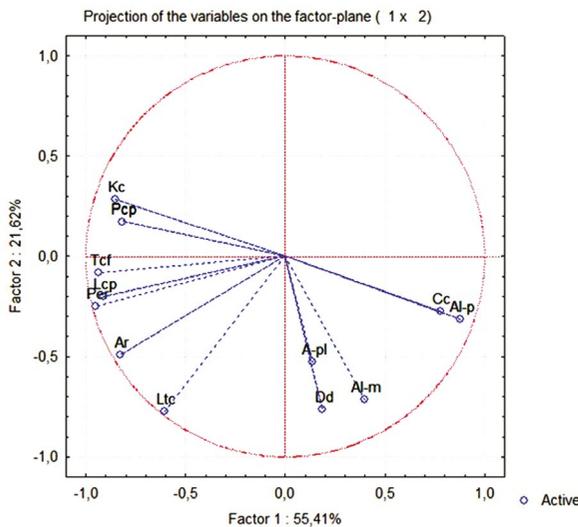


Figura 4. Circulo de correlaciones que muestra la proyección de las variables en el plano cartesiano, combinando los CP1 y CP2. Datos: derivados de procesamiento en STATISTICA 8.2.

La Figura 5 muestra la proyección de los casos (subcuencas) en el plano cartesiano, y la correspondiente nube de individuos. En el primer cuadrante aparecen las subcuencas: Oruje, Llano y Cabuy baja. La inexistencia de descriptores en este cuadrante del círculo de correlaciones indica que la conformación de este grupo de subcuencas no es explicada por ninguno de los descriptores evaluados, y que su similitud podría ser determinada estadísticamente por el 22,98 % restante de la varianza que no logra ser explicada por los tres componentes seleccionados. Estas tres subcuencas aparecen dispuestas en forma contigua

en el sector medio de la cuenca, con tamaños, formas y geometría variables entre sí, por lo que ninguno de los descriptores evaluados logra definir un nivel de similitud de forma efectiva entre estas subcuencas.

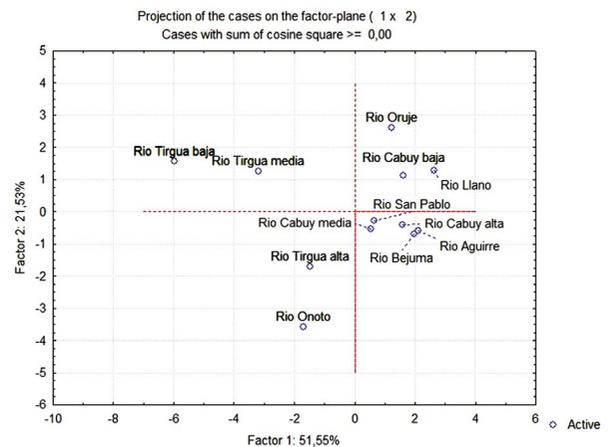


Figura 5. Proyección de los casos (subcuencas) en el plano cartesiano, y la correspondiente nube de individuos. Datos: derivados de procesamiento en STATISTICA 8.2.

En el segundo cuadrante aparecen agrupadas las subcuencas Tirgua media y Tirgua baja. Estas unidades aparecen contiguas entre sí, y conforman la parte media y baja de la cuenca. Ambas poseen superficies similares y una geometría irregular, aunque presentan valores de coeficiente de compacidad (Kc) bastante similares (1,77 y 1,83 respectivamente). De igual manera, la localización relativa de ambas subcuencas dentro de la cuenca del Tirgua, implica que las mismas poseen una morfología superficial igualmente similar, mostrando por tanto valores de pendiente del cauce principal (Pcp) altamente similares entre sí.

Las subcuencas Tirgua alta y Onoto aparecen en el tercer cuadrante; son unidades contiguas que comparten perímetro en la parte alta de la cuenca del Tirgua. Poseen una apreciable similitud en cuanto a superficie (Ar) y perímetro (Per). Ambas tienen una forma simétricamente alargada, algo determinante en la configuración interna de la red de drenaje, lo cual incide en una altamente similar longitud del cauce principal (Ltc) (28,78 y 34,99, respectivamente) y en los tiempos de concentración de flujo (Tcf), altamente similares (3,95h y 4,32h, respectivamente).

Por último, el cuarto cuadrante contiene el grupo más numeroso, en el que aparecen las subcuencas San Pablo, Cabuy media, Cabuy alta, Aguirre y Bejuma. Estas conforman la mayor parte de la cuenca alta del río Tirgua, y son, por tanto, subcuencas de cabecera. La localización

relativa implica que sus condiciones de morfología del relieve son particulares, y es el elemento dominante en su discriminación grupal, ya que tres de los descriptores de relieve —altitud promedio (Al-p), altitud modal (Al-m) y área plana (A-pl)— tienen una alta contribución a su conformación grupal. De hecho, estas subcuencas presentan una importante proporción de áreas planas, y tienen un rol trascendente en los procesos de infiltración, transferencia vertical de agua en los suelos y recarga subterránea. Por otra parte, son subcuencas con formas relativamente circulares, con limbos de cabecera anchos que facilitan la captación y acumulación de escorrentía; derivado de esto, los patrones superficiales de drenaje son muy similares en cuanto a densidad y distribución espacial.

Hidroclimatología del río Tirgua

De acuerdo con la clasificación de provincias pluviométricas de Venezuela (Silva 2010), la cuenca del río Tirgua se considera moderadamente lluviosa, con 1.210 mm/año, hecho que, sumado a la marcada estacionalidad de las precipitaciones y la influencia de la variabilidad climática que afecta la pluviometría durante la temporada de lluvias, no permite considerar al río Tirgua como una fuente confiable de recursos hídricos (Paredes et ál. 2006; Paredes 2009). Si bien la cuenca presenta un régimen de precipitaciones moderado durante el año, estas no se distribuyen de manera uniforme en el tiempo ni el espacio.

La Tabla 6 muestra los valores estimados de: precipitación media anual, ETP media anual, índice de humedad (I-hum), y caudal medio anual, para cada una de las subcuencas. Estos valores fueron normalizados para ser más fácilmente visualizados y comparados en la Figura 6a, junto con la dinámica temporal de las precipitaciones en cuatro estaciones climatológicas dentro de la cuenca (Figura 6b); la Figura 6c, por su parte, muestra la dinámica temporal de los caudales del río Tirgua en la estación Paso Viboral, al cierre de la cuenca. Las tendencias reflejadas en la Figura 6(a) permiten diferenciar la cuenca del río Tirgua en tres grandes zonas.

