



Ríos en Riesgo de Venezuela 3

Douglas Rodríguez Olarte
Editor



Los ríos tienen una relación vital con los árboles, ellos son fundamento para las aguas y la vida. Felices los pueblos con aguas y árboles para disfrutar y conservar (fotografía de D. Rodríguez-Olarte).

Ríos en Riesgo de Venezuela 3

Edición a cargo de

Douglas Rodríguez Olarte

Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado
Barquisimeto. Venezuela

2020

Información



Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. UCLA

RIF G200000775 / www.ucla.edu.ve

Rectora (E)
Nelly VELÁSQUEZ

Vicerrectora Académica
Nelly VELÁSQUEZ

Vicerrector Administrativo
Edgar ALVARADO

Secretario General
Edgar RODRÍGUEZ

Decano de Agronomía
Nerio NARANJO

Museo de Ciencias Naturales UCLA
Colección Regional de Peces

Colección Recursos Hidrobiológicos de Venezuela

Serie

Ríos en Riesgo de Venezuela (Volumen 3)

Editor

Douglas RODRÍGUEZ OLARTE

Revisión de textos y estilo

Douglas RODRÍGUEZ OLARTE, Crispulo J. MARRERO y Donald C. TAPHORN

Diseño y Edición

Douglas RODRÍGUEZ OLARTE

Sugerencias de cita. Obra completa: Rodríguez-OlarTE, D. (Editor). 2020. *Ríos en riesgo de Venezuela. Volumen 3.* Colección Recursos hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela.

Capítulo: Salazar, S. K. y Arcia-Barreto, M. M. 2020. Ríos en la cuenca Caribe oriental y drenajes a los golfos de Cariaco y Paria. Capítulo 1 (pp: 13-38). En: Rodríguez-OlarTE, D. (Editor). *Ríos en riesgo de Venezuela. Volumen 3.* Colección Recursos hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela.

Primera edición digital: 13 de Marzo, 2020

© los autores, 2020

190 p. Incluye bibliografías, figuras y tablas

Depósito Legal. Biblioteca Nacional de Venezuela: LA2016000137

ISBN Obra completa: 978-980-12-9274-6

ISBN digital: Volumen 1 (2017): 978-980-12-9350-7. Volumen 2 (2018): 978-980-18-0103-0.

Volumen 3 (2020): 978-980-320-145-6.

1. Ecosistemas fluviales. 2. Geografía y clima. 3. Calidad de aguas. 4. Insectos acuáticos. 5. Ictiofauna. 6. Vegetación. 7. Perturbaciones. 8. Conservación. 9. Venezuela.

ISBN: 978-980-12-9274-6



9 789801 129274 6

Esta publicación y su contenido no representan necesariamente la expresión de opinión o juicio por parte de las instituciones de adscripción de los autores, incluyendo denominaciones, opiniones, inclusión de nombres, registros, datos o información complementaria proporcionada por los autores. Así, todos los aportes y opiniones expresadas son de la entera responsabilidad de los autores correspondientes.

Contenidos

- Autorías y equipo de evaluación / 4
Agradecimientos / 8
Introducción: Vida, ciencia y acción por los ríos / 9-10
Douglas RODRÍGUEZ-OLARTE

Sección I

Coberturas regionales y casos especiales

- 1 Ríos en la cuenca Caribe oriental y drenajes a los golfos de Cariaco y Paria / 13-38
Sinatra K. SALAZAR y Migdalia. M. ARCIA-BARRETO
- 2 El río Caura: desde la pristinidad a su destrucción / 39-56
Antonio MACHADO-ALLISON y Barry CHERNOFF
- 3 Riesgos ambientales por metales pesados en los sedimentos del río Orinoco / 57-76
Aristide MÁRQUEZ y Andreína LEMUS
- 4 La biodiversidad en los ambientes acuáticos de la cuenca del río Chama. Cordillera de Mérida, Venezuela / 77-100
Samuel SEGNINI, María Marleny CHACÓN, Guillermo BIANCHI, Ingrit CORREA & Roberto CASADO
- 5 Impacto humano en ríos de montaña: un caso en el Parque Nacional Waraira Repano, cordillera de la Costa / 101-109
Vanessa MALDONADO
- 6 Condición ecológica en ríos de los páramos andinos de Venezuela / 111-134
Ingrit CORREA, Samuel SEGNINI, María M. CHACÓN, Guillermo BIANCHI, Roberto CASADO & Raquel ROMERO

Sección II

Valor de patrimonio y eventos transversales

- 7 Cambio climático: ¿altera el régimen de precipitaciones y caudales en Venezuela? / 137-147
Franklin PAREDES-TREJO, Humberto BARBOSA-ALVES, María Alejandra MORENO-PIZANI, Asdrúbal FARÍAS-RAMÍREZ
- 8 La crisis de los servicios y los ecosistemas fluviales: preludeo de una emergencia ambiental en Venezuela / 149-172
Enrique O. MARTÍNEZ
- 9 Ríos de Venezuela en riesgo por políticas agrícolas / 173-189
Carelia Rayen HIDALGO LÓPEZ, Adelina COLMENÁREZ & Duilio TORRES

Autorías

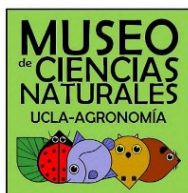
- Migdalia
ARCIA-BARRETO** MSc. Biología Pesquera. (Universidad de Oriente, Venezuela) Interés: Biología pesquera, diversidad biológica, educación y turismo ambiental. Gobernación del estado Sucre. Ministerio de Ecosocialismo y Aguas (MINEA-Sucre). Cumaná, Venezuela. migdalia893@gmail.com
- Humberto
BARBOSA-ALVES** Dr. em Ciência do Solo/Sensoriamento Remoto (University of Arizona, USA). Áreas de atuação: Sensoriamento Remoto y Meteorología. Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites. Instituto de Ciências Atmosféricas. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil. barbosa33@gmail.com
- Guillermo
BIANCHI PÉREZ** MSc. Estadística Aplicada (Universidad de Los Andes, Venezuela). Interés: Biometría, Biología de la Conservación, Biología de Poblaciones. Laboratorio de Ecología de Insectos. Departamento de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes (ULA). Mérida, Venezuela. gbianchi@ula.ve, gbianchip@gmail.com
- Roberto
CASADO** MSc. Ecología Tropical (Universidad de Los Andes, Venezuela). Interés: Ecología de invertebrados acuáticos, herpetología y ecología. Laboratorio de Ecología de Insectos. Departamento de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes (ULA). Mérida, Venezuela. rcasado@ula.ve
- María Marleny
CHACÓN** Dra. Ecología Tropical (Universidad de Los Andes, Venezuela). Interés: taxonomía, biología y ecología de los insectos acuáticos. Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional de Loja, Ecuador. maria.chacon@unl.edu.ec
- Barry
CHERNOFF** PhD. (University of Michigan, USA). Interés: filogenia y evolución de ictiofauna continental, variabilidad genética y contaminación; ecología y conservación de ambientes acuáticos. College of the Environment. Wesleyan University. bchernoff@wesleyan.edu
- Adelina
COLMENÁREZ GOYO** Dra. Ciencias Económicas y Administrativas (Universidad Santa María, Venezuela). Interés: gestión integrada de recursos hídricos, economía ecológica, gerencia ambiental. Departamento de Contabilidad. Decanato de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela. cadelina@ucla.edu.ve
- Ingrit
CORREA** MSc. Manejo de Cuencas Hidrográficas (Universidad de los Andes, Venezuela). Interés: Ecología, Bioevaluación de ríos, Entomología acuática. Responsable de la colección entomológica del Laboratorio de Ecología de Insectos. Departamento de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes (ULA). Mérida, Venezuela. coralbiy@ula.ve, coralbiy@gmail.com
- Asdrúbal
FARÍAS-RAMÍREZ** Dr. Ingeniería de Sistemas Agrícolas (Universidade de São Paulo, Brasil). Interés: Ingeniería de agua y suelo, evaluación hidráulica de sistemas de riego, modelado, drenaje, hidrología y gestión de riego. Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, Brasil. ajfara@gmail.com
- Carelia
HIDALGO LÓPEZ** Dra. Educación Ambiental (Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora, Venezuela). Interés: Educación ambiental, agroecología, políticas públicas, gestión ambiental. Programa de Pósgraduação em Educação Ambiental na Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Rio Grande do Sul, Brasil. careliahidalgo@gmail.com
- Andreína
LEMUS** Ing. Químico (Universidad Politécnica Territorial del Oeste de Sucre Clodosbaldo Russián, Venezuela). Interés. Contaminación marina, lacustre y fluvial. Departamento de Oceanografía, Instituto Oceanográfico de Venezuela, Universidad de Oriente (UDO). Cumaná, Sucre, Venezuela. andreinamarielys@gmail.com

