

Influencia de la deforestación y el cambio climático en la formación de los “ríos voladores de la Amazonia” y su impacto en la disponibilidad hídrica de Bogotá y la región circundante

Alejandra Cifuentes Guerrero^{1*}

Mauricio Cote Alarcón²

Resumen

El transporte de humedad por medio de los “ríos voladores de la Amazonia” y su papel en la formación de precipitaciones en regiones localizadas a kilómetros de distancia del bosque amazónico es uno de los ejemplos más notorios de las teleconexiones entre los Sistemas de la Tierra para su adecuado funcionamiento. Los impactos de la posible sabanización de la Amazonia, -inducida por la deforestación e intensificada por el cambio climático-, en la prestación de servicios ecosistémicos de alcance global y regional, como la regulación climática e hídrica, ha sido objeto de diversos estudios que aplican complejos modelos matemáticos para predecir el comportamiento de variables como la evapotranspiración y la liberación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera; sin embargo, estas relaciones no se han estudiado con la suficiente profundidad en zonas como Bogotá D.C. y la región circundante, a pesar de que se conoce que la recarga de agua de los páramos de Sumapaz y Chingaza, de los cuales depende su abastecimiento hídrico, está influenciada por la cantidad de humedad que llega del Océano Atlántico a la Orinoquía y a la Amazonia y de ellas a la región Andina. Este artículo presenta algunas reflexiones sobre los efectos de la deforestación y la posible sabanización de la Amazonia en la formación de los “ríos voladores” y su influencia en la disponibilidad hídrica de Bogotá D.C. y la región circundante, con el fin de mostrar que la pérdida del bosque amazónico representa un

riesgo para el abastecimiento de agua de la ciudad de Bogotá y los municipios colindantes y, por tanto, para la calidad de vida de sus habitantes.

Palabras clave: Amazonia, cambio climático, deforestación, regulación hídrica, sabanización.

Abstract

The transport of moisture through the “Amazon flying rivers” and its role in the formation of precipitation in regions located kilometers away from the Amazon Forest is one of the most notorious examples of teleconnections between Earth Systems for their proper functioning. The impacts of the possible savanization of the Amazon, -induced by deforestation and intensified by climate change-, on the provision of ecosystem services of global and regional scope, such as climate and water regulation, has been the subject of several studies that apply complex mathematical models to predict the behavior of variables such as evapotranspiration and the release of Greenhouse Gases (GHG) into the atmosphere; however, these relationships have not been studied in sufficient depth in areas such as Bogotá D.C. and the surrounding region, despite the fact that it is known that the water recharge of the Sumapaz and Chingaza paramos, on which their water supply depends, is influenced by the amount of moisture that reaches the Atlantic Ocean to the Orinoquia and the Amazon and from them to the Andean region. This article presents some reflections on the effects of deforestation

¹ Miembro del Consejo Directivo del colectivo de pensamiento para la investigación, reflexión y acción política ambiental Voces 2030 Colombia. Correo electrónico: jalejacg2@gmail.com

² Miembro del Consejo Directivo del colectivo de pensamiento para la investigación, reflexión y acción política ambiental Voces 2030 Colombia. Correo electrónico: mauriciocote@gmail.com

and the possible sabanization of the Amazon on the formation of the “flying rivers” and their influence on the water availability of Bogotá D.C. and the surrounding region, in order to show that the loss of the Amazon forest represents a risk to the water supply of the

city of Bogotá and the surrounding municipalities and, therefore, for the quality of life of its inhabitants.

Keywords: Amazonia, climate change, deforestation, water regulation, sabanization.

INTRODUCCIÓN

La región amazónica es uno de los puntos críticos del planeta³ (Poveda, 2011) para la prestación de servicios ecosistémicos indispensables para el bienestar humano. La degradación de su cobertura vegetal puede perturbar significativamente el sistema climático global, ya que el bosque amazónico juega un papel fundamental en su regulación, al ser proveedor de calor troposférico, necesario para la circulación atmosférica general (Nobre, et al., 2009). Además, el régimen hidrológico de la selva tropical hace que la región sea una fuente imprescindible de humedad (Builes-Jaramillo, et al., 2018), que es transportada a regiones remotas a través de lo que Makarieva y Gorshkov (2007), investigadores del Instituto de Física Nuclear de San Petersburgo, denominaron “bio-bomba amazónica”, es decir, el proceso por el cual flujos masivos de agua en forma de vapor, que vienen del océano Atlántico tropical y se cargan de humedad con la evapotranspiración del bosque amazónico, son transportados a través del aire hacia otras regiones y alimentan importantes zonas hídricas, como la cuenca del río de la Plata, a la cual la Amazonia aporta casi el 20% de su precipitación media anual (Martínez y Domínguez, 2014), el norte de Sudamérica (Hoyos, et al., 2018), el sureste de América del Sur y los Andes orientales (Ampuero, et al., 2020).

Estos flujos también son llamados “ríos voladores” o “ríos del aire” del Amazonas y se encuentran a una altura de hasta 15 kilómetros, que son transportados por las corrientes de viento húmedo, que, al chocar con la cordillera de los Andes ascienden, se enfrían y se condensan, generando precipitaciones sobre el piedemonte andino que alimentan las corrientes de agua superficiales, de las cuales depende el abastecimiento hídrico de ciudades ubicadas a kilómetros de distancia de la región (Poveda, 2011). Es importante señalar que, el proceso descrito solo funciona en los bosques naturales prístinos; los bosques plantados u otro tipo de vegetación como los pastizales, no son capaces de activar la bio-bomba amazónica y generar el vapor de agua suficiente para que se formen los ríos voladores. Sobre este proceso, el climatólogo brasileño Antonio Nobre (2017), señala que los árboles de la cuenca amazónica transpiran diariamente 20 billones de litros de agua hacia las regiones como el sureste de

América del Sur y los Andes orientales (Ampuero, et al., 2020), lo que muestra las delicadas y profundas interconexiones entre el bosque amazónico y la estabilidad global del ciclo del agua, pues como lo señala el citado investigador “*sin los ríos del cielo se secan los de la tierra*” (Nobre, 2017).