La zona superior o cuenca alta

Está conformada por cinco subcuencas: Bejuma, Aguirre, Tirgua alta, Onoto y Cabuy alta. Las subcuencas Onoto y Tirgua son la primera y tercera en cuanto a superficie, respectivamente, y son geoméricamente alargadas, lo que permite la acumulación progresiva de flujo superficial. Por su parte, las subcuencas Aguirre, Bejuma y Cabuy alta constituyen cuencas de cabecera de forma elongada y corto recorrido de flujo, lo que favorece la captación, transmisión y acumulación de agua superficial. Geológicamente, la zona está dominada por esquistos y gneises de los complejos litológicos de San Julián y Nirgua, con una permeabilidad litológica (Perm-lit) moderada, de acuerdo a las tablas del USGS (MOPT 1992; Wolock, Winter, y McMahon 2004). Estos complejos coexisten con amplios aluviones recientes que dieron lugar a los

Tabla 6. Parámetros hidroclimáticos de las subcuencas que conforman la cuenca del río Tirgua

Subcuenca	Total (km ²)	Pp (mm)	ETP (mm)	I-hum (P/ETP)	Caudal (m ³ /seg)
Río Bejuma	75,76	1.000	1.087	0,920	0,59
Río Aguirre	104,80	938	1.153	0,814	0,76
Río Tirgua alta	166,78	968	1.150	0,842	1,25
Río Onoto	238,95	920	1.150	0,800	1,71
Río Cabuy alta	126,71	852	1.064	0,801	0,84
Río San Pablo	123,73	1.091	1.226	0,890	1,05
Río Cabuy media	101,41	961	1.156	0,831	0,76
Río Cabuy baja	78,90	1.385	1.225	1,131	0,85
Río Tirgua media	172,11	1.463	1.333	1,098	1,95
Río Llano	58,70	1.600	1.298	1,233	0,73
Río Oruje	23,31	1.703	1.355	1,257	0,31
Río Tirgua baja	226,33	1.636	1.497	1,093	2,87
Río Tirgua	1.497,3	1.210	1.224,5	0,976	13,95

Datos: procesamiento en Arc Gis 10.2 y cálculos propios.

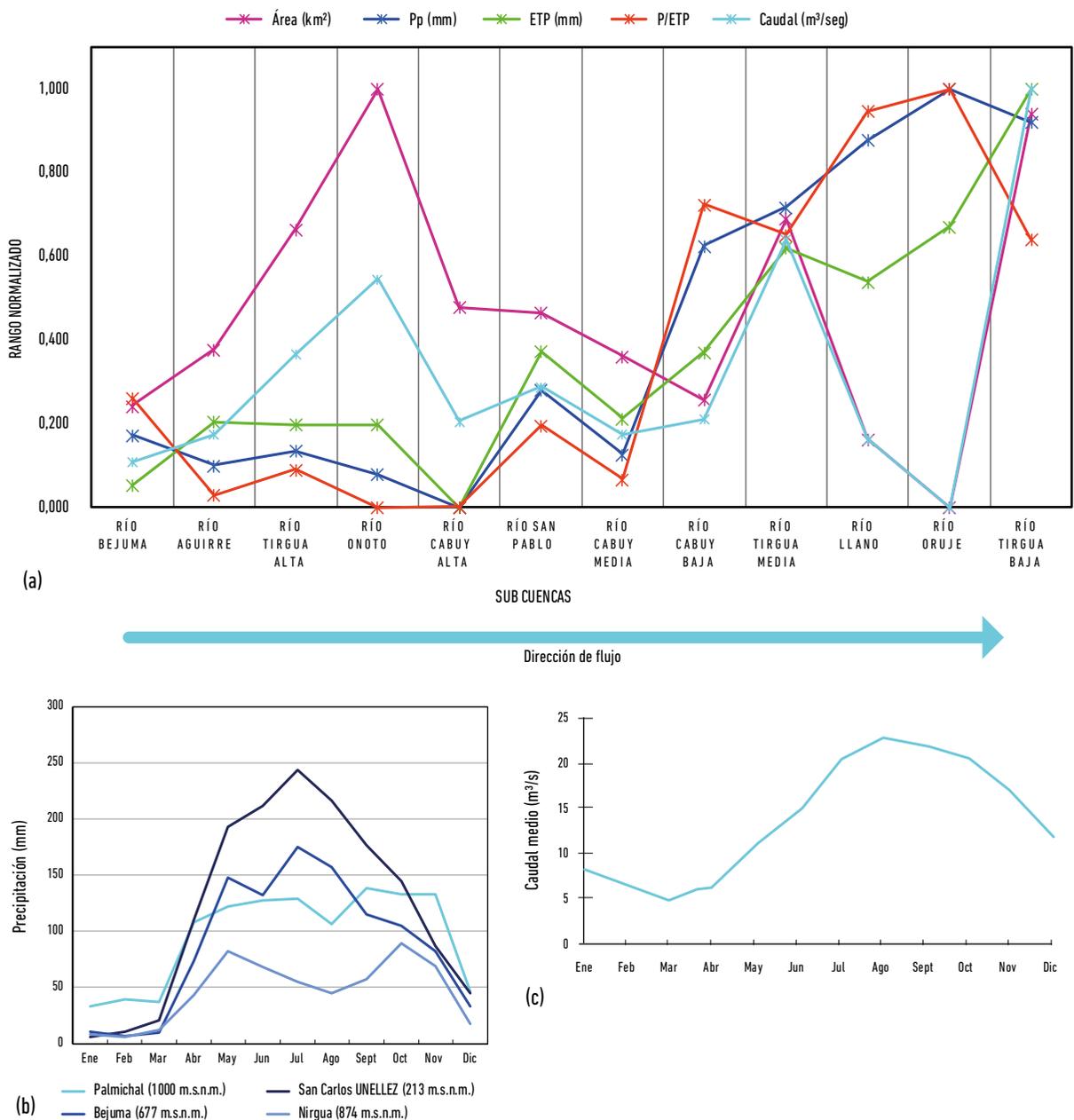


Figura 6. Dinámica hidroclimática del río Tigua: (a) dinámica de los parámetros hidroclimáticos a nivel de subcuenca, (b) variabilidad temporal de las precipitaciones en 4 estaciones localizadas dentro de la cuenca, (c) variabilidad temporal del caudal medio del río Tigua en la estación Paso Viboral.

Datos: procesamiento en Arc Gis 10.2 y cálculos propios.

valles altos de Aguirre, Bejuma y Cabuy, conformados por material aluvio-coluvial y saprolita residual procedente de las formaciones antes mencionadas. Tales aluviones constituyen zonas conductoras y retentoras de humedad, fundamentales para la alimentación de los cauces, el mantenimiento del flujo base y la transmisión de agua hacia los depósitos subterráneos y acuíferos (Price 2011). De hecho, las subcuencas Aguirre, Bejuma y Cabuy alta cuentan

con las mayores proporciones de área plana (34,70 %; 26,79 % y 25,85 %, respectivamente), lo que favorece el proceso de infiltración, transmisión hídrica vertical y alimentación de los flujos subterráneos en detrimento del flujo superficial (Winter 2001). Ello resulta esencialmente determinante en la alimentación del Acuífero de Nirgua y Salom, antes mencionado. No obstante, Tetzlaff y Soulsby (2008) y Price (2011) consideran que las zonas

planas en cuencas de cabecera constituyen la principal fuente hídrica para los flujos de base de los ríos, con lo cual, estas subcuencas presumiblemente cumplen también esta función esencial en la dinámica del río Tirgua.