-
- Antonio MACHADO-ALLISON** PhD. Zoología (The George Washington University, EEUU). Interés: filogenia y evolución de la ictiofauna continental, conservación de ambientes acuáticos. College of the Environment. Wesleyan University. amachado@wesleyan.edu
- Vanessa MALDONADO** Dra. Ciencias, mención Ecología (Universidad Central de Venezuela). Interés: taxonomía y ecología macroinvertebrados, ecología de sistemas lóticos. Programa de Formación de Grado en Gestión Ambiental. Núcleo Académico Gestión Ambiental Participativa. Universidad Bolivariana de Venezuela. vanesa.maldonado@gmail.com
- Aristide MÁRQUEZ** Dr. Ciencias Marinas (Universidad de Oriente, Venezuela). Interés: Oceanografía Química, contaminación marina, lacustre y fluvial. Departamento de Oceanografía, Instituto Oceanográfico de Venezuela, Universidad de Oriente (UDO). Cumaná, Sucre, Venezuela. aristd@gmail.com
- Enrique O. MARTÍNEZ** MSc. Ciencias (Universidad Central de Venezuela). Interés: manejo de recursos hidrobiológicos, impacto ambiental. Ingeoambiente, C. A. Caracas, Venezuela. Email: eomartinez@gmail.com
- María Alejandra MORENO-PIZANI** Dra. Ingeniería, mención Ingeniería de Sistemas Agrícolas (Universidad de São Paulo, Brasil). Interés: Gestión sostenible del agua, hidrología e ingeniería del agua, gestión de los recursos hídricos. Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, Brasil. morenom76@gmail.com
- Franklin PAREDES-TREJO** Dr. en Ingeniería, Mención Ambiente (Universidad de Carabobo, Venezuela). Interés: observación de la Tierra basada en productos derivados de sensores remotos. Grupo para Investigación sobre Cuencas Hidrográficas y Recursos Hidráulicos. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Los Llanos Occidentales 'Ezequiel Zamora' (UNELLEZ). San Carlos, Cojedes, Venezuela. franklinparedes75@gmail.com
- Douglas RODRÍGUEZ OLARTE** Dr. Biología de la Conservación (Universidad Complutense de Madrid, España). Interés: biogeografía, integridad y conservación de la ictiofauna y los recursos hidrobiológicos continentales. Colección Regional de Peces. Museo de Ciencias Naturales. Departamento de Ciencias Biológicas. Decanato de Agronomía. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara, Venezuela. douglasrodriguez@ucla.edu.ve / rodriguezolarte@gmail.com
- Raquel ROMERO** MSc. Ecología Tropical (Universidad de Los Andes, Venezuela). Interés: Ecología, Conservación ambiental. Laboratorio de Ecología de Insectos. Departamento de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes (ULA). Mérida, Venezuela. rkmioster@gmail.com
- Sinatra K. SALAZAR** Dra. Ciencias Marinas (Universidad de Oriente, Venezuela). Intereses: biología evolutiva, genética de poblaciones, biodiversidad, especies invasoras. Instituto Oceanográfico de Venezuela. Departamento de Biología Marina. Laboratorio de Genética. Universidad de Oriente (UDO). Cumaná, Sucre. Venezuela. ssalazar@udo.edu.ve
- Samuel SEGNINI** Dr. Ciencias, mención Entomología (Universidad Central de Venezuela). Interés: biología y ecología de los macroinvertebrados acuáticos y su uso como bio-indicadores de la calidad del agua. Laboratorio de Ecología de Insectos. Departamento de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes (ULA). Mérida, Venezuela. segninis@ula.ve
- Duilio TORRES RODRÍGUEZ** MSc. Ciencias Económicas del suelo (Universidad central de Venezuela). Interés: manejo y monitoreo de ecosistemas semiáridos y calidad de suelos. Departamento de Química y Suelos Decanato de Agronomía. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela. duiliotorres@ucla.edu.ve

Instituciones



Universidad Centroccidental
Lisandro Alvarado



Museo de Ciencias Naturales
UCLA



Universidad de Oriente



Universidad Bolivariana
de Venezuela



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MERIDA-VENEZUELA
Universidad de los Andes



Universidad Nacional Experimental
de los Llanos Ezequiel Zamora



Universidad Central de Venezuela



Instituto Oceanográfico
de Venezuela



"Aprender Haciendo"
Universidad Yacambú



Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo
Venezuela



WESLEYAN
UNIVERSITY
Wesleyan University



Universidad Nacional de Loja



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE ALAGOAS
Universidade Federal
de Alagoas. Brasil



Luiz de Queiroz College of Agriculture,
University of São Paulo



FURG
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE
Universidade Federal de Rio Grande
(FURG)



Ingeoambiente. Venezuela



Red iberoamericana para la
aplicación de protocolos de evaluación
del estado ecológico, manejo y
restauración de ríos

Equipo de evaluación y asesoría

En la serie Ríos en Riesgo de Venezuela las diferencias entre las ciencias y disciplinas abarcadas en cada capítulo, han sugerido y convenido el empleo de un lenguaje técnico, que es propio de una especialidad académica pero que se expresa en un vocabulario concreto y cercano a la experiencia del lector promedio de una obra de consulta; esto a diferencia del lenguaje científico, que es más específico y abstracto. Los capítulos han sido evaluados bajo la orientación previa y mediante un arbitraje por comunes, el cual ha sido sobrellevado por un equipo de evaluación que ha colaborado en gran medida para mejorar y refinar los contenidos. Además, se recibió el apoyo para las revisiones de estilo. El editor y los autores de este volumen agradecen sobremanera la disposición para la colaboración y el extenso trabajo desarrollado por parte del equipo de evaluación y asesoría.

Abrahan Mora. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. México

Alfred Zinck. University of Twente Enschede. Países Bajos

Aristide Márquez. Universidad de Oriente. Venezuela

Belkys Pérez. Universidad de Carabobo. Venezuela

Blanca Ríos Touma. Universidad de Las Américas, Ecuador

Carlos Méndez. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Venezuela

Críspulo J. Marrero. Universidad Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora. Venezuela

Donald C. Taphorn. Universidad Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora. Venezuela

Enrique O. Martínez. Ingeoambiente. Venezuela

Franco Teixeira de Mello. Universidad de la República. Uruguay

Franklin Paredes Trejo. Universidad Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora. Venezuela

Manuel A. S. Graça. University of Coimbra. Portugal

Giuseppe Colonnello. Fundación La Salle de Ciencias Naturales. Venezuela

Jairo Mojica. Universidad Nacional de Colombia. Colombia

José Iván Mojica. Universidad Nacional de Colombia. Colombia

José Antonio Monente. Fundación La Salle de Ciencias Naturales. Venezuela

José Vicente Montoya. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Venezuela

José Elí Rincón. Universidad del Zulia. Venezuela

Pedro Jiménez Prado. Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Esmeraldas. Ecuador

Roberto Hidalgo. Ministerio del Poder Popular para Educación Universitaria, Ciencia y Tecnología. Venezuela

Samuel Segnini. Universidad de los Andes. Venezuela

Sergio Foghin-Pillin. Universidad Politécnica Experimental Libertador. Venezuela

Teresa Elena Vegas. Universidad de Barcelona. España

Agradecimientos

La serie editorial RÍOS EN RIESGO DE VENEZUELA está dedicada a quienes estudian y divulgan sobre el reconocimiento, la valoración, la conservación y el resguardo de los recursos naturales patrimoniales. Siempre agradecemos a los autores que generaron un cuerpo de datos e información actualizado que ahora se presenta en el tercer volumen de los Ríos en Riesgo de Venezuela.

La COLECCIÓN RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS DE VENEZUELA y su serie editorial RÍOS EN RIESGO DE VENEZUELA son iniciativas y proyectos de divulgación de la Colección Regional de Peces del Museo de Ciencias Naturales de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA) con base en la línea de investigación sobre la biogeografía, integridad y conservación de la ictiofauna continental. Las bases históricas de estas iniciativas provienen en gran medida de los proyectos subvencionados por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT-UCLA) y el Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT). Agradecemos la representación institucional por parte del Departamento de Ciencias Biológicas del Decanato de Agronomía en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado.

En este tercer volumen seguimos transformando y reorientando los alcances iniciales de este proyecto editorial, ahora convertidos en un compromiso vital, una misión dilatada y extensa, convertida en apuesta para conjurar los escenarios azarosos. La verdad y la academia han signado esa apuesta desde el principio, así como el bastión de los amigos y la familia. Por eso estamos agradecidos y seguimos entreverados con el presente. Por eso, junto a Sebastián Tomás, seguimos conociendo de montañas, ríos y peces, continuamos dibujando el paisaje de todos y el destino con la naturaleza. Juntos trazamos caminos por la humanidad y la justicia en este país hermoso y único, en esta tierra que es nuestra para siempre.

Vida, ciencia y acción por los ríos

*Adentro suena el capacho,
afuera bate la lluvia;
vena en corazón de cedro
el bordón mana ternura;
no lejos asoma el río
pecho de sabana sucia;
más allá coros errantes,
ventarrón de negra furia,*

Florentino y el Diablo. La Porfia.
Alberto Arvelo Torrealba

1. Reuniendo y consensuando

En agosto de 2019 se realizó el primer simposio “Monitoreo y Conservación de Ríos en Venezuela: situación y previsiones” con auspicio de las universidades UCLA y UNELLEZ, además del apoyo de la Red Iberoamericana para la Formulación y Aplicación de Protocolos de Evaluación del Estado Ecológico, Manejo y Restauración de Ríos (IBEPECOR). Ahí se actualizó la información sobre las bases y los alcances del monitoreo y conservación de los ríos en el país; además, se identificaron las necesidades y prioridades de acción para el manejo y la conservación de los recursos hidrobiológicos fluviales. El consenso de participantes demuestra que las principales perturbaciones sobre los ecosistemas fluviales en Venezuela se expresan por: 1) la deforestación y las prácticas agrícolas, 2) la transformación y pérdida de los hábitats acuáticos y las riberas fluviales, 3) la extracción de agua fluvial a discreción, 4) los efluentes urbanos, industriales y agrícolas sin tratamiento, 5) la explotación pesquera, 6) la introducción y disseminación de especies, 7) el cambio climático y 8) el acceso, uso, adecuación y manejo de los datos e información ambiental.

Para complementar, se identificaron necesidades para el manejo y conservación de los ríos, las cuales vienen a ser un rasgo común para los países y ríos de Suramérica, pues existe una crisis ambiental con alcance continental y global. Así, esa hoja de ruta para la conservación de los ríos se resume en la necesidad para 1) la integración y actualización de la información: que es reunir, actualizar y estandarizar las bases de datos y registros sobre el estado de conservación

de los principales ríos de Venezuela, 2) la creación, innovación y actualización en los métodos y protocolos para la evaluación, 3) el monitoreo y restauración de los ríos y 4) la gobernanza, legislación, organización y la ciencia ciudadana. La información generada por la consulta a los especialistas se ha compilado y tiene acceso libre y continuado (Rodríguez-Olarte et al. 2019; <http://erevistas.saber.ula.ve/ecotropicos/>).

2. Preocupando y organizando

En medio de la crisis climática global, los poderes justifican al extractivismo como ruta para garantizar el desarrollo de los países; sin embargo, la realidad se expresa por la apropiación, conversión y saqueo de los territorios y patrimonios (minerales, aguas, bosques, ríos, peces) a toda costa y al menor costo, lo que predice los peores escenarios para la naturaleza y los pueblos. La devastación del planeta es transversal a sus ecosistemas, ocurre en todas las escalas y cada día es más sofisticada y rápida, tanto en las maquinarias como en los argumentos; es independiente y ajena de las formas políticas de los gobiernos (democracias, dictaduras, sus gradientes y mezclas), de los sistemas económicos de los grupos de poder (capitalismos, socialismos, sus gradientes y mezclas) y del ejercicio o supresión de las libertades fundamentales. Ahora es habitual el crear, activar y reformular proyectos de expropiación del patrimonio natural, desde regiones completas y transfronterizas hasta áreas protegidas y pequeñas cuencas. En todos los casos (ej. minería, represas, hidrovías, monocultivos, esclavitud turística) los ríos tienen la última peor parte.