La importancia hidroclimatológica de la cuenca del río Amazonas a escala global, regional y local ha sido objeto de diversos estudios, que han buscado analizar las teleconexiones entre el bosque amazónico y la regulación del ciclo hidrológico, a partir del comportamiento de variables como la precipitación, la humedad, la evapotranspiración, el balance hídrico superficial, la circulación del viento, entre otros. Algunos ejemplos son las investigaciones de Marengo (2004); Carmona (2016); Poveda, et al., (2016); Mallick, et al., (2016) y Ruiz-Vásquez, et al., (2020). En cualquiera de los casos, los resultados de los modelos aplicados, que cada vez se robustecen más al incluir nuevas variables, tienen un alto grado de incertidumbre, como es el caso de los que analizan la evapotranspiración, que es la variable más incierta, debido a las dificultades para obtener mediciones precisas in situ y estimaciones regionales (Builes-Jaramillo y Poveda, 2018).

El cambio climático y la deforestación son dos importantes motores de transformación de la Amazonia que conducen a cambios en las teleconexiones señaladas, además de impactos que pueden ser irreversibles, como la reducción de la biodiversidad y la pérdida de funciones clave del ecosistema (Haddad, et al., 2015). Los efectos de dichas transformaciones pueden alterar el flujo de humedad entre la Amazonia y ciudades ubicadas gran distancia como Bogotá, Quito, Lima y La Paz (Poveda, 2011), lo que se refleja en la reducción de las precipitaciones y, por tanto, en la generación de riesgos para la seguridad hídrica de sus habitantes

Si bien, el cambio climático puede afectar, en el largo plazo, la función que desempeña la Amazonia para el reciclaje de lluvias, a través de la evapotranspiración; la deforestación de grandes áreas de la región representa una amenaza más inmediata para que el bosque amazónico continúe prestando servicios de regulación hídrica y climática de alcance regional y global. Diversos estudios que analizan múltiples escenarios de deforestación en la región, como los de Bonan (2008) y Alvez, et al., (2017), indican que, si a la pérdida del bosque amazónico por deforestación se le añaden los efectos del cambio climático, es muy probable que se altere la retroalimentación atmosférica positiva de la cual depende la regulación del ciclo del agua global y regional, como lo muestran los resultados de (Spracklen y García-Carreras, 2015), que encontraron que la deforestación producida en 2010, disminuyó la precipitación media anual en

³ Otros lugares incluyen (i) la meseta tibetana, (ii) la región donde se forma el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), (iii) los bosques y tundra siberianos, (iv) la válvula del Mediterráneo y su conexión con el océano Atlántico, (v) la Antártica y el hueco en su capa de ozono, entre otros (Poveda, 2011).

toda la cuenca del Amazonas en $1,8 \pm 0,3\%$, una tendencia menor que la variabilidad interanual en las precipitaciones analizadas, como consecuencia de un menor reciclaje de humedad.

En Colombia, el análisis de las dinámicas ecológicas de la Amazonia tiene importantes interrelaciones con el resto del país, pese a que la región, en el imaginario colectivo de los colombianos, se concibe como remota, uniforme, deshabitada, desconocida y hostil (Guhl y Cifuentes, 2020). La conexión de sus procesos hidrológicos con los de los Andes y la Orinoquía, constituye uno de los principales servicios ecosistémicos que presta el bosque amazónico; su alteración se refleja en factores indispensables para el bienestar de los habitantes de lugares localizados a kilómetros de distancia, como la disponibilidad hídrica para los bogotanos y los territorios aledaños al Distrito Capital, puesto que, la pérdida de cobertura boscosa puede perturbar el circuito de retroalimentación entre los Andes y la Amazonia (Poveda, 2011) y por tanto, reducir las precipitaciones que alimentan los páramos de Chingaza y Sumapaz, de los cuales depende el abastecimiento de agua de Bogotá D.C. y la región circundante (Guhl, 2012).

Lo anterior, no ha sido analizado con la suficiente profundidad para determinar, por ejemplo, el grado de reducción de los niveles de precipitación en Bogotá D.C. y la región circundante y los efectos que esto conlleva en el ciclo hidrológico de los páramos mencionados. La escasa información disponible sobre precipitación en los Andes y la Orinoquía es insuficiente para aplicar modelos robustos que permitan comprender plenamente los impactos del cambio climático y la deforestación en la Amazonia en el abastecimiento de agua para cerca de 12 millones de personas que habitan la capital del país y los municipios aledaños.

Teniendo en cuenta lo anterior, la investigación que se presenta en este artículo tuvo como objetivo analizar, a partir de información secundaria, los efectos de la sabanización de la Amazonia -es decir, el cambio de la vegetación del ecosistema de bosque hacia llanuras con pocos árboles aislados, característicos de un ecosistema de sabana-, inducida por la deforestación e intensificada por el cambio climático, en las dinámicas hidrológicas de los ríos voladores de la Amazonia y su influencia en la disponibilidad hídrica de Bogotá D.C. y la región circundante. Esto, con el fin de mostrar que se puede llegar a un punto de inflexión, causado por los factores señalados, que pone en peligro los ecosistemas amazónicos y su capacidad para prestar servicios ambientales indispensables para el bienestar humano en zonas ubicadas a considerable distancia.

Para abordar dicho objetivo, en primer lugar, se explican las dinámicas atmosféricas y físicas que influyen en la formación de los ríos voladores de la Amazonia y las teleconexiones entre estos y los niveles de precipitación en regiones como los Andes Tropicales del Norte, la cuenca del Río Magdalena y la Cuenca del Orinoco. Posteriormente, se analizan los efectos de la deforestación en el proceso de reciclaje de lluvias que realiza el bosque amazónico y el transporte de humedad a través del aire. A continuación, se

describen los principales efectos del cambio climático en la región que, sumado a la deforestación, intensifica y acelera el proceso de sabanización y, por tanto, la pérdida de los servicios ecosistémicos mencionados y se presentan algunas aproximaciones a los impactos de esta situación en la regulación de los sistemas hídricos de los cuales depende el abastecimiento de agua para Bogotá D.C. y la región circundante. Finalmente, se concluye con algunas consideraciones para tener en cuenta para el análisis profundo de las teleconexiones entre la Amazonia y el interior del país.