En cuanto a la condición climática, la zona superior se caracteriza por moderados valores de precipitaciones, inferiores a los 1.000 mm anuales, y una corta estación húmeda (3 meses), tal como se observa en la curva de la estación Nirgua (véase figura 6b); mientras tanto, los valores de evapotranspiración superan los 1.000 mm anuales, con un balance hídrico mayormente negativo. Los valores de índice de humedad (I-hum) así lo corroboran, ya que las subcuencas de Onoto y Cabuy alta poseen los valores más bajos (0,800 y 0,801 respectivamente). En general, las tendencias individuales denotan una diferencia intervariables importantes, reflejada en una notable amplitud entre las curvas.

El aporte hídrico superficial en esta zona está virtualmente dominado por los aportes netos de las dos mayores subcuencas, Onoto y Tirgua alta, mientras que las tres subcuencas restantes tienen una importante función hidrogeológica, en la alimentación de los acuíferos de la zona y en los caudales base. No obstante, debe quedar claro que los caudales de las subcuencas constituyen estimaciones hechas a partir de un método indirecto, aportando solo una idea aproximada de lo que podría ser la respuesta hidrológica real de cada subcuenca.

La zona de transición o cuenca intermedia

Se encuentra conformada por las subcuencas San Pablo, Cabuy media, Cabuy baja y Tirgua media. En esta sección persiste una heterogeneidad tanto morfológica como de superficie de las subcuencas, lo cual incide en su respuesta hidrológica. Litológicamente, esta zona es dominada por el Complejo de Nirgua y el Esquisto de las Mercedes, con unos niveles moderados de permeabilidad (Perm-lit). El comportamiento de las variables climáticas es notablemente particular, ya que la subcuenca Cabuy media se constituye en una zona crítica de cambio tendencial, al converger allí las curvas de precipitación, ETP e I-hum, lo que marca una inversión de tendencia en cuanto al balance hídrico (véase figura 6a). En esta sección el relieve presenta una mayor homogeneidad morfológica y un mayor nivel de disección superficial, reflejado en una dominancia de zonas de ladera accidentada con pendiente > 30 %. Las proporciones de superficie en este rango de pendiente son: San Pablo (53,55 %), Cabuy media (48,64 %), Cabuy Baja (57,7 %) y Tirgua media (48,78 %). Ello sugiere que, con suelos muy poco desarrollados y

laderas altamente disectadas, esta sección tiene una funcionalidad hidrológica esencialmente orientada a favorecer la transmisividad hídrica lateral, a la generación de flujo hortoniano o escurrimiento superficial y a la acumulación de flujo a nivel del canal o sección del cauce (Winter 2001).

La zona inferior o cuenca baja

Está conformada por las subcuencas Llano, Oruje y Tirgua baja. Son subcuencas geométricamente diferentes entre sí, en las que se aprecia notablemente el dominio de un balance hídrico positivo, ya que hacia esta zona se registran los mayores valores de precipitación, como lo refleja la estación San Carlos UNELLEZ (véase figura 6b). Los valores de ETP, si bien son altos, se mantienen por debajo de la precipitación, por lo que el I-hum refleja un régimen húmedo en la zona, en donde las subcuencas de Oruje y El Llano muestran los mayores valores: 1,257 y 1,233, respectivamente. Esta sección posee un relieve de transición entre las laderas accidentadas de la parte media y zonas planas hacia el extremo sur de la subcuenca Tirgua baja. No obstante, las mayores proporciones de zonas con pendiente > 30% se encuentran en las subcuencas de Oruje (63,13 %), Llano (61,41 %) y Tirgua baja (50,36 %), lo cual sugiere que la acumulación y conducción de flujo hortoniano es hidrológicamente dominante en el sector. La presencia de calizas y lutitas de las formaciones Agua Blanca y Mucaria, respectivamente, indican que en esta zona la permeabilidad se ve reducida, lo cual disminuye la transmisividad vertical y favorece el flujo superficial. Desde el punto de vista hidrológico, la subcuenca Tirgua baja finalmente encauza y conduce la totalidad de escurrimiento superficial hasta el punto de cierre en la estación paso Viboral, en donde el flujo tiene una dinámica temporal reflejada en la Figura 6c.

Cobertura y uso de la tierra en Tirgua

Paredes (2009), sugiere que probablemente los cambios de cobertura y uso ocurridos en los últimos años han generado una disminución del gasto medio del río Tirgua.

Los resultados indican que las tipologías de cobertura predominantes en la cuenca del río Tirgua están asociadas a formaciones vegetales como arbustales y matorrales (poco más de la mitad de la superficie total cubierta); también destacan los herbazales, bosques y las áreas de pastoreo/cultivo (Figura 7). La distribución de los tipos de cobertura considerados responde principalmente a la precipitación, pues en general la cuenca es moderadamente lluviosa, por lo que los arbustales