En contrapartida, a lo largo de Latinoamérica son crecientes los movimientos sociales para la conservación de los recursos hidrobiológicos, con protestas muy notorias en contra de la destrucción, desecación y privatización de cauces y fuentes de agua. También prosperan las repulsas contra la explotación minera inconsulta, la recolonización gubernamental y corporativa de los territorios o la expansión de la frontera agrícola para extraer maderas y sembrar monocultivos que cubren demandas allende las propias. Se suman las organizaciones populares y la ciencia ciudadana con continuos programas de formación y divulgación para conservar los ríos y sus biotas.

En varios y notorios casos se ha logrado sensibilizar a ciertos poderes públicos y privados para detener acciones que atentan contra la conservación de los ecosistemas fluviales y los modos de vida de los pueblos ribereños. La vindicación ambiental ha sido un camino tortuoso y ha representado una tragedia para los pueblos aterrados y desplazados por la combinación de paramilitarismos, sindicatos agromineros, extractivismos gubernamentales o latifundios corporativos, pero más para los líderes y divulgadores ambientales, cuya libertad y vida es amenazada de forma sistemática en varias regiones. Latinoamérica es una dilatada mixtura de pueblos sobre una tierra con extraordinarios portentos naturales, pero, a su vez, plagada de peligros para quienes escogen el delicado, necesario y noble camino de la conservación del patrimonio.

3. Investigando y sobreviviendo

Toda una corriente académica ha emergido para la conservación de los ríos en Suramérica. Son muchos los que investigan sobre los diferentes atributos de los ecosistemas fluviales: desde los hifomicetos en las quebradas hasta los delfines en los enormes ríos, desde la minería en las vertientes andinas hasta las dinámicas migratoria y pesqueras en los estuarios. Son varias y diferentes las disciplinas que convergen para la conservación de los ríos y hay instituciones y grupos que auspician proyectos con sobrada pertinencia para conservar los servicios ecosistémicos. Hoy, con la investigación se recaban más datos y visibilizan más ríos y cuencas hidrográficas que hace unos cuantos años. Se continúa generando información necesaria para que las agencias gubernamentales y el ciudadano común definan manejos y usos apropiados de los recursos hidrobiológicos.

Por paradoja, hay una alarmante precariedad en los indicadores académicos para varios países, donde son evidentes las limitaciones para la continuidad y desarrollo de la investigación en y sobre los recursos naturales, así como para la divulgación de los resultados. En varios casos, los docentes, investigadores y estudiantes están sometidos a una situación de emergencia que limita todo su desarrollo intelectual y formación profesional. Hay ejemplos de la magnitud extrema de la crisis del sector universitario, con una notable carencia de los insumos más elementales, la pérdida y vandalización de bibliotecas y laboratorios fundamentales para la docencia e investigación y la persistencia de salarios menesterosos que de usual están por debajo del umbral de pobreza. La contracción en la investigación, docencia y extensión universitarias es casi terminal, lo que explica la enorme

caída de la productividad y la matrícula estudiantil. En algunos países las facultades y decanatos relativos a las ciencias naturales -como son biología, ingeniería ambiental, forestal, agronomía y veterinaria, entre otros- hoy muestran quizá su peor imagen histórica: la pérdida del cuerpo académico de una nación y de sus relevos generacionales.

No obstante, más allá de ese presente terrible, una creciente fracción de docentes, estudiantes y allegados se comprometen con la academia y persisten con ella; son quienes por vocación y convicción fortalecen a las instituciones, innovan con la investigación pertinente y trabajan para la conservación del patrimonio natural de cada país. También son los mismos que participan y apoyan las diferentes iniciativas para la divulgación y formación, como este proyecto editorial.

4. Publicando y divulgando

El tercer volumen de “Ríos en Riesgo de Venezuela” presenta nueve capítulos donde concurren 22 autores de diferentes instituciones académicas, dependencias gubernamentales y grupos organizados de Venezuela y el continente. En la Sección I (Coberturas regionales y casos especiales), el Capítulo 1 describe y caracteriza los ríos en la cuenca Caribe oriental y drenajes a los golfos de Cariaco y Paria, valorando también su estado de conservación. El gran río Caura y su paso de ser un ejemplo de conservación en el mundo a un potencial escenario de destrucción es reseñado en el Capítulo 2. En el Capítulo 3 se estudia el riesgo ambiental por metales pesados en el tramo medio del río Orinoco. El Capítulo 4 presenta la información y listados actualizados sobre la biodiversidad asociada al río Chama, en las vertientes andinas, mientras que los capítulos 5 y 6 tratan sobre la evaluación y conservación de los ríos de montaña en los páramos andinos y en un parque nacional de las cordilleras de Mérida y de la Costa. En la Sección II (Valor de patrimonio y eventos transversales), son tres los aportes que dan noticia sobre problemáticas frecuentes en la mayoría de los ríos del país. En el capítulo 7 se analizan registros y tendencias para reconocer el efecto del cambio climático sobre las precipitaciones y caudales en Venezuela, mientras que el Capítulo 8 ofrece una mirada sintética sobre el panorama del aprovechamiento actual de los ríos de país para la generación de agua potable y electricidad. Por último, el Capítulo 9 hace un recuento histórico y explica los alcances de las políticas agrícolas en este siglo y su relación con la conservación de los ríos.

Continúan en riesgo los ríos de Venezuela.

Douglas Rodríguez Olarte

Cambio climático: ¿altera el régimen de precipitaciones y caudales en Venezuela?

Franklin PAREDES-TREJO¹, Humberto BARBOSA-ALVES²,
María Alejandra MORENO-PIZANI³ y Asdrúbal FARÍAS-RAMÍREZ³

1. Grupo para Investigación sobre Cuencas Hidrográficas y Recursos Hidráulicos. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Los Llanos Occidentales 'Ezequiel Zamora'. San Carlos, Cojedes, Venezuela. franklinparedes75@gmail.com
2. Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites. Instituto de Ciências Atmosféricas. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil. barbosa33@gmail.com
3. Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, Brasil. morenom76@gmail.com / ajfara@gmail.com

La precipitación es la principal fuente hídrica de los ríos en Venezuela. Diferentes estudios basados en modelos numéricos globales advierten que el cambio climático modificará el régimen de las precipitaciones sobre gran parte del territorio venezolano, afectando negativamente sus ecosistemas fluviales. En décadas recientes, la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones no ha sido evaluada adecuadamente, debido a la escasa cobertura espacial de la red pluviométrica nacional y la baja calidad de sus series temporales. Para contribuir a mejorar la comprensión sobre este tópico, en el presente capítulo se discute los resultados más relevantes derivados del análisis de los puntos de cambios abruptos en el aporte pluviométrico sobre las grandes regiones hidrográficas a lo largo del periodo 1940-2016. La información pluviométrica proviene del producto Global Precipitation Climatology Centre (GPCC, v8). Los resultados revelaron que el trimestre junio-julio-agosto (inicio de la estación lluviosa en gran parte del país), experimentó un decrecimiento en la precipitación sobre casi el 70% del territorio nacional, mientras lo opuesto se observó sobre 73% del área continental entre septiembre y noviembre (fin de la estación lluviosa en gran parte del país). Por otro lado, entre 1965 y 2007, el caudal medio del río Caroní incrementó en el trimestre diciembre-enero-febrero (43%), pero decreció en marzo-abril-mayo (-22%), sugiriendo que los cambios en las pautas pluviométricas pueden llegar a modificar el régimen hídrico de los ríos y, por tanto, afectar los servicios ambientales que estos ecosistemas proveen a las comunidades ribereñas.

Palabras Clave: Cambio climático, precipitación, cuencas hidrográficas, ríos

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático global es un fenómeno que preocupa a la comunidad científica internacional, debido al impacto que ha causado sobre la disponibilidad hídrica en diferentes regiones geográficas del mundo (Gosling y Arnell 2016). En lo que va del siglo XXI, la evidencia observacional da cuenta de una causalidad entre la distribución espacial y temporal de las lluvias y la escasez de recursos hídricos (Wang et al. 2016). Un cambio sutil en el régimen de las precipitaciones, sobre una región en particular, puede desencadenar un desequilibrio en el balance hídrico, reduciendo por un lado, la oferta hídrica para satisfacer los requerimientos de usos variados (Middelkoop et al. 2001, Leng et al. 2015, Ahn et al. 2016, Kangalawe 2017, Rivera et al. 2017), y por el otro, disminuyendo el potencial de los ríos como fuente de servicios ecosistémicos para las poblaciones humanas asentadas en sus cuencas (Mooney et al. 2009, Rodríguez-Olarte et al. 2018, 2019).

El efecto del cambio climático sobre la precipitación es uno de los tópicos abordado en el informe especial publicado en octubre del 2018 por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) sobre el calentamiento global de 1.5 °C (IPCC 2018). Allí se muestra la proyección para la precipitación a escala subcontinental, obtenida de avanzados modelos de circulación general atmósfera-océano (MCGAO, por sus siglas en inglés).

A propósito del territorio venezolano, se indica que un calentamiento global de 1.5 °C con relación al periodo pre-industrial (1861-1880), podría causar un cambio porcentual relativo entre -5% y -10% en la precipitación media sobre los Andes, los sistemas Coriano y Deltaico, las cordilleras Central y Oriental, y la cuenca del Lago de Maracaibo. Esta proyección es coherente con el contenido de la Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (SCNCC) publicada por el Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas en el 2017 (MINEA 2017), y el Primer Reporte Académico de Cambio Climático publicado por la Secretaría Académica de Cambio Climático de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales de Venezuela en el 2018 (ACFIMAN-SACC 2018), quienes tomando como referencia las salidas de diferentes MCGAO, señalan que una disminución generalizada de la precipitación podría manifestarse durante el siglo XXI. Guenni et al. (2008) ya habían advertido una tendencia negativa a largo plazo en los registros históricos disponibles, la cual podría atribuirse en gran medida a la influencia oceánica del Atlántico Norte y el Pacífico

Tropical sobre el régimen de las precipitaciones en Venezuela (Tim y De Guenni 2016).