METODOLOGÍA

Este artículo es el resultado de una investigación cualitativa, crítica y analítica, realizada a partir de la aplicación de la técnica de análisis documental, con el fin de mostrar los efectos de la sabanización de la Amazonia, como consecuencia de la deforestación y el cambio climático, en las dinámicas hidrológicas de los ríos voladores y su influencia en la disponibilidad hídrica de Bogotá D.C. y la región circundante.

La investigación se elaboró por medio de reflexiones teóricas, en las que se abordó el tema de manera deductiva, es decir, con la descripción de las variables antes mencionadas en un contexto global y regional, para luego analizarlas en el caso puntual de Bogotá D.C. y la región circundante. De esta manera, a partir de un enfoque propositivo, las reflexiones presentadas en el texto permiten identificar las decisiones estratégicas de política pública que deberían tomarse para la Amazonia, con el fin de garantizar la regulación del ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua en la capital del país, reconociendo las dinámicas de degradación actuales y futuras que se presentan en la región amazónica, así como aquellas que trascienden sus fronteras físicas y requieren de esfuerzos globales, como el cambio climático.

Las principales fuentes de información se obtuvieron de artículos científicos obtenidos en bases de datos como Science Direct, Jstor, Web of Science, entre otras, así como en literatura nacional. Las palabras claves utilizadas para filtrar la información fueron cambio climático, deforestación, evapotranspiración, regulación hídrica, sabanización y región amazónica. El proceso de selección de la información se basó, principalmente, en los análisis en la región de los Andes y la Orinoquía, que corresponden a los territorios que influyen en el ciclo hidrológico en Bogotá D.C. y la región circundante.

LOS RÍOS VOLADORES DE LA AMAZONIA: REGULADORES HÍDRICOS REGIONALES, CONTINENTALES Y GLOBALES.

Las complejas y dinámicas interrelaciones entre la Amazonia y la prestación de servicios ecosistémicos de alcance regional, continental y global (Marengo et al, 2002), es quizás uno de los ejemplos más dicentes de la hipótesis Gaia, propuesta por

James Lovelock, que establece que los Sistemas de la Tierra están interconectados y se autorregulan para mantener un estado de homeostasis propicio para el desarrollo de la vida (Lovelock, 1983).

Poveda (2011), señala que es crucial ver el bosque amazónico como un mecanismo global y regional de reciclaje de las lluvias, a través de la evapotranspiración. Según el autor, la mitad de la lluvia que cae en la cuenca amazónica se genera por la evapotranspiración del bosque, en cuyo suelo se almacenan alrededor de 7.000 km³ de agua. Al respecto, Boers, et al., (2017) señalan que la entrada de humedad en vastas zonas de América del Sur depende de las dinámicas de los ríos voladores; allí el agua es transportada por los vientos alisios que vienen de los centros de altas presiones del Atlántico Norte Tropical y pasan por el mar Caribe o, de los vientos que vienen de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur, los cuales, una vez atraviesan la cuenca amazónica, son bloqueados por las montañas de los Andes hacia el oeste y canalizados hacia el sur, siendo una fuente importante de humedad en zonas como Colombia, Perú, Ecuador, Bolivia, el sur del Brasil, Uruguay, Paraguay y el norte de Argentina. En este proceso, la evapotranspiración de la selva amazónica recarga el contenido de humedad de la atmósfera de bajo nivel y resulta en humedad adicional disponible para la generación de precipitación hacia los Andes. El proceso descrito se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Proceso de formación de los ríos voladores de la Amazonia

Fuente: Iglesias P. (Marzo 17 de 2021). Ríos Voladores en Amazonia: Sin bosques, no hay lluvias. LATFEM. Periodistas por el Planeta (PxP) en América Latina. Disponible en: <https://latfem.org/rios-voladores-en-amazonia-sin-bosques-no-hay-lluvias/>

De esta manera, los Andes juegan un rol fundamental en el balance hídrico de toda la cuenca (McClain y Naiman, 2008), al impulsar la circulación del viento desde la Amazonia hacia las zonas altoandinas e influir en su convección a lo largo de las laderas de la cordillera de los Andes (Poveda et al., 2013). Lo anterior, indica que las regiones altoandinas⁴ y la zona baja de la Amazonia constituyen dos subsistemas conectados; el primero importa agua atmosférica de los bosques del segundo a través de los vientos alisios, y a su vez, exporta agua, incluyendo sedimentos y nutrientes. Así, la cuenca amazónica actúa como una fuente de agua indispensable para la región andina, que se utiliza no solo para la generación de evapotranspiración, sino para mantener la escorrentía (Builes-Jaramillo et al, 2018) que alimenta las fuentes de agua superficiales.

La formación de precipitación a través de los ríos voladores requiere que confluyan al menos tres condiciones fundamentales: las dinámicas atmosféricas como el aumento y descenso de la temperatura y los vientos que se producen para compensar las diferencias de presión; la generación de vapor de agua producto de la evapotranspiración del bosque amazónico, debido a su alto índice de área foliar, y la presencia de aerosoles como polvo, material particulado, o compuestos orgánicos emitidos por las plantas, que actúan como núcleos de condensación de las nubes.

El análisis de dichas condiciones muestra las teleconexiones entre los Sistemas de la Tierra para su funcionamiento. Sobre las condiciones atmosféricas, la región se considera por autores como (Faus da Silva, 2008), como una fuente importante de calor tropical durante las temporadas de lluvia, debido a que, como resultado de la condensación, se libera calor latente que calienta el aire y se generan corrientes ascendentes que se elevan hasta la tropopausa, a unos 15 kilómetros de altitud. Estas corrientes, se propagan por toda la atmósfera global, gracias a las células de Hadley que operan sobre los hemisferios Norte y Sur e influyen en el transporte de vapor de agua hacia latitudes extratropicales (Raupp y Dias, 2004).