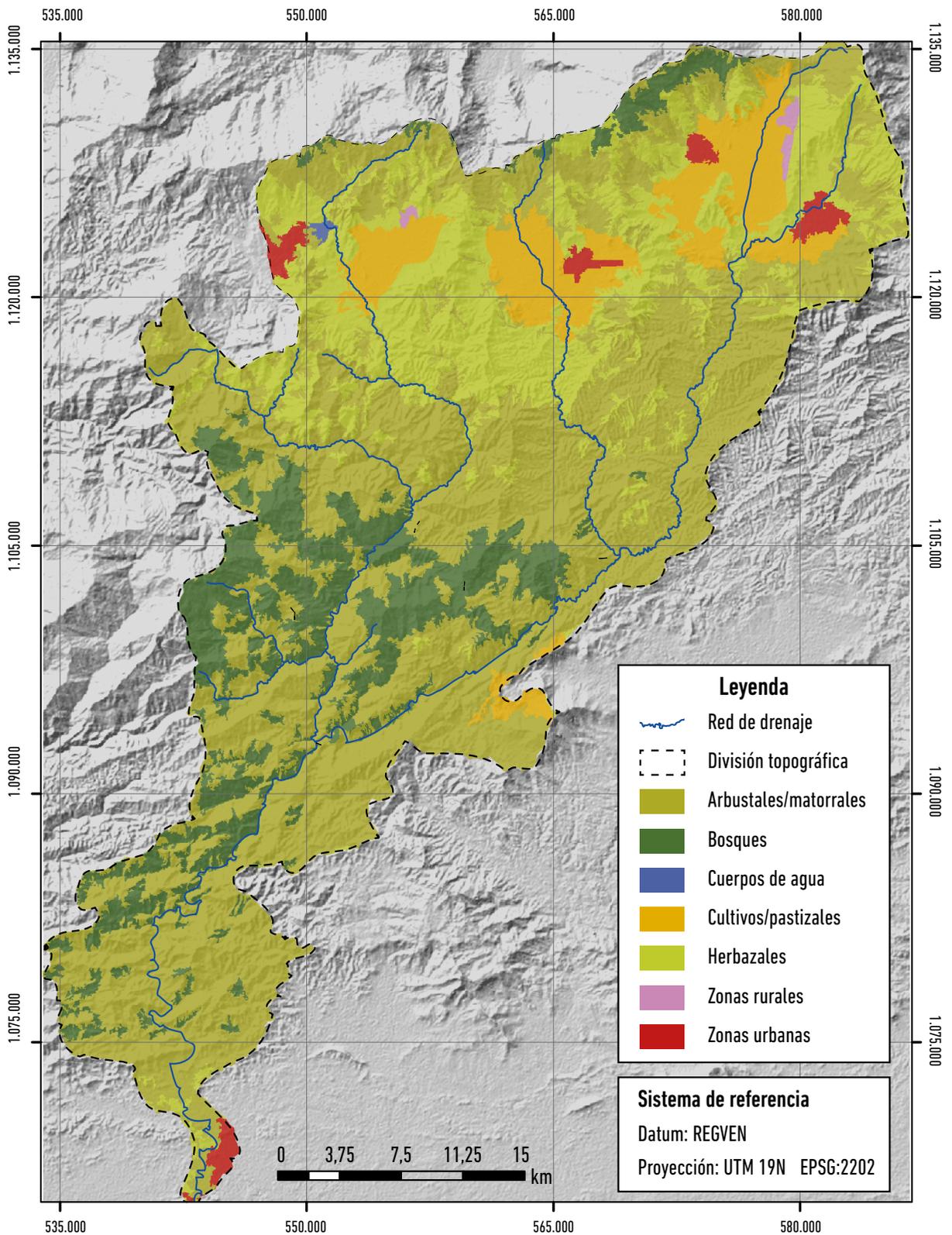


Figura 7. Cobertura del terreno en la cuenca del río Tirgua, 2016.
 Datos: imágenes de Radar SRTM (11 de octubre de 2015) de 90 m de resolución. Imagen LANDSAT 8 (18 de enero de 2016). Proceso en Arc Gis 10.2.

y matorrales se distribuyen de manera más o menos uniforme; la intensidad de las precipitaciones es mayor hacia la parte central, donde se ubican buena parte de los bosques más densos de la cuenca, aunque su nivel de fragmentación es notable.

El predominio de coberturas con poca masa vegetal (arbustales, matorrales, herbazales), es un rasgo indicativo de la dinámica hidroclimática de la cuenca, la cual es dominada por la estacionalidad de las lluvias, elevadas temperaturas y balance hídrico negativo; por otra parte, dichas coberturas no favorecen la concentración de humedad atmosférica o a nivel del suelo, ni ofrecen las ventajas de las coberturas boscosas para la generación de recursos hídricos superficiales abundantes.

Cabe señalar que las coberturas asociadas a bosques, herbazales y arbustales presentan distintos grados de intervención antropogénica a lo largo y ancho de toda la cuenca, viéndose más afectadas las zonas al norte y al sur. Dicha intervención está estrechamente ligada a la dinámica de las áreas urbanas y rurales, y de las explotaciones agropecuarias de la cuenca; incluso ha llegado a afectar algunas partes de las áreas bajo uso conservacionista, sobre todo en las inmediaciones de La Sierra y Nirgua.

La Figura 8 presenta la proporción de área ocupada por cada tipología de uso de la tierra en las subcuencas. En el área fueron tipificadas siete categorías de uso de la tierra: agrícola, pecuario, urbano, industrial, rural, conservacionista y áreas sin uso aparente. Se observa que, de las 12 subcuencas, 4 se muestran virtualmente como subcuencas de usos múltiples, ya que todos los usos tipificados tienen una expresión espacial en estas. Son las subcuencas Aguirre, Onoto, Cabuy alta y Tirgua baja. La subcuenca Bejuma aparece en segundo lugar con cinco usos en su territorio. Un tercer grupo de subcuencas aparece con cuatro tipos de uso: San Pablo, Cabuy media, Cabuy baja, Tirgua media y Llano. Por último, las subcuencas Tirgua alta y Oruje solo presentan 3 categorías de uso.

Los usos agrícola y pecuario existen en todas las subcuencas, lo cual implica que en todas estas existen fuentes difusas de contaminación del agua muy propias de tales categorías de uso. El uso agrícola se muestra gráficamente de igual proporción en todas las subcuencas (véase figura 8), pero ello obedece solo a la relación entre la superficie ocupada por el uso y la superficie total de cada subcuenca. La subcuenca Onoto tiene la mayor superficie agrícola (17,91 km²), mientras que la subcuenca Oruje tiene la menor superficie, tan solo 1,4 km². En el uso pecuario, por su parte, su superficie se incrementa

progresivamente de la parte superior de la cuenca hasta el punto de cierre, de modo que la subcuenca Bejuma tiene la menor superficie (4,77 km²), y en la subcuenca Tirgua baja alcanza los 75,41 km².

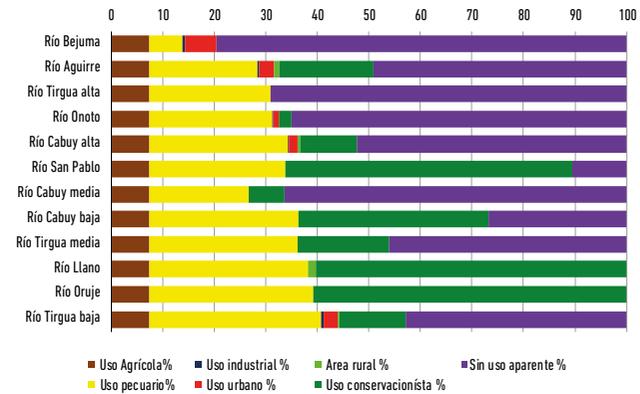


Figura 8. Distribución relativa de las categorías de uso de la tierra a nivel de subcuenca.

Datos: procesamiento en Arc Gis 10.2 y cálculos propios.