A juzgar por las publicaciones mencionadas, se esperaría que el régimen hidrológico de los ríos tienda a mostrar caudales inferiores a los actuales como consecuencia de la merma en los aportes pluviométricos. En efecto, la SCNCC menciona que el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) empleó 32 MCGAO para proyectar la escorrentía en las cuencas de los ríos Caroní, Yaracuy, Aroa y Tocuyo. Los resultados indican una reducción en el caudal medio anual (MINEA 2017), lo que muy probablemente conlleve a una depauperación de los ecosistemas fluviales (Rodríguez-Olarte et al. 2018).

A pesar del uso masivo de MCGAO por parte de la comunidad científica nacional e internacional para proyectar diversas variables climáticas, debe tenerse en cuenta que la proyección de la precipitación tiene un alto grado de incertidumbre (Stainforth et al. 2005, Jackson et al. 2008, Liu et al. 2013, Dosio y Panitz 2016, Chen et al. 2017). Tan es así que en el reporte sobre el calentamiento global de 1.5 °C del IPCC (IPCC 2018) se informa sobre la marcada diferencia entre las salidas de los MCGAO para la precipitación. Por lo anterior, las inferencias basadas en estas complejas herramientas computacionales, deben ser usadas con cautela. Una alternativa complementaria a los MCGAO, son los productos de lluvias obtenidos de satélites, reanálisis (i.e. modelos numéricos retrospectivos con asimilación de datos), observaciones o la fusión de todos los anteriores. Si bien, estos productos no proyectan la precipitación a futuro, proveen información valiosa sobre la evolución reciente de la precipitación con una mayor resolución espacial y temporal que la proporcionada por los MCGAO (Ebert et al. 2007).

Ahora existe una amplia variedad de productos retrospectivos de precipitación con cobertura global. Entre ellos, el Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) del servicio meteorológico alemán (Deutscher Wetterdienst) destaca sobre otros que son similares porque en su desarrollo se emplean observaciones mensuales de alta calidad y un avanzado método de interpolación (Schneider et al. 2018). Las estimaciones de precipitación provenientes del GPCC, han permitido identificar sutiles cambios estacionales e interanuales en el régimen hidrológico (atribuibles a variaciones en la distribución espacial y temporal de las precipitaciones) en diferentes cuencas hidrográficas del mundo (Milly et al. 2005).

Para dar una respuesta complementaria en torno a la ocurrencia de cambios recientes en el régimen de las precipitaciones que podrían afectar el régimen hídrico de aquellos ríos situados dentro de las grandes

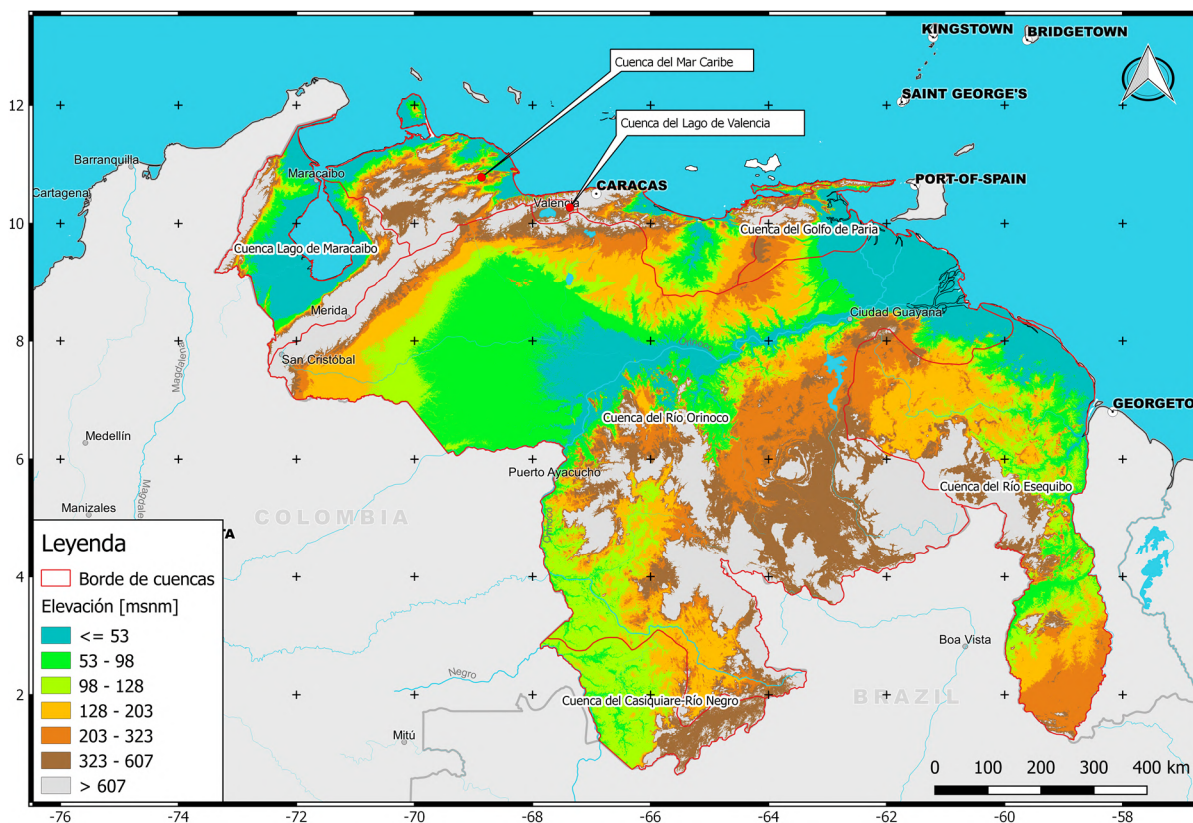


Figura 1. Ubicación e hipsometría de las unidades hidrográficas dentro del área de estudio (modelo digital de elevación a 250 m derivado de proyecto USGS/NASA SRTM. Detalles en Reuter et al. 2007)

regiones hidrográficas de Venezuela, en este capítulo se discuten los resultados más relevantes del análisis espacial y temporal de la precipitación derivada del producto GPCC sobre todo el territorio venezolano.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La racionalidad en el análisis de los resultados es mantenida dividiendo el territorio venezolano continental en seis grandes regiones geográficas que ocupan una superficie conjunta de 1.064.690 km², correspondientes a las cuencas drenadas por los ríos Orinoco (60,48%), Esequibo (17,48%), Casiquiare-Río Negro (4,87%) y aquellas que tributan hacia el mar Caribe (14,65%), golfo de Paria (2,24%) y lago de Valencia (0,29%). Como se nota en la Figura 1, esta configuración la determina el relieve. La cuenca del río Orinoco es la más extensa (643.875 km²) y separa físicamente las vertientes norteñas mar Caribe y golfo de Paria de las cuencas de los ríos Esequibo y Casiquiare-Río Negro. Su divisoria oeste, noroeste y central contiene los puntos más elevados de la cordillera de Los Andes (allí nacen, entre otros, los ríos Uribante, Caparo y Portuguesa) y la cordillera de la Costa (de la cual surgen los ríos Guárico y Tiznados), mientras que en el extremo sur y sureste,

la serranía de Pacaraima (aquí nacen los ríos Caroní y Caura) y la serranía de Parima cumplen la función de parte-aguas.

El clima predominante, basado en la clasificación de Köppen, es del tipo Aw y Aw' (lluvioso y cálido, con un máximo pluviométrico anual), claramente definidos en los llanos occidentales, centrales y orientales (Pérez et al. 2008, Silva-León 2010, Olivares et al. 2013), donde las sabanas sobre mesas, planicies aluviales de desborde altas, sabanas inundables y llanuras eólicas dominan el paisaje (Chacón-Moreno et al. 2013). Al extremo sureste del río Orinoco, el tipo Afí (selvático con un promedio mensual de precipitación > 60 mm), prevalece sobre la cuenca alta y media de los ríos Caroní y Caura. El tipo BSh (semiárido) se presenta en la vertiente mar Caribe, específicamente en las cuencas de los ríos Neverí, Aragua y Manzanares al noreste de Anzoátegui; en la parte alta de la cuenca del río Tocuyo, y en las cuencas del litoral noroccidental (ej. río Hueque). Según la clasificación de Huber, el piso térmico megatérmico, caracterizado por una temperatura media anual mayor a 24 °C y una elevación media menor a 500 msnm, es dominante en casi toda el área ocupada por la cuenca del río Orinoco (León 2002).

La precipitación media anual (PMA) presenta una alta variabilidad espacial y temporal, pero a gran escala muestra un gradiente decreciente en sentido sur-norte (Guenni et al. 2008). Al sur, la PMA supera los 3300 mm (clima muy cálido y pluvial, según Silva-León 2010), pero en la franja costera puede ser menor a 300 mm (clima muy cálido y seco, según Silva-León 2010). La estacionalidad de la precipitación es controlada por la Zona de Convergencia Intertropical, quien favorece la ocurrencia de lluvias entre mayo y octubre sobre gran parte del país (Olivares et al. 2017). Otras situaciones sinópticas, tales como las ondas del este, depresiones y tormentas tropicales, huracanes y restos de frentes fríos, también causan lluvias abundantes en cualquier momento del año. En contraste, la Alta Presión del Atlántico Norte inhibe temporalmente la formación de lluvia entre noviembre y abril, dando origen a una temporada seca espacialmente generalizada (Martelo 2003). Cabe destacar que el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) puede modificar el inicio y término de la estación de lluvia; como regla general, su fase cálida induce sequías, pero su contraparte fría se asocia con lluvias excedentarias (Pierre y Tirado 2007, Trejo et al. 2016). El contenido térmico del Atlántico Norte puede intensificar o debilitar la influencia del ENSO según el tipo de acoplamiento que se dé entre ambos (Rojas y Alfaro 2000), mientras que la Oscilación Madden-Julian, que es un modo de variabilidad intraestacional, influye la actividad convectiva durante la temporada de lluvias (Tomaziello et al. 2016, De Oliveira et al. 2017).