En cuanto a la advección de humedad gracias a la selva tropical, Makarieva y Gorshkov (2007) afirman que los bosques naturales son la esencia para la formación de los ríos voladores de la Amazonia, al ser los responsables del mantenimiento de altos flujos de evaporación, que apoyan el movimiento ascendente del aire sobre la vegetación y “aspiran” el aire húmedo que proviene del océano. Este proceso, que como se mencionó, puede ser interpretado como una especie de reciclaje de las lluvias, fue analizado profundamente por Ampuero et al, (2020), a partir de la composición isotópica de las precipitaciones durante los últimos 10.000 años, que sirve para comprender la “huella digital” de la humedad de aire transportada. Sus resultados indican que, durante diciembre-enero-febrero, el reciclaje de humedad en la zona norte y sur de la Amazonia es notable,

⁴ Según Builes-Jaramillo et al., 2018, los Andes comprenden aquellas regiones ubicadas por encima de los 500 msnm, mientras que la Amazonia baja se define como las áreas por debajo del mismo umbral.

particularmente en Bolivia y Perú, que son las regiones con mayor riesgo de deforestación.

Con respecto a la concentración de aerosoles en la atmósfera, Faus da Silva (2008), indica que cuando ésta aumenta, por causas como los incendios forestales, que en la Amazonia han incrementado su magnitud y ocurrencia para el desarrollo de actividades agrícolas, la tala y quema de bosques, la expansión de la ganadería, las sequías prolongadas, etc. (Otavo y Murcia, 2018); la cantidad de núcleos de condensación de las nubes también se incrementa y la humedad disponible es compartida por un número mayor de partículas que en una atmósfera más “limpia”, lo que genera que la nube se evapore rápidamente sin producir lluvia, reduciendo la precipitación local.

De esta manera, la formación de los ríos voladores de la Amazonia constituye un mecanismo de retroalimentación positiva entre la atmósfera, el océano Atlántico y el bosque amazónico, que es indispensable para mantener en el largo plazo las tasas de evapotranspiración, necesarias para la recarga de humedad y la liberación de calor latente para la formación de cascadas de precipitación a escala local y regional, especialmente en América del Sur (Staal et al, 2018). Las interacciones entre dichas variables, sigue siendo un tema abierto de investigación, que permita un mayor entendimiento sobre los límites que se deben respetar para no alterar la advección de humedad atmosférica y, por tanto, las tasas de agua precipitable en regiones lejanas de la Amazonia e incluso al interior de la cuenca, ya que este reciclaje de humedad puede representar más del 50% de la precipitación en la misma región (Marengo et al, 2017).

EFFECTOS DE LA DEFORESTACIÓN SOBRE LOS RÍOS VOLADORES DE LA AMAZONIA

La integridad ecológica de la cuenca amazónica está amenazada por varios impulsores del cambio ambiental global, que operan simultáneamente e interactúan de manera no lineal con los componentes del ecosistema, amenazando su capacidad para prestar servicios ecosistémicos. Dentro de estos, se destacan los cambios en el uso del suelo y el cambio climático, que actúan sinérgicamente e inciden en la estructura, función y conectividad del bosque amazónico. Al respecto, Nobre, et al., (2016), concluyen que el modelo de desarrollo que se ha implementado en la gran cuenca amazónica durante más de 50 años, basado principalmente en la deforestación, no ha generado el aumento en la riqueza de los países o el mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes; por el contrario, ha conducido al uso intensivo de sus recursos y como consecuencia a cambios irreversibles que impactan a todo el planeta, como la pérdida de biodiversidad, la alteración en la regulación del clima y el ciclo hidrológico.

En la región amazónica colombiana, entre 1970 y 2000, la huella humana se concentró en los departamentos de Caquetá y Putumayo (Correa, et al., 2020), principalmente

como consecuencia de los nuevos desarrollos agrícolas de gran escala e intensidad tecnológica, la expansión de la ganadería, la explotación de hidrocarburos y de los cultivos de uso ilícito. A partir de 2015, en un escenario de implementación del Acuerdo de Paz, como lo afirman Botero y Rojas (2018), la destrucción del bosque se ha intensificado y expandido hacia nuevas zonas, como el Área de Manejo Especial de la Macarena (ANEM), que abarca el sur oeste del departamento del Meta y el norte del Guaviare, y recientemente, en paisajes hasta ahora preservados como el Escudo Guayanés en Chiribiquete, los Parques Nacionales Naturales (PNN) y los resguardos indígenas.

Lo anterior, es principalmente consecuencia de políticas públicas erráticas que impulsan la explotación del potencial minero energético, el desarrollo agroindustrial y la expansión de una red vial, entre otras actividades que contradicen el uso de conservación del suelo que se le debería dar a la región y que no siempre han contado con una planeación y evaluación previa adecuada; lo que sumado a los complejos problemas sociales que se presentan en la Amazonia, como el dominio territorial de las zonas de frontera de deforestación por nuevos grupos armados ilegales desertores de las FARC y las BACRIM, genera un panorama de aceleración en la fragmentación del bosque y con ello, la pérdida de su potencial para prestar servicios ecosistémicos (Botero y Rojas, 2018). En síntesis, la actual situación de deforestación en la Amazonia, como lo afirma Botero, (2020), muestra que la deforestación neta en la región es cada vez más amplia y el bosque remanente se reduce a áreas protegidas, resguardos indígenas y a zonas del Escudo Guayanés, lo que pone en evidencia la necesidad de aumentar los esfuerzos para frenar la deforestación y desarrollar procesos de restauración.

Diversos autores: Soares-Filho, et al., (2006); Nepstad, et al., (2008); Marengo et al., (2011); Lovejoy y Nobre, (2018) han analizado la posibilidad que la región alcance el “punto de no retorno” (*Amazon dieback o tipping point*), es decir, el umbral crítico en el que una pequeña perturbación puede alterar, de forma irreversible, el equilibrio y funcionamiento de la Amazonia. Dichas investigaciones, señalan que en 2050 el bosque amazónico habría perdido su capacidad para prestar servicios ecosistémicos, con los consecuentes efectos ambientales a escala global, como la liberación del carbono almacenado en él o, como se ha descrito, en la alteración del ciclo del agua. Según Nepstad, et al., (2008), si a los procesos de fragmentación del bosque, en especial a la deforestación, se añaden los impactos del cambio climático, se producirá un deterioro ecológico irreversible en la región en menos de 100 años, dando paso a su sabanización.