Geográficamente, 3 de las 4 subcuencas de usos múltiples se localizan en la zona superior de la cuenca, y la subcuenca Bejuma —segunda en diversidad tipológica de usos— tiene las mayores superficies de uso urbano e industrial, con el 6 % y el 0,65 % respectivamente. Tal diversidad obedece a sus condiciones morfológicas, y en particular a la presencia de una apreciable proporción de áreas planas en los fondos de valle intramontanos, que favorecen el emplazamiento de centros poblados y el desarrollo de usos como la agricultura, ganadería y la actividad industrial. Tal como fue comentado anteriormente, la proporción de superficie plana tiene una crucial función en la dinámica del paisaje hidrológico, al favorecer de forma sustancial la infiltración y en consecuencia los procesos hidrogeológicos subterráneos. Esta misma funcionalidad suele tener en este tipo de paisajes una retroalimentación negativa, al favorecer de igual modo la transmisión y difusión de agentes contaminantes hacia los depósitos subterráneos y hacia los cauces.

Según Price (2011), el uso urbano juega un notable rol en la reorganización de los flujos superficiales y sub-superficiales, como consecuencia de la impermeabilización de superficies, la desaparición de áreas verdes y la canalización de los drenajes urbanos. Ello genera 3 principales efectos hidrológicos: incremento de los caudales pico, redistribución del agua entre los periodos climáticos anuales extremos y aumento en la variabilidad diaria de los caudales (Konrad y Booth 2005). Pero uno de los efectos más significantes del uso urbano es la substancial afectación en la química del agua y en la disminución de

su calidad, especialmente en regiones donde no existe tratamiento (Taka 2017).

En el río Tirgua, por tanto, sus cuencas de cabecera y de la zona superior tienen una mayor demanda de recursos hídricos con fines agrícolas, pecuarios, industriales y urbanos, con notable ausencia de sistemas de tratamiento; en consecuencia, muestran una mayor contribución real a la afectación de la calidad de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, hecho favorecido además por las litologías subyacentes en el área, las cuales presentan en general un nivel de permeabilidad moderado.

Por último, el uso conservacionista se concentra especialmente en las zonas intermedia y baja de la cuenca (véase figura 8). En la zona superior solo las subcuencas Aguirre, Onoto y Cabuy alta poseen en sus territorios superficies bajo protección, aunque proporcionalmente bajas: el 18,28 %, el 2,29 % y el 11 % respectivamente. Las subcuencas con mayor superficie protegida son Llano y Oruje, cuya figura de protección derivada del Parque Nacional Tirgua y de la Zona Protectora de la cuenca alta del río Cojedés abarca la totalidad de ambas subcuencas. La subcuenca San Pablo les secunda, con una superficie protegida del 55,60 %, Cabuy baja con un 37 % de superficie protegida, mientras que en un último grupo se encuentran Tirgua media (17,80 %), Tirgua baja (12,90 %) y Cabuy media (6,90 %).

Discusión final

La cuenca del río Tirgua posee características geomorfológicas propias del relieve cordillerano de la Costa, el cual en su flanco sur se caracteriza por ser menos abrupto, altitudinalmente moderado, con laderas disectadas y cumbres mayormente redondeadas (Arismendi 2007). Su evolución morfohidrológica dio lugar a la configuración de subcuencas de tamaño pequeño, con algunas variaciones intrínsecas en parámetros de relieve que permitieron la discriminación estadística y su consecuente diferenciación grupal.

Tres de los grupos aglutina subcuencas geomorfométricamente similares, en los que los descriptores tuvieron una importancia diferencial, siendo los más importantes: factor de forma (Kc) (grupo 2); perímetro (Per), área (Ar) y longitud total de cauces (Ltc) (grupo 3); y altitud promedio (Al-p) (grupo 4). La constitución del grupo 1 parece obedecer a factores distintos a la geomorfometría.

Las subcuencas del grupo 1 están contiguamente dispuestas en las zonas hidroclimáticas intermedia e inferior, y, aunque presentan condiciones geométricas

y morfológicas variadas entre sí, comparten similitudes climáticas, de coberturas vegetales y de formas tipológicas de uso. Ello confirma que el análisis geomorfométrico por sí solo no representa una alternativa útil para caracterizar o analizar el comportamiento hidrológico de cuencas, por lo que deben ser incluidos descriptores hidrogeológicos e hidroclimáticos para así lograr una interpretación hidrológica sistemática más acertada, como lo sugieren Winter (2000), Wolock, Winter y McMahon (2004), Santhi et ál. (2007), Gharari et ál. (2011), Sawicz et ál. (2014), Rains et ál. (2016) y Loritz et ál. (2018).

La condición hidrogeológica no posee poder discriminante ya que la litología es muy similar. En cambio, la condición climática sí muestra un comportamiento diferencial que resulta determinante en la respuesta hidrológica. Los descriptores climáticos resultaron altamente significativos y con un alto poder explicativo en las evaluaciones hechas por Wolock, Winter y McMahon (2004), Yadav, Wagener y Gupta (2007), Sawicz et ál. (2014) y Loritz et ál. (2018). Ello sugiere que en este caso su uso ha sido conveniente y acertado.

Además de su notable influencia en las funciones hidrológicas, el clima es también un factor de control de los ecosistemas, la vegetación, y en escalas de tiempo largas controla también las características físicas de las cuencas (Wagener, Sivapalan y Mc Glynn 2008). En la cuenca del Tirgua, la diferenciación climática interior ha determinado la configuración de la vegetación, así como las formas, tipos y disposición espacial de los usos antropógenos. Las subcuencas de usos múltiples se localizan en los extremos norte y sur, en donde las condiciones morfológicas han facilitado la implementación de actividades agrícolas, pecuarias, urbanas e industriales, mientras que el uso conservacionista adquiere importancia y dominancia espacial relativa en la zona intermedia de la cuenca.

La influencia de la vegetación y los usos de la tierra en el comportamiento hidrológico de cuencas ha sido ampliamente reportada, aunque no fácilmente documentada (Allan 2004; Konrad y Booth 2005; Blöschl et ál. 2007; Casali et ál. 2010; Price 2011; Mejía 2012; Martin, Kelleher y Wagener 2012). Las limitaciones en cuanto a la obtención de información espacial sobre ambos factores dificultan la determinación de su nivel de incidencia real en el comportamiento hidrológico (Sawicz et ál. 2014). Como se mencionó anteriormente, los usos de la tierra extensivos como la agricultura, e intensivos como la urbanización, modifican sustancialmente el paisaje y generan efectos importantes en el comportamiento hidrológico de los ríos, como: emisiones de sedimentos,

nutrientes y pesticidas, en el primer caso; y aumento de contaminantes, alteración de régimen hídrico, alteración térmica y reducción estructural y biótica del canal, en el segundo (Allan 2004; Price 2011). No obstante, estos efectos son altamente dependientes de la escala de la cuenca y los cambios suelen tener un mayor impacto en cuencas pequeñas (Blöschl et ál. 2007).