En cuanto al escurrimiento superficial, la cuenca del río Orinoco aporta en promedio 37.384 m³/s; la del lago de Maracaibo 1.424 m³/s; la vertiente mar Caribe 263 m³/s; la del río Cuyuní 483 m³/s; finalmente, la del lago de Valencia 12 m³/s (Rodríguez-Betancourt y González-Aguirre 2000). A pesar del bajo rendimiento hídrico de la vertiente mar Caribe, allí se encuentran las cuencas hidrográficas más densamente pobladas, como la de los ríos Tuy, Capaya y Guapo en el litoral norcentral (Ovalles et al. 2012).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Producto de precipitación GPCC: la versión Full Data Monthly V.2018 (V8) se usó en este estudio (de aquí en adelante, se refiere como GPCC). Esta provee estimaciones de la precipitación mensual a escala global derivada de observaciones in situ vía el sistema de telecomunicación global de la Organización Mundial de Meteorología (OMM). Este producto tiene una resolución espacial de 0.25° (unos 30 km sobre el ecuador geográfico) y cubre el periodo de 1891 a 2016 (libremente disponible para descarga en

<https://bit.ly/2JJ7tTw>). La cadena de procesamiento para su generación contempla una etapa donde los datos de precipitación puntuales son grillados hasta su resolución final (i.e., 0.25° x 0.25°) por medio de una interpolación que considera un enfoque de pesos ponderados (Schneider et al. 2018).

3.2. Detección de puntos de cambios: la cantidad de precipitación registrada sobre una región en particular puede manifestar un cambio abrupto en la media de su tendencia. En algunos casos, esto puede ser atribuible al cambio climático (Mearns et al. 1997), pero en otros, es consecuencia de la variabilidad natural del clima (Sun et al. 2012). El momento en que se da un cambio puede inferirse por medio de una prueba estadística adecuada, aplicada a una serie temporal de la precipitación mensual proveniente de la región bajo estudio (Wang et al. 2007).

Para identificar la ocurrencia de puntos de cambios en el aporte pluviométrico sobre las regiones hidrográficas analizadas, se aplicaron los siguientes pasos. Etapa uno: el producto de precipitación GPCC fue cortado usando un shapefile del área de estudio, obteniéndose 1512 rasters que abarcan desde enero de 1891 hasta diciembre de 2016. De este grupo de rasters, se tomaron aquellos que van desde 1940 a 2016 (924 rasters). La racionalidad de esta decisión obedece a que antes de este periodo, la información pluviométrica del GPCC para el área de estudio esta soportada en pocos registros in situ. Cada raster contiene 1388 celdas con una dimensión regular de 0.25° x 0.25° (unos 900 km²), de las cuales 5,0% están en la cuenca de los ríos Casiquiare-Negro; 2,3% en la cuenca golfo de Paria; 0,4% en la cuenca del lago de Valencia; 6,0% en la cuenca del lago de Maracaibo; 8,9% en la cuenca del mar Caribe; 17,4% en la cuenca del río Esequibo; y 60,2% en la cuenca del río Orinoco. Etapa dos: los rasters fueron agrupados en cuatro clases según la temporada astronómica de pertenencia. Se emplearon temporadas astronómicas en vez de periodos (i.e., seco y lluvioso), porque el mes de inicio y finalización de estos últimos varían a lo largo del territorio venezolano (Olivares et al. 2013). Por estar la unidad de estudio localizada en el hemisferio norte, el invierno: agrupa los meses diciembre, enero y febrero; la primavera: marzo, abril y mayo; el verano: junio, julio y agosto; y el otoño: septiembre, octubre y noviembre. Seguidamente, se determinó la precipitación acumulada en cada temporada astronómica a nivel de celda. A manera de ejemplo, la precipitación acumulada desde diciembre en un año i ($i = 1940$ a 2016) a febrero del año $i+1$ en una celda k ($k = 1$ a 1388) cualquiera, corresponde a la precipitación de invierno del año $i+1$. Etapa tres: para detectar un punto de cambio potencial en la:

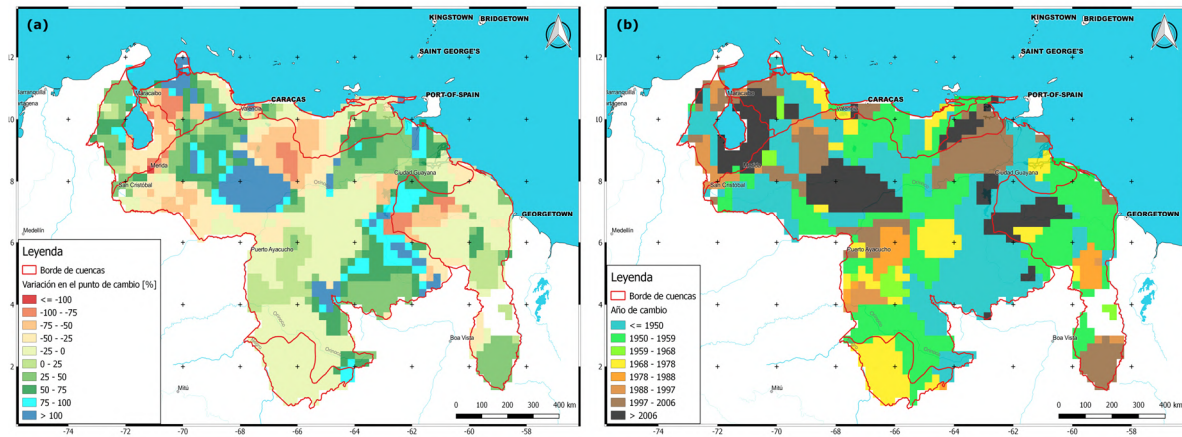


Figura 2. Para el invierno astronómico se muestra: (a) la variación porcentual en la media para aquellos pixeles donde se detectó un punto de cambio estadísticamente significativo ($p\text{-value} \leq 0.05$); y (b) el año donde se detectó el punto de cambio expuesto en el panel (a). Dentro de las regiones blanqueadas ningún punto de cambio fue identificado. Periodo considerado: 1940-2016.

media y su ubicación temporal se empleó el método de máxima verosimilitud descrito en Hinkley (1970) y Horváth (1993), el cual permite identificar un cambio estadísticamente significativo en la media de tramos sucesivos.

Aunque pueden manifestarse varios puntos de cambio, el enfoque usado en este estudio consideró aquel cambio en la media de mayor magnitud (así se procedió en el caso de que ocurriera más de un cambio en la tendencia). Una celda provee cuatro series temporales asociadas a cada temporada astronómica (i.e., invierno, verano, otoño y primavera). Por tanto, el método mencionado se aplicó a cada serie dentro de cada celda. Cabe destacar que pueden ocurrir cambios en la varianza a lo largo de una serie temporal (Chen y Gupta 1997), sin embargo, este aspecto está fuera del ámbito de este estudio, por lo que no se analizó.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cambios durante el invierno astronómico (diciembre-enero-febrero)

La Figura 2 muestra, por un lado, la distribución espacial de los puntos de cambios expresada como una variación porcentual en la media (Figura 2a), y por el otro, el año en que se dio dicho cambio (Figura 2b). Una variación negativa indica que la media de la precipitación acumulada disminuyó (tonos rojos), mientras que un valor positivo refleja lo contrario (tonos azules). Del grupo de pixeles donde se detectó al menos un cambio, 52,60% manifestaron una variación negativa (cerca de 556.092 km²). En el resto de los pixeles, se observó una variación positiva (alrededor de 501.102 km²). Al promediar la variación porcentual en cada unidad geográfica se encontró para

el golfo de Paria 28,17%; lago de Maracaibo 3,53%; lago de Valencia 24,29%; mar Caribe 7,27% y río Orinoco 25,78%. En el caso del Casiquiare - río Negro y río Esequibo, se registraron -6,26% y -2,39%, respectivamente. Estos resultados sugieren que el aporte pluviométrico durante este trimestre (el cual coincide con la temporada seca en gran parte del país), en general, aumentó.

La variación porcentual promedio de los puntos de cambios año a año (no mostrado), reveló que desde 1981 hasta 2010 los cambios positivos en la media fueron dominantes (mayor aporte pluviométrico), aunque una inversión abrupta en la tendencia temporal ocurrió en 2010. En efecto, se pasó de 141,28% en 2010 a -59,82% en 2012. A partir del 2012 hasta el 2015, las tendencias negativas (menor aporte pluviométrico) fueron notoriamente persistentes. La mayor parte de los cambios ocurrieron en 1942, 1956 y 1957. Estos años totalizan cerca del 18% de los pixeles mostrados en la Figura 2b. Una inspección más detallada reveló que las mermas de mayor magnitud en la precipitación se concentraron en la cuenca alta del río Tocuyo (Lara), la cuenca media del río Manapire (Guárico) y sobre el extremo oeste de la cuenca del río Cuyuní (Bolívar).

4.2. Cambios durante la primavera astronómica (marzo-abril-mayo)

Los cambios en la media estacional y el año en que sucedieron se presentan en la Figuras 3a y 3b. En principio, se evidenció un incremento en el aporte pluviométrico sobre gran parte del país. Cerca del 65% de los pixeles que mostraron cambios significativos (alrededor de 689.306 km²), reflejaron una señal positiva. A manera de ejemplo, sobre la