Sobre este asunto, Sampaio, et al., (2007), señalan que si el área deforestada en la Amazonia excede el 40% de su extensión total o si el aumento de la temperatura global es superior a 3.5–4 °C (Cox, et al., 2000), se puede llegar al punto de no retorno. Los efectos de dichas transformaciones conducen a cambios que alteran el flujo de humedad hacia la Amazonia y pueden reflejarse en la reducción de las precipitaciones e

intensas sequías. Aunque autores como Marengo, et al., (2011), señalan que la existencia del punto de inflexión todavía requiere mayor investigación, las interacciones entre el cambio climático y la deforestación aumentan la probabilidad que este ocurra, puesto que la deforestación induce a cambios en el clima, que pueden inhibir la regeneración del bosque.

Con respecto a las proyecciones de deforestación en la cuenca amazónica, Alvez, et al., (2017), indican que para 2030, la pérdida de bosque alcanzará aproximadamente el 28% del área total de la cuenca, mientras que en 2050 aumentará al 38%. Teniendo en cuenta dichos escenarios hipotéticos, Marengo et al., (2011), señalan que casi todos los modelos que relacionan la deforestación con la precipitación muestran una reducción significativa en las lluvias, así como la disminución del flujo de corrientes de viento y un aumento de la temperatura del aire.

A nivel global, Molina et al, (2019), encontraron que la pérdida de bosques puede tener impactos generalizados en las precipitaciones continentales, relacionados con cambios en la distribución del viento. Al respecto, uno de los resultados de la investigación de Ruiz et al, (2020), es que a medida que las áreas deforestadas aumentan sobre la cuenca del Amazonas, se inducen cambios en el transporte de vapor de agua sobre América del Sur, debido a que el flujo transecuatorial hacia el norte observado durante el verano boreal se debilita; mientras que, el flujo transecuatorial hacia el sur durante el verano austral se mejora, lo que afecta el transporte de humedad atmosférica entre los dos hemisferios y, por tanto, en el inicio y la desaparición de los monzones americanos, especialmente el monzón sudamericano, que depende de dicha circulación.

A pesar de lo anterior, los citados autores, advierten que se necesitan estudios más rigurosos para evaluar la influencia de la deforestación en el flujo transecuatorial en América del Sur, ya que este proceso forma parte de mecanismos complejos a gran escala como la circulación meridional de la célula de Hadley continental.

A nivel regional, el ciclo hidrológico en la cuenca del Amazonas puede verse alterado por diversas causas, como eventos extremos impulsados por forzamientos macroclimáticos como el Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Xavier, et al., 2010); altas temperaturas anómalas en el Atlántico Norte Tropical asociadas con el aumento del transporte de humedad hacia la cuenca; inundaciones relacionadas con la influencia de eventos de La Niña; anomalías de la temperatura superficial marina del Atlántico Sur Tropical e Indo-Pacífico (Cavalcanti, et al., 2016) y, de especial importancia para el análisis que se presenta en este documento, por la pérdida de la cobertura boscosa, al causar respuestas no lineales del régimen de circulación atmosférica y alteraciones en el proceso de retroalimentación entre la evapotranspiración y la precipitación, asociadas con un debilitamiento de la convergencia de la humedad y la célula regional de Walker sobre el noreste de América del Sur y el suroeste del Atlántico Norte Tropical (Ruiz, et al., 2020).

El modelo no lineal construido por Boers, et al., (2017), para analizar los efectos en cascada de la deforestación en la generación de humedad en la cuenca amazónica, muestra que la pérdida de bosque en la región conduce a la disminución de la evapotranspiración y a una retroalimentación positiva asociada con la liberación atmosférica de calor latente. El modelo analizó estas dos variables en temporada de monzones (diciembre a febrero), con el fin de mostrar resultados en un ambiente “conservador”, ya que los efectos de la deforestación sobre el ciclo del agua pueden ser más severos durante la estación seca. Los resultados de la investigación indican que reemplazar el bosque amazónico por tierras de cultivo o por pastos, conduce al aumento del albedo y, en consecuencia, a la reducción de la radiación superficial. Lo anterior, genera una disminución de la evapotranspiración en al menos un 20%, pasando de 0.16 mm/h a 0.13 mm/h.

De esta manera, el citado estudio concluye que a nivel regional para el escenario de deforestación a 2030 propuesto por Alvez, et al., (2017), las estaciones secas largas aumentarán su frecuencia de ocurrencia en un 29% con respecto al escenario de referencia, mientras que, la frecuencia de las estaciones secas cortas se reducirá en un 20%. Para el escenario 2050, las estaciones secas largas aumentarán a 57%. En síntesis, los resultados indican que los mayores impactos asociados con la reducción de la advección de humedad se observan en la Amazonia occidental y la región de transición Amazonia-Andes, con mayor intensidad en Perú, Bolivia y Ecuador (Ruiz, et al., 2020).

En la escala local, algunos estudios indican que la deforestación podría generar el aumento de las precipitaciones a través de lo que da Silva, et al., (2008) llaman “brisa forestal”; proceso en el que los bosques crean un efecto de convergencia entre las zonas boscosas y deforestadas, dando origen a aumentos en las precipitaciones impulsadas por la convección en los límites de la región deforestada. Sin embargo, el análisis de estas respuestas locales a la pérdida de cobertura vegetal depende de la escala en la que se presenten.

Al respecto, D´Almeida, et al., (2007), encontraron que, para pequeños parches de deforestación en zonas extensas de bosques, se presenta un aumento de la precipitación en áreas deforestadas y cambios menores en la evapotranspiración, la temperatura media y la frecuencia de precipitaciones. Sin embargo, esta relación entre el aumento de las precipitaciones y pequeñas áreas deforestadas se podría revertir, cuando la pérdida de bosque alcance un nivel de deforestación mayor (en parcelas de 30-50 km) (Debortoli, et al., 2016), lo que llevaría a la reducción de las precipitaciones y al aumento de las sequías, al alterar el proceso de reciclaje del agua a través del bosque (Dubreuil, et al, 2021).