El tamaño de la cuenca del Tirgua hace que los efectos hidrológicos del uso de la tierra sean difíciles de detectar y evaluar, tal como lo demuestran los resultados de Paredes et ál. (2006). No obstante, la distribución espacial de las subcuencas de usos múltiples podría fácilmente comprometer la calidad de los flujos superficiales y el Acuífero de Nirgua-Salom, lo cual requiere ser rigurosamente investigado y monitoreado en el futuro.

Conclusiones

La cuenca del río Tirgua constituye una unidad hidrológicamente compleja, en la que la estructura espacial, la geometría, el relieve y el clima han moldeado un sistema de paisajes hidrológicos conspicuo dentro de la cordillera de la Costa. La diversidad de recursos hídricos e hidrogeológicos y los múltiples usos antropogénicos que allí se desarrollan le confieren una enorme importancia geoestratégica regional.

Los descriptores de forma y de relieve mostraron ser determinantes en la diferenciación de los paisajes hidrológicos dentro de la cuenca, facilitando la regionalización o agrupamiento de subcuencas en función de condiciones geométricas, altitudinales y de pendiente. Las características intrínsecas de las subcuencas dan paso a una diferenciación espacial de los parámetros hidroclimáticos, lo que permite distinguir tres zonas que muestran comportamientos hidrológicos e hidrogeológicos bien definidos.

El Análisis de Componentes Principales resultó de gran utilidad para discernir estadísticamente el nivel de explicación y la influencia de cada descriptor geomorfológico en la diferenciación intraespacial de la cuenca, lo que permite agrupar las cuencas en cuanto a su semejanza morfológica y genera, así, dinámicas de respuesta hidrológica distintivas entre las subcuencas.

En la cuenca del río Tirgua, la zona superior y las subcuencas de cabecera cumplen un rol determinante en la captación, transmisión, conducción y acumulación de flujo superficial y subterráneo, vitales para garantizar el influjo constante de agua superficial y subsuperficial, así como la alimentación y recarga de los acuíferos de la zona.

La cobertura del terreno, y particularmente la configuración territorial de los múltiples usos que coexisten en la cuenca juegan un papel importante en las demandas de agua, y en la calidad de los recursos hídricos. Igualmente, las cuencas de cabecera tienen un rol crucial en la utilización de los recursos hídricos de la zona superior, y en la alteración cuantitativa y cualitativa del agua superficial y subterránea.

El enfoque metodológico concebido para este trabajo permite caracterizar con adecuado nivel de precisión la naturaleza, estructura y comportamiento de una cuenca de usos múltiples con escasa información, lo que aporta una aproximación acertada de su funcionamiento hidrogeográfico.

Agradecimientos

Al Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico de la Universidad de los Andes – CDCHT, por haber financiado parcialmente esta investigación a través del proyecto: FO-561-04-01-C.

Referencias

- Allan, J. David, Donna Erickson, y John Fay. 2003. "The Influence of Catchment Land Use on Stream Integrity Across Multiple Spatial Scales." *Freshwater Biology* 37 (1): 149-161. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.d01-546.x>.
- Allan, J. David. 2004. "Landscapes and Riverscapes: The influence of Land Use on Stream Ecosystems." *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 35: 257-284. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122>.
- Aparicio Mijares, Francisco Javier. 1989. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Ciudad de México: Editorial Limusa S. A. de C. V., Grupo Noriega Editores.
- Arismendi, José. 2007. "Presentación geográfica de las formas del relieve." En *Medio físico y recursos ambientales*, Tomo 2 de la Colección *Geo Venezuela*, 133-182. Caracas: Fundación Empresas Polar.
- Bellorín, María. 2008. "Geografía de la industria de alimentos en Venezuela." En *Medio Humano, Establecimientos y Actividades*, Tomo 4 de la Colección *Geo Venezuela*, 224-287. Caracas: Fundación Empresas Polar.
- Blöschl, Günter, Sandra Ardoin-Bardin, Mike Bonell, Manfred Dorninger, David Goodrich, Dieter Gutknecht, David Matamoros, Bruno Merz, Paul Shand y Jan Szolgay. 2007. "At What Scales Do Climate Variability and Land Cover Change Impact on Flooding and Low Flows?" *Hydrological Processes*, no. 21: 1241-1247. <https://doi.org/10.1002/hyp.6669>.