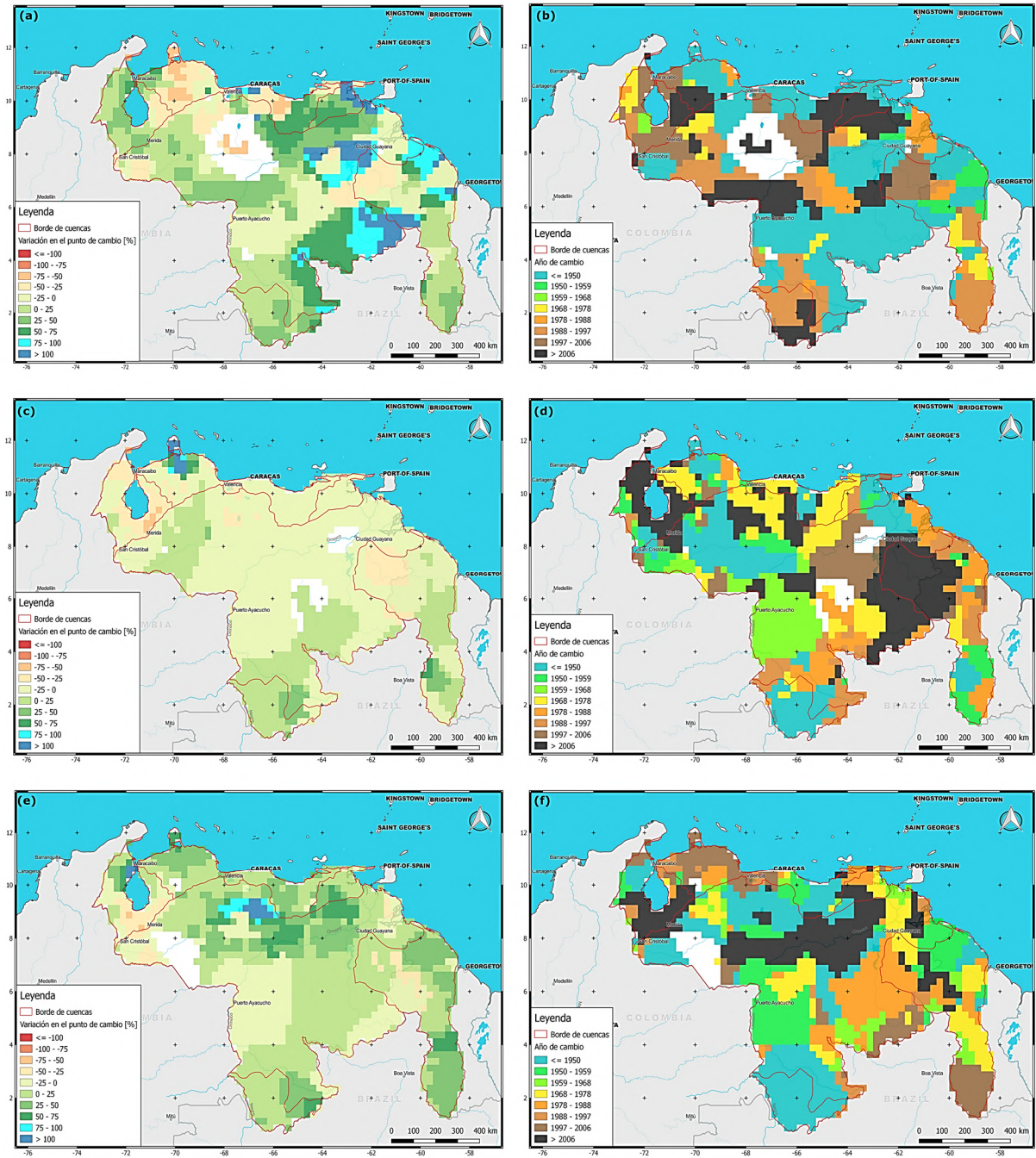


Figura 3. Como en Figura 2 pero para la primavera (3a, 3b), el verano (3c, 3d) y el otoño (3e, 3f) astronómicos.

parte alta de las cuencas de los ríos Caroní y Caura en el estado Bolívar se detectaron cambios positivos anteriores a 1950. En contraste, casi la totalidad de las cuencas hidrográficas falconianas, así como las cuencas de los ríos Tocuyo (Lara) y Unare (oriente del país) registraron una disminución inferior a -50%. En términos de variación porcentual promediada en cada unidad geográfica, se encontró para el Casiquiare-río Negro 22,63%; golfo de Paria 78,63%; lago de

Maracaibo 15,30%; lago de Valencia 55,09%; río Esequibo 23,48%; y río Orinoco 29,62%. Únicamente en la vertiente del mar Caribe se registró -7,73%. Similar a lo observado en el invierno astronómico (diciembre a febrero), la contribución pluviométrica para esta temporada incrementó; en especial, fuera de la vertiente mar Caribe. Los cambios con mayor extensión espacial se dieron en 1941, 1946 y 1997 (cerca del 22% de los pixeles en la Figura 3b).

4.3. Cambios durante el verano astronómico (junio-julio-agosto)

Para el trimestre junio-julio-agosto se evidenció un predominio de la señal negativa sobre la señal positiva. En efecto, alrededor del 70% de los píxeles en los cuales se detectó un cambio en la media, la precipitación acumulada decreció (747.394 km²). Sin embargo, el estadístico mediana de la variación observada para todos los puntos de cambio (Figura 3c) fue igual a -10,84%. Este indicador revela que en general, el cambio puede ser catalogado como leve, exceptuando las cuencas hidrográficas localizadas en la vertiente este del lago de Maracaibo, una pequeña área en la cuenca alta del río Tocuyo (Lara), la zona media del río Tiznados (Guárico) y casi la totalidad del río Cuyuní (Bolívar), donde la variación en la media tuvo valores inferiores a -50%. En las regiones geográficas mencionadas, el cambio negativo se produjo entre los años 2006 y 2016 (Figura 3d).

Como era de esperar, el promedio espacial de la variación porcentual observada en la Figura 3c a nivel de región hidrográfica, conduce a una interpretación consistente con lo indicado en el párrafo anterior. Así pues, se encontró para el golfo de Paria -15,67%; lago de Maracaibo -26,66%; lago de Valencia -20,45%; río Esequibo -6,96%; y río Orinoco -6,47%. Valores positivos solo se apreciaron en la vertiente del mar Caribe y Casiquiare - río Negro con 15,59% y 13,54%, respectivamente. Una característica distintiva de este trimestre, es que en 2010 ocurrieron los cambios con mayor extensión espacial, con cerca del 8% de los píxeles mostrados en la Figura 3d.

4.4. Cambios durante el otoño astronómico (septiembre-octubre-noviembre)

A lo largo del otoño astronómico la señal positiva dominó ampliamente su contraparte negativa (Figura 3e). En términos cuantitativos, alrededor del 73% de los píxeles con un cambio en la media de la precipitación estacional (unos 768.305 km²), exhibieron una señal positiva (i.e., una mayor contribución pluviométrica). Los píxeles con un cambio de signo negativo en la media temporal, solo cubren un área geográfica de importancia al sur de la cuenca del lago de Maracaibo abarcando las cuencas de los ríos Chama, Escalante y Catatumbo. El promediado de la variación en el punto de cambio por unidad geográfica arrojó para el Casiquiare-río Negro 24,84%; golfo de Paria 23,29%; lago de Valencia 14,56%; vertiente mar Caribe 25,32%; río Esequibo 18,39%; río Orinoco 13,62%; y lago de Maracaibo -1,83%. A propósito de los años con mayor frecuencia de cambio, los resultados mostraron 1983, 1956 y 1945; esto es, casi 12% de los píxeles en la Figura 3f.

4.5. Regiones ‘hotspots’

En la Figura 4 se muestran las áreas geográficas donde la media pluviométrica tuvo cambios de mayor magnitud, considerando todas las temporadas astronómicas (i.e., Figuras 2a, 3a, 3c y 3e). Las regiones que tendieron a presentar una disminución en el aporte pluviométrico fueron las cuencas hidrográficas de los ríos Motatán, Misoa, Machango, Torondoy, Chirurí y Tucaní en la región del lago de Maracaibo, así como en el alto Cuyuní del estado Bolívar (Figura 4, en color rojo). En contraste, los ríos Palmar y Apón en la cuenca del lago de Maracaibo, el río Mitare en el municipio Miranda de Falcón, el río Yaracuy en la vertiente sur de la sierra de Aroa, los ríos Guanipa y Guarapiche en la zona nororiental de Venezuela, y los ríos Caroní y Caura en Bolívar son algunas de las cuencas donde se manifestaron tendencias positivas (Figura 4, en color azul). En términos de magnitud, el cambio porcentual fue mayor en aquellas regiones donde la precipitación incrementó. Estas también cubrieron una mayor extensión geográfica que su contraparte de tendencia negativa (Figura 4).

Los resultados sugieren que la precipitación media anual aumentó (al menos entre 1940 y 2016), aunque no de forma uniforme sobre el territorio venezolano. La señal mejor definida, espacialmente y temporalmente, corresponde al: (i) trimestre JJA (inicio de la estación lluviosa en gran parte del país), donde un decrecimiento significativo en la precipitación fue evidente (en casi 70% del territorio); y al (ii) trimestre SON (fin de la estación lluviosa en gran parte del país), donde se observó lo opuesto (en casi 73% del territorio).

Estos hallazgos son coherentes con los de Infante (2018), quien tomando como referencia la relación entre la precipitación acumulada de mayo-octubre y noviembre-abril, encontró para Venezuela un valor de 2.86 entre 1900 y 2009, y 2.91 entre 1990 y 2009. Este autor notó un aumento general en la precipitación estacional sobre la región del Caribe (en particular, durante el invierno y la primavera), que atribuyó al calentamiento global. Similarmente, De Barros Soares et al. (2017), quienes emplearon diferentes productos globales derivados de observaciones in situ y la quinta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5 por sus siglas en inglés), advirtieron un incremento estadísticamente significativo en la precipitación mensual a escala decadal sobre las cuencas de los ríos Caroní y Caura.

4.6. Cambios recientes en la precipitación de la cuenca del río Caroní

Las Figuras 2a, 3a, 3c y 3e revelan que la cuenca del río Caroní recibió un aporte pluviométrico creciente

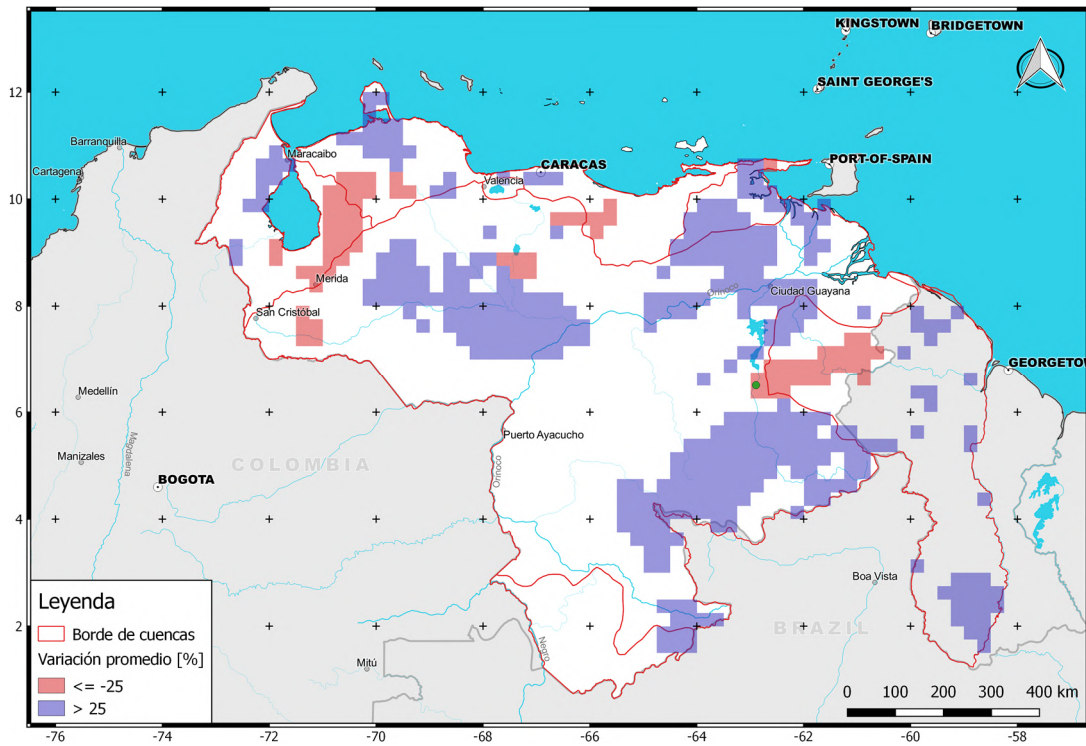


Figura 4. Promedio para la variación porcentual en la media de aquellos píxeles donde se detectó un punto de cambio estadísticamente significativo ($p\text{-value} \leq 0.05$) considerando todas las temporadas astronómicas (i.e., Figuras 2, 3a, 3c y 3e). Los promedios entre -25% y 25% fueron omitidos (regiones transparentes). El punto de color verde sobre el río Caroní señala la ubicación de la estación hidrométrica Arekuna.)