De esta manera, es claro que la deforestación genera una ruptura de la retroalimentación atmosférica descrita en la sección anterior y tiene marcadas consecuencias en la formación de los ríos voladores de la Amazonia. Cuando se cambia el uso del suelo de la región, se reduce el vapor de agua que produce y hace que el calentamiento atmosférico total caiga a niveles en los que se

disminuye la formación de precipitación entre un 30%-40% en zonas que no presentan deforestación y un déficit hídrico en áreas del sureste de América del Sur, en las que se presenta alta densidad poblacional (Boers, et al., 2017).

Lamentablemente, estudios como el de Boers, et al., (2017), señalan que, incluso después de una reforestación completa de las zonas de bosque que se han perdido en la región, el sistema no podría volver a recuperar el proceso de retroalimentación que ha permitido la regulación del ciclo del agua, puesto que, la vegetación que reemplazaría el bosque natural nunca tendrá la capacidad para generar la transpiración necesaria para que la humedad atmosférica libere el calor latente requerido para mantener la retroalimentación atmosférica positiva.

Así las cosas, la Amazonia no puede soportar una mayor deforestación; se requiere frenar los motores que inducen a los cambios en el uso del suelo, que permitan conservar el bosque que aún queda para garantizar que continúe siendo la base fundamental para la regulación del ciclo hidrológico, como lo ha hecho durante milenios (Lovejoy y Nobre, 2019).

EL CAMBIO CLIMÁTICO COMO IMPULSOR DE LA SABANIZACIÓN DE LA AMAZONIA

Algunos fenómenos de transición lentos e irreversibles, con impactos a escala global, representan fuerzas transformadoras de los sistemas socioecológicos. Estos son conocidos como megatendencias y deben ser vistas desde una perspectiva multidimensional y compleja; es decir, su impacto no solo afecta condiciones ambientales y ecosistémicas, sino que genera presiones sociales, políticas y económicas. Una de las principales megatendencias del cambio ambiental global es el cambio climático, que afecta multidimensionalmente las sociedades y los ecosistemas. En el último informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), se indica que una variación de más de 1,5°C en la Temperatura Media Global (TMG), desencadenará procesos que llevarán principalmente a la biósfera, la hidrósfera y la antropósfera hacia un nuevo estado, alterando el equilibrio global que se ha mantenido en los últimos 11.000 años aproximadamente (IPCC, 2021).

De esta variación en la TMG, se esperan, entre otros, alteraciones en las dinámicas ecosistémicas, aumento en el nivel del mar, eventos extremos de lluvia o sequías, migraciones de poblaciones, entre otros. A nivel político, estos posibles cambios futuros han generado movimientos dentro de la “emergencia climática mundial”, y han llamado a los países a la acción, para que, a partir de un trabajo colectivo y sinérgico, se contrarresten los potenciales efectos del cambio climático en las décadas venideras (IPCC, 2021).

Partiendo de esta perspectiva, los procesos de transición que tendrá la Amazonia como consecuencia del cambio climático se enmarcan en un sistema dinámico, complejo e integrado con ciclos de retroalimentación positivas y negativas. Los resultados

de la investigación de Marengo (2009), en la que se aplicaron complejos modelos climáticos regionales, sugieren que la región amazónica oriental puede volverse más seca en el futuro, y que este proceso de pérdida de humedad podría verse exacerbado por retroalimentaciones positivas con la vegetación. De otro lado, desde una perspectiva temporal y espacial más amplia, la mayoría de los Modelos de Circulación Global predicen que la acumulación de emisiones de GEI, y los aumentos asociados en el forzamiento aditivo de la atmósfera, causarán una disminución sustancial, de cerca del 20% de las precipitaciones en el este de la Amazonia para fines de siglo, con las mayores disminuciones hacia el final de la temporada de lluvias y en la estación seca. Estos cambios heterogéneos en el tiempo y el espacio tendrán impactos significativos y variables en los procesos ecológicos del bosque amazónico (Dubreuil, et al., 2021).

De esta forma, la Amazonia puede verse seriamente transformada, dejando de cumplir funciones regulatorias en los ciclos naturales, como el ciclo hidrológico, el ciclo de carbono, el de nitrógeno, entre otros. Dichas variaciones, como se ha mencionado, crean nuevas dinámicas que se expresan en cambios de cobertura vegetal, aumento de aridez del suelo, o variaciones en los tiempos y duración de las temporadas de lluvia, como concluyen las investigaciones de Debortoli, et al., (2015), al señalar que, en algunas zonas al sur del Amazonas, se ha percibido una extensión de la temporada seca en casi una semana por década.

Según Kruijt, et al., (2014), los impactos del cambio climático se amplifican con factores antropogénicos como el cambio de uso del suelo y la quema de biomasa. Estos efectos pueden favorecer la transformación de la vegetación del bosque en sabana. A pesar que algunos modelos acoplados que analizan las relaciones entre el cambio climático y la deforestación, muestran que si la pérdida de bosques es baja, es poco probable que se presente una sabanización generalizada causada solamente por el cambio climático para 2100, no se puede descartar un rápido declive de la biomasa en la región, puesto que aún existe incertidumbre respecto de la sensibilidad de los bosques amazónicos a las variaciones climáticas y los efectos del cambio de uso del suelo, particularmente en relación con la fertilización, las dinámicas del fuego, la incidencia de la sequía y el desarrollo socioeconómico. Por otro lado, los efectos no serán generalizados en toda la región amazónica, dadas las dinámicas y características particulares de cada zona. Sobre lo anterior, el proyecto AMAZALERT⁵, que investiga los impactos del cambio climático y los cambios en el uso del suelo en la región, concluyó que las regiones sur y este de la cuenca amazónica son más vulnerables al cambio climático que el norte y el noroeste (AMAZALERT, 2014).

En lo que respecta al impacto del cambio climático en la precipitación en la región, Poveda (2011) señala que como consecuencia del incremento de las concentraciones de CO₂ en

⁵ Más información disponible en <http://www.eu-amazalert.org/publications/deliveryreports>

la atmósfera, es posible que las lluvias sobre la cuenca amazónica se reduzcan entre 1 a 2 mm por día, lo que probablemente induciría a un proceso de sabanización de la región. De forma similar, Betts, et al., (2004), indican que el aumento de la concentración de GEI podría afectar el clima regional del Amazonas al reducir el retorno de humedad a la atmósfera por la evapotranspiración.