- Buma, Brian, y Livneh Ben. 2017. "Key Landscape and Biotic Indicators of Watersheds Sensitivity to Forest Disturbance Identified Using Remote Sensing and Historical Hydrography Data." *Environmental Research Letters* 12 (7): 1-10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7091>.
- Casalí, J., R. Giménez, J. Diéz, J. Álvarez-Mozos, J. Del Valle de Lersundi, M. Goñi, M. Campo, Y. Chahor, R. Gastesi, y J. López. 2010. "Sediment Production and Water Quality of Watersheds with Contrasting Land Use in Navarre (Spain)." *Agricultural Water Management* 97 (10): 1683-1694. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.024>.
- Chang, Mingteh. 2003. *Forest Hydrology. An Introduction to Water and Forest*. Florida: CRC PRESS.
- Chow, Ven Te, David Maidment, y Larry Mays. 1996. *Hidrología Aplicada*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Chuvieco, Emilio. 2010. *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona: Editorial Ariel.
- Duque, Roberto. 1989. *Precipitación, formación, medición y análisis de datos*. Mérida: Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT).
- Geritana, Augusto, Marie Paule Bonnet, Stephane Calmant, Emmanuel Roux, Otto Rotunno, y Webe Mansur. 2009. "Hydrological Monitoring of Poorly Gauged Basins Based on Rainfall-runoff Modeling and Spatial Altimetry." *Journal of Hydrology* 379 (3-4): 205-219. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.049>.
- Gharari, Shervan, Markus Hrachowitz, F. Fenicia, y Hubert Savenije. 2011. "Hydrological Landscape Classification: Investigating the Performance of Hand Based Landscape Classifications in A Central European Meso-Scale Catchment." *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 3275- 3291. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3275-2011>.
- Gobernación del Estado Cojedes. 2011. "Caracterización físico-natural socioeconómica del estado Cojedes. Base diagnóstica para la Ordenación Territorial del estado Cojedes." Gobernación del Estado Cojedes, CORPOCENTRO, Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, Instituto Nacional de Tierras (INTI), Universidad de Los Andes (ULA), Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales (UNELLEZ), y Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez (UNESR).
- Gosálvez, Rafael, Elena González, Estela Escobar, y Rafael Becerra. 2009. "Análisis hidrogeográfico de las lagunas volcánicas de la península ibérica." *Actas del XXI Congreso de Geógrafos Españoles*. 1479-1497. Ciudad Real - España. Del 27 al 29 de octubre.
- Grisolía, Juan, y Marianella Rojas. 2005. "Evaluación de la Disponibilidad de Aguas Subterráneas en el área de Nirgua-Salom, estado Yaracuy." Tesis para optar al título de Ingeniero Geológico, Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.
- Guevara, José. 2003. *Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos*. Caracas: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico - UCV.
- Hijmans, Robert, Susan Cameron, Juan Parra, Peter Jones, y Andy Jarvis. 2005. "Very High-Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas." *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>.
- Hölscher, Dirk. 2008. "Hydrology of Natural and Anthropogenically Altered Tropical Montane Rainforests with Special Reference to Rainfall Interception." En *The tropical montane forest. Patterns and processes in a biodiversity hotspot*, editado por S. R. Grandstein, J. Homeier y D. Gansert, 129-138. Göttingen: Göttingen Centre for Biodiversity and Ecology, Universitätsverlag Göttingen.
- INE (Instituto Nacional de Estadística). 2011a. "Informe Geoambiental 2011: Estados: Carabobo, Cojedes y Yaracuy." Consultado el 3 de octubre de 2018. http://www.ine.gov.ve/documentos/Ambiental/PrincIndicadores-/pdf/Informe_Geoambiental_Cojedes.pdf.
- INE (Instituto Nacional de Estadística). 2011b. "XIV Censo Nacional de Población y Vivienda resultados básicos: total nacional y entidades federales." Consultado el 25 de septiembre de 2018. <http://www.ine.gov.ve/documentos/Demografia/CensodePoblacionyVivienda/pdf/nacional.pdf>.
- INTI (Instituto Nacional de Tierras). 2008. "Capas temáticas del territorio venezolano. Base de datos de capas temáticas en formato shapefile Datum REGVEN, zona 19." Consultado el 11 de octubre de 2018. Instituto Nacional de Tierra del estado Cojedes.
- Jegat, Hervé. 2016. "Variabilidad climática y su relación con la disponibilidad de aguas subterráneas en Venezuela." En *Foro Variabilidad y Cambio Climático*. Universidad de Los Andes, Departamento de Geografía Física de la Escuela de Geografía, Mérida-Venezuela, del 7 al 8 Julio.
- Kamp, Ulrich, Tobias Bolch, y Jeffrey Olsenholler. 2003. "DEM Generation from ASTER Satellite Data for Geomorphometric Analysis of Cerro Sillajhuay, Chile/Bolivia." Presentado en el *Annual Conference Proceedings asprs*, Anchorage, Alaska, en mayo de 2003.
- Lastrai, Bashkim, Florim Isufi, Shpejtim Bulliqi, Ibrahim Ramadani, y Gani Gashi. 2010. "Hydrogeographic Characteristics of Kriva Reka River." Presentado en el *Workshop balwois*, Ohrid, República de Macedonia, del 25 al 29 de mayo.
- Konrad, Christopher, y Derek Booth. 2005. "Hydrologic Changes in Urban Streams and Their Ecological Significance." *American Fisheries Society Symposium* 47: 157-177.

- Leibowitz, S., R. Comeleo, P. Wigington, C. Weaver, P. Morefield, E. Sproles, y J. Ebersole. 2014. "Hydrologic Landscape Classification Evaluates Streamflow Vulnerability to Climate Change in Oregon, USA." *Hydrology and Earth System Sciences* 18 (9): 3367-3392.
- Lin, Henry, Johan Bouma, Yakov Pachepsky, Andrew Western, James Thompson, Rien Van Genuchten, Hans-Jörg Vogel, y Allan Lilly. 2006. "Hydropedology: Synergistic Integration of Pedology and Hydrology." *Water Resources Research* 42 (5), W05301. <https://doi.org/10.1029/2005WR004085>.
- Loritz, Ralf, Gupta Hoshin, Jackisch Conrad, Westhoff Martijn, Kleidon Axel, Ehret Uwe, y Erwin Zehe. 2018. "On the dynamic Nature of Hydrological Similarity." *Hydrology and Earth System Sciences*, no. 22: 3663-3684. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3663-2018>.
- Man, Seiad y Favian Vega. 2017. "Dinámica de aprovechamiento de los recursos hídricos en la cuenca del río Tirgua mediante el enfoque de la Huella Hídrica (HH)." Tesis para optar al título de Geógrafo. Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.
- Martin, Erik, Christa Kelleher y Thorsten Wagener. 2012. "Has Urbanization Changed Ecological Streamflow Characteristics in Maine (USA)?" *Hydrological Sciences Journal* 57 (7): 1337-1354. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.707318>.
- Mejía, Joel. 2012. "Evaluating the effects of LULC Changes & Climate Variability in the Hydrological Response & Water Yield of a Tropical Andean River Basin. The case of the Boconó River Basin - Venezuela." Tesis de doctorado en Ciencias Naturales, Eberhard Karls Universität, Tübingen-Germany.
- Michelsen, Sonya. 2015. "Hydrogeography of Cloudburst Flooding in the Himalaya." BSc. Thesis. Oregon State University, Oregon.
- MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes de España). 1992. "Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología." Madrid, España.
- MPPAT (Ministerio del Poder Popular para Agricultura y Tierras). 2008. "VII Censo Agrícola Nacional." Base de datos productivos y socioeconómicos del sector agrícola venezolano. Consultado el 22 de marzo de 2018.
- MINEA (Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Agua). 2015. "Registro de actividades capaces de degradar el ambiente." Base de datos de establecimientos industriales y semi-industriales del estado Cojedes, San Carlos. Consultado el 20 de abril de 2018.
- Naranjo, María y Roberto Duque. 2004. "Estimación de la oferta de agua superficial y conflictos de uso en la cuenca alta del río Chama, Mérida, Venezuela." *Interciencia* 29 (3): 130-137.
- Paredes, Franklin, Luis Rumbo, Edilberto Guevara, y Nahir Carballo. 2006. "Caracterización histórica de las sequías extremas del río Tirgua en el Estado Cojedes." *Revista de Ciencia y Tecnología-Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora* 1 (3): 101-113.
- Paredes, Franklin. 2009. *Nociones Elementales de la climatología e hidrología del estado Cojedes*. San Carlos-Venezuela: Universidad Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora.
- Parra, Juan. 2017. "Análisis de la incertidumbre en la estimación de las zonas inundables con descriptores geomorfológicos derivados de MDE y modelos hidrodinámicos." Tesis de Maestría en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Patil, Sopan, y Marc Stieglitz. 2011. "Hydrologic Similarity Among Catchments Under Variable Flow Conditions." *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 989-997. <https://doi.org/10.5194/hess-15-989-2011>.
- Patil, Sopan, Parker Wigington, Scott Leibowitz, y Randy Comeleo. 2013. "Use of Hydrologic Landscape Classification to Diagnose Streamflow Predictability in Oregon." *Journal of American Water Resources* 50 (3): 762-776. <https://doi.org/10.1111/jawr.12143>.
- Price, Katie. 2011. "Effects of Watershed Topography, Soils, Land Use, And Climate on Baseflow Hydrology in Humid Regions: A Review." *Progress in Physical Geography* 35 (4): 465-492. <https://doi.org/10.1177/0309133311402714>.
- Rains, M., S. Leibowitz, M. Cohen, J. Jawitz, P. Kalla, C. Lane, M. Lang, y D. Mclaughlin. 2016. "Geographically Isolated Wetlands Are Part of The Hydrological Landscape." *Hydrological Processes* 30: 153-160. <https://doi.org/10.1002/hyp.10610>.
- Santhi, C., P. Allen, R. Muttiah, J. Arnold, y P. Tuppada. 2008. "Regional Estimation of Base Flow for The Conterminous United States by Hydrologic Landscape Regions." *Journal of Hydrology* 351: 139-153. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.018>.
- Sawicz, Keith, Thorsten Wagener, Murugesu Sivapalan, Peter A. Troch, y Gigi Carrillo. 2011. "Catchment Classification: Empirical Analysis of Hydrologic Similarity Based on Catchment Function in The Eastern USA." *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (9): 2895-2911. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2895-2011>.
- Sawicz, K., C. Kelleher, T. Wagener, P. Troch, M. Sivapalan, y G. Carrillo. 2014. "Characterizing Hydrologic Change Through Catchment Classification." *Hydrology and Earth System Sciences* 18: 273-285. <https://doi.org/10.5194/hess-18-273-2014>.