en el periodo 1940-2016. Así pues, se esperaría una señal relativamente similar en su caudal. A fin de explorar esta hipótesis con mayor detalle, se estimaron los caudales medios anuales del río Caroní en la estación Arekuna para cada estación astronómica (i.e., DEF, diciembre-enero-febrero; MAM, marzo-abril-mayo; JJA, junio-julio-agosto; SON, septiembre-octubre-noviembre) entre 1965 y 2007 (ver Figura 4). Los resultados se muestran en la Figura 5. En todos los trimestres se detectó un cambio en la media del caudal.

El cambio de mayor magnitud ocurrió en el trimestre DEF (43%, 2004/05), seguido por MAM (-22%, 1983/84), SON (-14%, 1974/75) y JJA (10%, 2000/01). Lo observado en DEF y JJA está en línea con el contenido de las Figuras 2a y 3a, pero el momento en que sucede difiere del mostrado por las Figuras 2b y 3b (ambos antes de 1950). Esta discrepancia puede atribuirse a la ventana temporal usada en cada caso. Nótese que la serie temporal del río Caroní inicia en 1965 (Figura 5), por lo que los cambios en la media, previos a 1950 (Figuras 2b y 3b), no pueden identificarse. Un racionamiento similar, explicaría la merma del caudal en MAM y SON, pese a que las Figuras 3b y 5d indican una aportación pluviométrica en ascenso durante el periodo 1940-2016. Otro

aspecto menos evidente en la Figura 5, es que los cambios en la media no se propagan al resto del año. Por ejemplo, el cambio en DEF del 2004/05 no coincidió con los identificados en otros trimestres, evidenciando un comportamiento marcadamente estacional. Más aun, el análisis de la serie mensual (sin dividirla en trimestres) no reveló un cambio de media (no mostrado), coincidiendo con Belloa et al. (2010).

4.7. Implicaciones de los cambios pluviométricos sobre el régimen hídrico estacional de los ríos

Los resultados discutidos en las secciones previas, evidencian que la distribución espacial y temporal de la precipitación sobre las grandes regiones hidrográficas venezolana ha cambiado en las décadas recientes. No de forma generalizada o en un año en particular, como a priori, pudiese percibir el público general. La evidencia observacional analizada en este estudio, revela múltiples cambios en el monto estacional de la precipitación sobre diferentes cuencas hidrográficas, mostrando una respuesta diferencial al interior de una misma cuenca. La magnitud de los cambios en aquellas regiones donde se detectó un aumento en la aportación pluviométrica, es mucho mayor a la observada sobre las regiones que experimentaron una merma en los montos pluviométricos

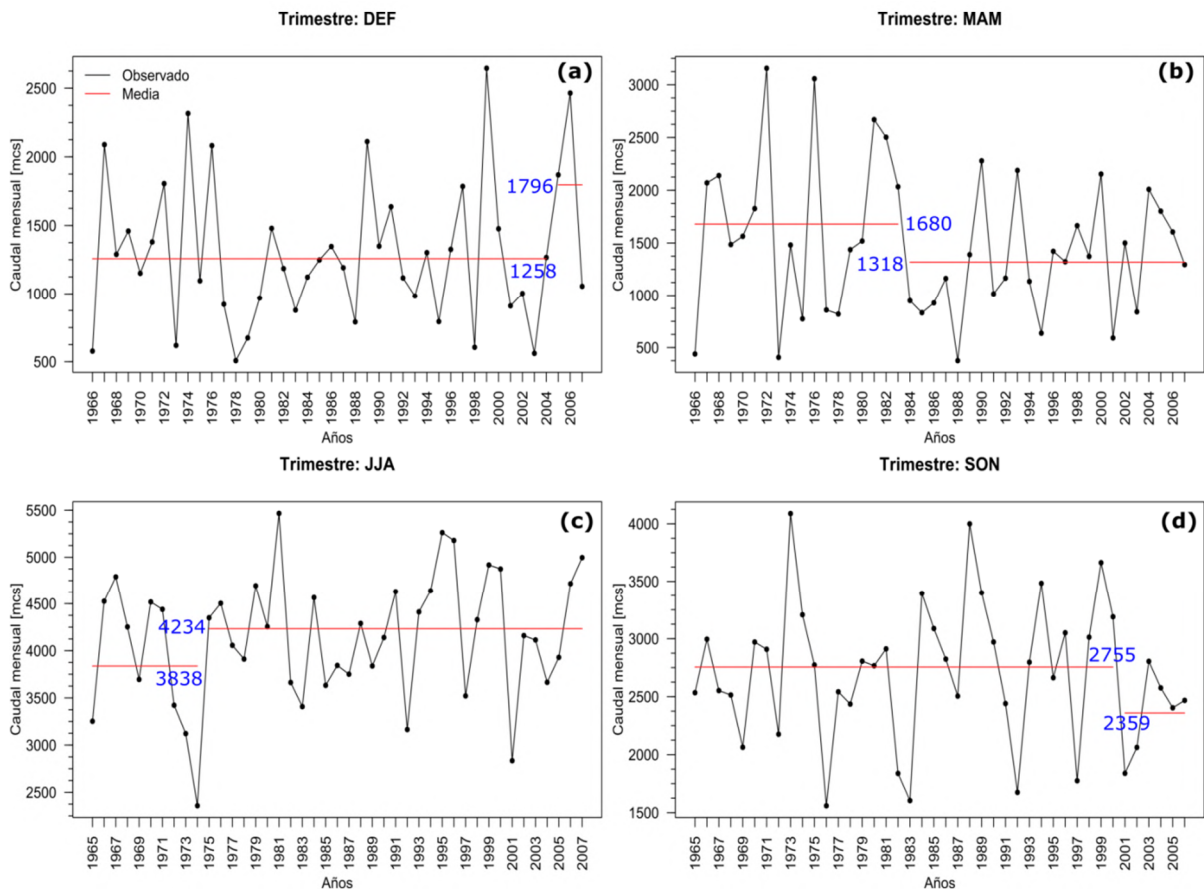


Figura 5. Caudal medio en el río Caroní a la altura de la estación hidrométrica Arekuna para los trimestres (a) diciembre-enero-febrero; (b) marzo-abril-mayo; (c) junio-julio-agosto; y (d) septiembre-octubre-noviembre durante el periodo 1965-2007. La línea roja en cada panel representa el caudal promedio antes y después del punto de cambio. La estación Arekuna se ubica en las coordenadas 62,8894° W 6,5067° N a 333 msnm. El río Caroní drena hasta ese punto 41.750 Km².

(Figuras 2 y 3). Es decir, a nivel de país, se observa una tendencia general a la ocurrencia de trimestres más lluviosos que lo habitual (i.e., en cuanto a la cantidad de precipitación).

Dada la estrecha relación entre la precipitación y el régimen hídrico de los ríos, los cambios en las pautas pluviométricas pudiesen desencadenar complejos impactos sobre los ecosistemas fluviales. En efecto, como se aprecia en la Figura 5, la variabilidad climática (inducida o no por el calentamiento global) puede llegar a modificar el régimen hídrico de los ríos (al menos, temporalmente), poniendo en riesgo la integridad y funcionamiento de los ecosistemas y causando el detrimento de las poblaciones humanas en las cuencas que dependen de los diversos servicios ambientales que proveen estos ecosistemas fluviales (Rodríguez-Olarte et al. 2018). Ahora bien, si es cierto que las tendencias recientes en la precipitación apuntan a trimestres con mayor humedad en amplias regiones del país (Figura 4), esta situación puede

cambiar en la medida que el calentamiento global se acentúe; como lo sugieren las salidas de los MCGAO que sustentan varios reportes técnicos en Venezuela (MINEA 2017, ACFIMAN-SACC 2018).

Es ampliamente conocido dentro de la comunidad científica, que el estado de conservación de los recursos hidrobiológicos de una región hidrográfica, depende de la aportación pluviométrica a lo largo de un año o en años sucesivos, pues ésta incide directamente sobre la dinámica hidrológica (Méndez et al. 2017). En consecuencia, la ocurrencia de años caracterizados por un severo déficit hídrico o un superávit hídrico en conjunción con la sobreexplotación de los recursos hidrobiológicos y la contaminación fluvial puede mermar su estado de conservación (Silva et al. 2016). En este estudio, no se estimó cuán sobreexplotados y contaminados están los principales ríos que conforman el área de estudio (Figura 1), pero es previsible suponer que los hábitats y biotas en las cuencas que están experimentando aportes pluvio-

métricos excedentarios o deficitarios (regiones coloreadas en azul y rojo en la Figura 4, respectivamente) podrían no evolucionar lo suficientemente rápido para adaptarse al cambio en la precipitación. Así, de mantenerse esta situación, se estima necesario establecer alguna figura de protección especial sobre aquellas regiones ‘hotspots’ identificadas (Figura 4) que garantice la conservación de las cuencas hidrográficas amenazadas por la variabilidad climática, inducida o no por el calentamiento global.

Agradecimiento

Se agradece al Dr. Edilberto Guevara Pérez (Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo) por proveer la serie de caudales diarios del río Caroní en la estación Arekuna (fuente original: EDELCA).