De esta manera, los impactos previstos por el cambio climático, sumados a la deforestación, aumentan la probabilidad de que cerca del 50% del área total de la gran cuenca de la Amazonia se transforme en sabana en los próximos 100 años (IPCC, 2021). Sobre estas proyecciones, Cox, et al., (2004), señalan que determinar el efecto agregado del cambio climático a gran escala y de la deforestación local es un asunto complejo; sin embargo, la fragmentación de los bosques amazónicos y la vegetación que crece después de la deforestación, son factores que inciden en la intensidad del cambio climático futuro. Esta hipótesis, fue analizada por Sampaio, et al., (2007), y su trabajo concluyó que el impacto de la deforestación sobre el clima a largo plazo podría depender del umbral de las áreas deforestadas y de la organización espacial de los parches de bosque remanentes, pero, en todo caso, la sabanización de la región es un riesgo latente.

Adicionalmente a lo anterior, la deforestación del bosque amazónico reduce la capacidad de captura de carbono en la biomasa, debido al cambio de densidad en la cobertura y los cambios en el uso del suelo. Según Gatti, et al., (2021), la Amazonia se ha convertido en una fuente de emisiones de GEI en vez de mantener su estatus como sumidero de carbono, como lo ha hecho durante milenios. En otras palabras, su capacidad de regulación del balance global de carbono ha sido alterada y el balance neto es considerado hoy día como una fuente adicional de GEI en la atmósfera. Dichas emisiones contribuyen a que el sistema amazónico adquiera una dinámica nueva, generando, como se ha expresado anteriormente, un proceso de retroalimentación positiva dentro del ciclo global de carbono y efectos en la reducción de las precipitaciones. Si se mantiene el ritmo actual de deforestación de la región, sumado a los efectos del cambio climático, se podría acelerar la llegada del punto de no retorno de 2050 a 2030.

INFLUENCIA DE LOS RÍOS VOLADORES DE LA AMAZONIA EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA DE BOGOTÁ Y LA REGIÓN CIRCUNDANTE: ALGUNAS APROXIMACIONES INICIALES.

Para entender los efectos de la “deforestación de los ríos voladores de la Amazonia” en la disponibilidad hídrica de Bogotá D.C. y la región circundante, lo primero es comprender el proceso de formación de la precipitación en dicho territorio.

En Colombia, el régimen de lluvias está fuertemente determinado por las interacciones entre el océano, la atmósfera y el relieve. Gan cantidad de la humedad que recibe el país proviene

del Océano Atlántico y del reciclaje terrestre de agua, siendo las cuencas del Orinoco y Amazonas importantes proveedoras regionales de humedad atmosférica (Hoyos, et al., 2018). Además, la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), los vientos alisios y el sistema montañoso de los Andes que atraviesa el territorio colombiano influyen la distribución de la precipitación en el país.

Así, por ejemplo, en el centro y el oeste de Colombia, se presenta un ciclo bimodal anual de precipitación con marcadas temporadas de altas lluvias (abril-mayo y septiembre-noviembre) y bajas precipitaciones (diciembre-febrero y junio-agosto), impulsadas principalmente por el doble paso de la ZCIT. En la costa norte del Caribe y hacia el flanco pacífico del istmo meridional, las precipitaciones presentan un ciclo anual unimodal (mayo-octubre), lo que refleja la posición más septentrional de la ZCIT sobre el continente y el Pacífico ecuatorial oriental, respectivamente. Hacia los Andes orientales, se presenta un único pico anual de lluvias (junio-agosto), como resultado del encuentro de los vientos alisios que vienen cargados de humedad del Amazonas con los Andes (Poveda, et al., 2011).

En la Sabana de Bogotá, el régimen de lluvias depende de la migración de la ZCIT influenciada por los vientos alisios y del transporte de masas de aire húmedo desde zonas como el Valle del Magdalena. Al respecto, Guhl (2012) señala que la distribución de las precipitaciones en dicha región está influenciada por la topografía. Es así como, en las montañas que encierran la Sabana de Bogotá se presentan precipitaciones mayores que en las partes planas, al ofrecer una amplia superficie de evaporación que posibilita la formación de nubes, así como de corrientes de convección, las cuales, al chocar con las vertientes de las montañas se descargan y generan lo que se conoce como “lluvias orográficas” (Guhl, 2012).

El autor, además afirma que la Sabana actúa como un espacio de calentamiento que restablece la atmósfera con humedad, a través de lo que se conoce como “efecto sartén”, un fenómeno que se hace más fuerte por la presencia de los vientos ascendentes y periféricos de la Sabana que vienen cargados de humedad desde el valle del Magdalena y el piedemonte de los Llanos Orientales (Guhl, 2012).

Estos procesos de convección influenciados por los vientos alisios, alimentan los principales componentes del sistema de abastecimiento hídrico de Bogotá y la región circundante: los páramos de Chingaza y Sumapaz. El páramo de Chingaza se localiza a 40 km al oriente de Bogotá D.C. y aporta cerca del 80 % del agua que se consume en la ciudad. Este valioso ecosistema, hace parte del subsistema Andino Atlántico, que recibe una gran cantidad de humedad del Océano Atlántico, la Orinoquía y la Amazonia, la cual es transformada en precipitación orográfica (Vargas y Pedraza, 2004), que es indispensable para la regulación del caudal de la parte de la cuenca que se aprovecha para el abastecimiento hídrico de Bogotá, localizada en las cabeceras de los ríos Chuza, La Playa y Frío, afluentes del río Guatiquía y del río Blanco.

Lo anterior, fue analizado por Rondón, et al., (1996), quienes concluyeron que la formación del 60% de las lluvias orográficas anuales en el páramo de Chingaza, dependen del transporte de agua proveniente de la Amazonia, lo que permite afirmar que la alteración de las dinámicas hidrológicas descritas en la sección II, sumadas a los efectos del cambio climático como el aumento de la temperatura en el páramo y los impactos que esto conlleva sobre su capacidad de regulación hídrica, pone el peligro el abastecimiento de agua para los habitantes de la capital del país y los municipios aledaños.