- Silva, Gustavo. 2010. "Tipos y subtipos climáticos de Venezuela." Trabajo de Ascenso a la categoría de Titular, Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela.
- Sivapalan, Murugesu. 2003. "Prediction in Ungauged Basins: A Grand Challenge for Theoretical Hydrology." *Hydrological Processes* 17 (15): 3163-3170. <https://doi.org/10.1002/hyp.5155>.
- TAHAL Consulting Engineers LTD. 1998. "Final Report on Multi State Water Supply Project, Feasibility Study of Rivers State Capital." *Port Harcourt and Environs and Selected Urban Communities*. 2-9.
- Taka, Maija Kaarina. 2017. "Key Drivers of Stream Water Quality Along an Urban-Rural Transition – A Watershed-Scale Perspective." Tesis doctoral (Ph.D.) en Geociencias y Geografía. Universidad de Helsinki, Finlandia.
- Tetzlaff, D, y C. Soulsby. 2008. "Sources of Baseflow In Larger Catchments: Using Tracers to Develop A Holistic Understanding of Runoff Generation." *Journal of Hydrology* 359 (3-4): 287-302. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.008>.
- Thorntwaite, C. 1948. "An Approach Toward A Rational Classification of Climate." *Geographical Review* 38 (1): 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>.
- Troch, Peter, Tim Lahmers, Antonio Meira, Rajarshi Mukherjee, Jonas Pedersen, Tirthankar Roy, y Rodrigo Valdes-Pineda. 2015. "Catchment Coevolution: A Useful Framework for Improving Predictions of Hydrological Change?" *Water Resources Research* 51: 4903-4922. <https://doi.org/10.1002/2015WR017032>.
- Viramontes, Oscar Alejandro, Luis Fernando Escoboza-García, Carmelo Pinedo Álvarez, Alfredo Pinedo Álvarez, Víctor Manuel Reyes-Gómez, Jesús Adolfo Román-Calleros, y Adolfo Pérez-Márquez. 2007. "Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua." *tecnociencia Chihuahua* 1 (3): 21-31.
- Wagener, T., M. Sivapalan, J. Mc Donnell, R. Hooper, V. Lakshmi, X. Liang, y P. Kumar. 2004. "Predictions in Ungauged Basins as a Catalyst for Multidisciplinary Hydrology." *eos* 85 (44): 451-457.
- Wagener, Thorsten, Murugesu Sivapalan, Peter Troch, y Ross Woods. 2007. "Catchment Classification and Hydrologic Similarity." *Geography Compass* 1 (4): 901-931. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x>.
- Wagener, Thorsten, Murugesu Sivapalan, y Brian Mc Glynn. 2008. "Catchment Classification and Services-Toward a New Paradigm for Catchment Hydrology Driven by Societal Needs." *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Editado por M. G. Anderson, 1-12. John Wiley & Sons, LTD.
- Walsh, Michael. 2012. "The Role of Hydrogeography and Climate in the Landscape Epidemiology of West Nile Virus in New York State from 2000 to 2010." *plos One* 7 (1): 1-6. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030620>.
- Winter, Thomas. 2000. "The Vulnerability of Wetlands to Climate Change: A Hydrologic Landscape Perspective." *Jawra Journal of the American Water Resources* 36 (2): 305-311. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2000.tb04269.x>.
- Winter, Thomas. 2001. "The Concept of Hydrological Landscapes." *Jawra Journal of the American Water Resources* 37 (2): 335-349. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb00973.x>.
- Wolock, David, Thomas Winter, y Gerard McMahon. 2004. "Delineation and Evaluation of Hydrologic-Landscape Regions in the United States Using Geographic Information System Tools and Multivariate Statistical Analyses." *Environmental Management* 34 (1): S71-S88. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-5077-9>.
- Yadav, Maitreya, Thorsten Wagener, y Hoshin Gupta. 2007. "Regionalization of Constrains on Expected Watershed Response Behavior for Improved Predictions in Ungauged Basins." *Advances in Water Resources* 30 (8): 1756-1774. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.01.005>.

Joel Francisco Mejía Barazarte

Geógrafo y magíster *Scientiae* en Manejo de Cuencas de la Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela; doctor en Ciencias Naturales de la Universidad Eberhard Karls – Alemania. Posdoctorado en la Universidad de Extremadura, España. Profesor e investigador del Instituto de Geografía de la Universidad de Los Andes, en el área de conservación de recursos naturales, hidrogeografía, análisis de cuencas hidrográficas de montaña, e inventario y análisis del medio físico.

Jesús Favian Vega Méndez

Geógrafo de la Universidad de los Andes, Mérida – Venezuela. Sus líneas de investigación son el manejo, gestión y aprovechamiento de los recursos naturales, humanos y espaciales apoyado en el uso de los SIG, así como el *geomarketing* y sus aplicaciones.

Seiad Man Eddin Abou Asaad

Geógrafo de la Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela. Diplomado de Educación Interactiva a Distancia. Actualmente se desempeña como docente e investigador en el área de análisis estadístico.

Elba Marina Mora de Pinto

Licenciada en Estadística y magíster *Scientiae* en Manejo de Bosques Tropicales de la Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela. Pasantía de año sabático, realizada con el Grupo de Investigación de Análisis de Datos. Escuela de Matemática. Facultad de Ciencias. Universidad de Costa Rica. Profesora Asociada de la Universidad de Los Andes (Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, y Escuela de Geografía). Desarrolla investigación en el campo forestal y ambiental aplicando la estadística como herramienta de análisis.