5. BIBLIOGRAFÍA

- ACFIMAN-SACC (Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales - Secretaría Académica de Cambio Climático, Venezuela). 2018. Primer Reporte Académico de Cambio Climático 2018: Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Primer Reporte Académico de Cambio Climático de la SACC de la ACFIMAN de Venezuela”. [Villamizar, A., E. Buroz Castillo, R. Lairet Centeno, y J. A. Gómez (Eds.)]. Ediciones ACFIMAN - CITECI, Caracas.
- Ahn, S., Jeong, J. y Kim, S. 2016. Assessing drought threats to agricultural water supplies under climate change by combining the SWAT and MODSIM models for the Geum River basin, South Korea. *Hydrological Sciences Journal*. 61(15): 2740-2753.
- Belloa, J. E. G., González, C. E. V., y Pérez, E. G. 2010. Análisis estocástico de una serie cronológica de caudales mensuales. Caso de estudio: Río Caroní, Venezuela. *Revista Ingeniería UC*. 17(1): 46-54.
- Chacón-Moreno, E., Ulloa, A., Tovar, W., Márquez, T. C., Sulbarán-Romero, E. y Rodríguez-Morales, M. 2013. Sistema de clasificación ecológico y mapas de ecosistemas: enfoque conceptual-metodológico para Venezuela. *Ecotrópicos*. 26: 1-27.
- Chen, J. y Gupta, A. K. 1997. Testing and locating variance change points with application to stock prices. *Journal of the American Statistical Association*, 92(438): 739-747.
- Chen, L., Li, T., Yu, Y. y Behera, S. 2017. A possible explanation for the divergent projection of ENSO amplitude change under global warming. *Climate dynamics*. 49(11-12): 3799-3811.
- de Barros Soares, D., Lee, H., Loikith, P. C., Barkhordarian, A., y Mechoso, C. R. 2017. Can significant trends be detected in surface air temperature and precipitation over South America in recent decades? *International Journal of Climatology*. 37(3): 1483-1493.
- De Oliveira, C. P., Ambrizzi, T. y Aimola, L. 2017. Influence of intraseasonal variability on precipitation in northern South America during the winter season. *International Journal of Climatology*. 37(4): 2177-2186.
- Dosio, A. y Panitz, H. 2016. Climate change projections for CORDEX-Africa with COSMO-CLM regional climate model and differences with the driving global climate models. *Climate Dynamics*. 46(5-6): 1599-1625.
- Ebert, E., Janowiak, J. y Kidd, C. 2007. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 88(1): 47-64.
- Gosling, S. y Arnell, N. 2016. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*. 134(3): 371-385.
- Guenni, L., Degryze, E. y Alvarado, K. 2008. Análisis de la tendencia y la estacionalidad de precipitación mensual en Venezuela. *Revista Colombiana de Estadística*. 31(1): 41-65.
- Hinkley, D. V. 1970. Inference about the change-point in a sequence of random variables. *Biometrika*. 57(1): 1-17.
- Horváth, L. 1993. The maximum likelihood method for testing changes in the parameters of normal observations. *The Annals of Statistics*. 21(2): 671-680.
- Infante, R. 2018. Climate Change Indicators for the Caribbean Region: General Trends in Temperature and Precipitation (1900–2009). *Current Journal of Applied Science and Technology*. 1-8.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2018. *Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems*. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. Geneva: World Meteorological Organization.
- Jackson, C., Sen, M., Huerta, G., Deng, Y. y Bowman, K. 2008. Error reduction and convergence in climate prediction. *Journal of Climate*. 21(24): 6698-6709.
- Kangalawe, R. 2017. Climate change impacts on water resource management and community livelihoods in the southern highlands of Tanzania. *Climate and Development*. 9(3): 191-201.
- Leng, G., Tang, Q., y Rayburg, S. 2015. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China. *Global and Planetary Change*. 126: 23-34.
- León, G. A. 2002. Clasificaciones de pisos térmicos en Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*. 43(2): 311-328.
- Liu, J., Wang, B., Cane, M., Yim, S. y Lee, J. 2013. Divergent global precipitation changes induced by natural versus anthropogenic forcing. *Nature*. 493(7434): 656.
- Martelo, M. T. 2003. *La precipitación en Venezuela y su relación con el sistema climático*. Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología. Dirección General de Cuencas Hidrográficas - MARN. [Consulta: 25-05-2019] Disponible en: <https://bit.ly/2HEa52U>
- Mearns, L. O., Rosenzweig, C. y Goldberg, R. 1997. Mean and variance change in climate scenarios: methods, agricultural applications, and measures of uncertainty.

- Climatic Change*. 35(4): 367-396.
- Méndez, C., Moreno, M., Montoya, J. V., Felicien, A., Nikonova, N. y Buendía, C. 2017. Escenarios de cambio climático y la conservación de los ríos de Venezuela. Capítulo 2 (pp: 173-188). En: Rodríguez-Olarte, D. (Editor). *Ríos en riesgo de Venezuela. Volumen 1*. Colección Recursos hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela.
- Middelkoop, H., Daamen, K., Gellens, D., Grabs, W., Kwadijk, J. C., Lang, H. y Wilke, K. 2001. Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. *Climatic change*. 49(1-2): 105-128.
- Milly, P., Dunne, K. y Vecchia, A. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*. 438(7066): 347.
- MINEA (Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas, Venezuela). 2017. Segunda Comunicación Nacional Ante La Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático. Fundación. ed. Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas. MINEA. Caracas.
- Mooney, H., Larigauderie, A., Cesario, M., Elmquist, T., Hoegh-Guldberg, O., Lavorel, S. y Yahara, T. 2009. Biodiversity, climate change, and ecosystem services. *Current opinion in environmental sustainability*. 1(1): 46-54.
- Olivares, B., Cortez, A., Parra, R., Rodríguez, M., & Guevara, E. 2013. Aplicación de procedimientos estadísticos para el control de calidad de las series de precipitación mensual en los llanos orientales venezolanos. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 30(3): 367-391.
- Olivares, B., Zingaretti, M. L., Demey Zambrano, J. A., & Demey, J. R. 2017. Aplicación del método STATIS-ACT al régimen de lluvias en la Región Oriental Venezolana. *UNED Research Journal*. 9(1): 97-106.
- Ovalles, Y., Méndez, E., Ripanti, F., Ramírez, G. y León, J. 2012. El plan de ordenación y desarrollo de cuencas hidrográficas en la construcción de futuro. *Revista Forestal Venezolana*. 56(1): 83-94.
- Pérez, E. G., Bello, J. E. G., & García, E. 2008. Análisis del patrón de distribución espacial de las lluvias en la cuenca del Lago de Valencia, Venezuela. *Revista Ingeniería UC*. 15(2): 41-51.
- Pierre, F. y Tirado, M. 2007. Influencia del ENOS sobre la precipitación en la cuenca del río Yacambú y la depresión de Quíbor, estado Lara, Venezuela. *Bioagro*. 19(1): 41-52.
- Reuter, H., Nelson, A. y Jarvis, A. 2007. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science*. 21(9): 983-1008.
- Rivera, J., Penalba, O., Villalba, R., Araneo, D. 2017. Spatio-temporal patterns of the 2010–2015 extreme hydrological drought across the Central Andes, Argentina. *Water*. 9(9): 652
- Rodríguez-Betancourt, R. y González-Aguirre, J. 2000. *El manejo de los recursos hídricos en Venezuela*. International Water Management Institute: México, Distrito Federal. 40 p.
- Rodríguez-Olarte, D., Marrero, C. Taphorn, D. 2018. Ríos en riesgo al Mar Caribe y al Golfo de Venezuela. Capítulo 4 (pp: 71-102). En: Rodríguez-Olarte, D. (Editor). *Ríos en riesgo de Venezuela. Volumen 2*. Colección Recursos hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela.
- Rodríguez-Olarte, D., Araujo, A., Bianchi, G., Boher, S., Castillo, O., Cordero, Y., Escudero, J., Fernández, A., García, J. E., Lasso-Alcalá, O., Martínez, M., Marrero, C., Mendoza, M., Morón-Zambrano, V., Rodríguez, P., Segnini, S., Seijas, A. E. & Velásquez, J. 2019. Los ríos en riesgo de Venezuela y la ruta para su conservación. *Ecotrópicos*. 31: 1-8. e0008
- Rojas, M. y Alfaro, E. 2000. Influencia del océano Atlántico tropical sobre el comportamiento de la primera parte de la estación lluviosa en Venezuela. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 7(2): 88-92.
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A. y Ziese, M. 2018. GPCC Full Data Monthly Product Version 2018 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges Built on GTS-Based and Historical Data. Deutscher Wetterdienst: Offenbach am Main, Germany.
- Silva, G., Gómez, B., Rodríguez-Olarte, D. y Marrero, C. 2016. Integración de escalas, gradientes ambientales e índices en la evaluación del estado de conservación de los ríos en la costa oriental del lago de Maracaibo, Venezuela. *Intervención*. 41(5): 305-311.
- Silva-León, G. 2010. *Tipos y subtipos climáticos de Venezuela*. Trabajo de ascenso a la categoría de titular. Departamento de Geografía Física. Escuela de Geografía. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Stainforth, D., Aina, T., Christensen, C., Collins, M., Faull, N., Frame, D., y Piani, C. 2005. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature*. 433(7024): 403.
- Sun, F., Roderick, M. y Farquhar, G. 2012. Changes in the variability of global land precipitation. *Geophysical Research Letters*: 39(19).
- Tim, N. y De Guenni, L. 2016. Oceanic influence on the precipitation in Venezuela under current and future climate. *Climate Dynamics*. 47(1-2): 211-234.
- Tomaziello, A. C. N., Carvalho, L. M. y Gandu, A. W. 2016. Intraseasonal variability of the Atlantic Intertropical Convergence Zone during austral summer and winter. *Climate Dynamics*. 47(5-6): 1717-1733.
- Trejo, F. J. P., Barbosa, H. A., Ruiz, I. Q. y Peñaloza-Murillo, M. A. 2016. Patrones de circulación atmosféricos oceánicos a meso-escala vinculados a las sequías severas y extensas en Venezuela. *Revista Brasileira de Meteorología*. 31(4): 468-489.
- Wang, X., Wen, Q. y Wu, Y. 2007. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 46(6): 916-931.
- Wang, X., Zhang, J., Shahid, S., Guan, E., Wu, Y., Gao, J. y He, R. 2016. Adaptation to climate change impacts on water demand. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 21(1): 81-99.