En lo que se refiere al cambio climático, según la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático, (TCNCC), Bogotá D.C. se configura como una ciudad vulnerable, al presentar muy alta sensibilidad y baja capacidad adaptativa, la cual está dada principalmente por una débil facultad para garantizar la seguridad alimentaria y la oferta hídrica (IDEAM, et al., 2017).

Lo anterior, según se indica en el reciente Plan de Acción Climática (PAC) formulado por la ciudad, continúa presentándose, a pesar de los esfuerzos del Distrito Capital para incorporar la gestión del cambio climático en los instrumentos de planificación y gestión ambiental, territorial, del riesgo de desastres, así como en proyectos, normas y políticas de desarrollo territorial (Secretaría Distrital de Ambiente, 2020).

En el citado PAC, se indica que el análisis de escenarios de precipitación y temperatura en Bogotá D.C. en el periodo 2011-2040, muestra que, con referencia al registro anual de lluvias entre 1975 y 2005, se prevé que hacia el occidente de la ciudad aumentará el porcentaje de lluvias hasta en un 35 % para 2040, mientras que, en los Cerros Orientales y la zona sur de la localidad de Sumapaz, en la que se localiza el páramo que lleva el mismo nombre, se proyecta un importante descenso de hasta 15 % (Secretaría Distrital de Ambiente, 2020).

A nivel regional, el análisis de los escenarios climáticos en el periodo 2040-2070 reportados en el Plan Regional Integral de Cambio Climático para Bogotá Cundinamarca (PRICC), indica que el cambio climático en la región puede generar la disminución de la precipitación en cerca del 10% y 20% en la zona occidental del departamento, particularmente hacia el valle del Magdalena y en algunas zonas del norte de la Sabana y el oriente, incluidos sectores del páramo de Chingaza (IDEAM, et al., 2014).

En línea con lo anterior, el análisis de extremos climáticos muestra un aumento de las lluvias extremas hacia el centro de Cundinamarca del orden de 6% a 9% por década, lo que significa que en 50 años se pueden tener entre 30% a 40% más de precipitaciones extremas en comparación a lo actual. Para el oriente del Departamento, se pueden presentar disminuciones en las precipitaciones extremas del orden de -4% a -10% por década, lo que significa que en 50 años se pueden tener entre -20% a -50% menos de precipitaciones extremas en comparación a lo actual (IDEAM, et al., 2014).

Estas proyecciones pueden tener implicaciones en dos escenarios; por una parte, en mayores riesgos por inundaciones e impactos agroclimáticos y, por otra, en la disminución de las áreas de

recarga de los ríos y quebradas como las que se mencionaron que nacen en el páramo de Chingaza y alimentan los embalses ubicados en esta área del Departamento (IDEAM, et al., 2014).

En lo que respecta a las condiciones de la región Bogotá Cundinamarca para garantizar el suministro de agua, su localización geográfica la hace altamente dependiente de la variación en los patrones climáticos de temperatura y precipitación, puesto que, la ciudad y gran parte de los municipios de Cundinamarca, se ubican muy cerca del nacimiento de los principales ríos que alimentan sus acueductos, lo que lleva a que, según el PRICC “el estudio de su vulnerabilidad ante los cambios en el clima, necesariamente parta del análisis de los servicios ecosistémicos de disponibilidad y regulación hídrica, y cómo estas dinámicas condicionan la sensibilidad, la exposición y la capacidad adaptativa de la región” (IDEAM, et al., 2014a, p.7).

Los resultados del citado estudio indican que, bajo escenarios de cambio climático, para 2050 los cambios en la disponibilidad hídrica de Bogotá–Cundinamarca se reflejarán en mayor vulnerabilidad a lo largo de la Sabana de Bogotá, en municipios como: Guachetá, Fúquene, Tausa, Facatativá, Subachoque, Cáqueza y Fómeque, así como en las zonas que alimentan los embalses de Chivor y Guavio. Sin embargo, aún se requieren análisis más detallados sobre la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico de Bogotá y la región circundante, los cuales deben integrar otros factores que intensifican los cambios hidroclimáticos, como la deforestación (IDEAM, et al., 2014a).

De esta forma, el cambio climático representa un desafío para la gestión de los recursos hídricos, ya que le añade el factor de incertidumbre. En este contexto, una mayor capacidad para pronosticar la variación en los caudales de las fuentes hídricas de las cuales se abastece la región, integrando variables hasta ahora poco analizadas, como los efectos de la deforestación y la sabanización de la Amazonia en la cantidad de precipitación que es transportada por los ríos voladores hacia regiones de los Andes Tropicales del Norte, la Cuenca del Río Magdalena y la Cuenca del Orinoco, puede contribuir a mejorar significativamente la gestión de los recursos hídricos y su capacidad para hacer frente a los efectos del cambio climático.

Otros análisis más integrales sobre este asunto se presentan en el estudio de Diazgranados, et al., (2021), quienes analizaron los efectos del cambio climático en la capacidad de los páramos para la prestación de servicios ecosistémicos. Los resultados indican que, producto del cambio climático, se espera que las caídas en los patrones de precipitación y la pérdida de glaciares afecten significativamente la disponibilidad de agua en este tipo de ecosistemas; sin embargo, estimar la escala y la intensidad de los impactos, continúa siendo un tema complejo, en cuyo análisis se deben considerar las características territoriales específicas. Lo anterior, está asociado con la pérdida del espacio ambiental para que una especie proporcione un servicio ecosistémico, lo que resulta en una pérdida neta de individuos que proporcionan ese servicio ecosistémico en particular.

La situación descrita, fue reconocida en un reciente informe de la Contraloría de Bogotá sobre el presente y futuro del agua para Bogotá D.C., en el que se señala que como consecuencia del cambio climático se prevé una reducción del 5,5% del Caudal Confiante Continuo de los embalses (Contraloría de Bogotá, 2020) que son alimentados por los sistemas de abastecimiento descritos, hecho que sumado al deterioro en cantidad y calidad de las fuentes hídricas, así como la deforestación de importantes zonas de regulación hídrica, pone en riesgo el futuro de la cantidad de agua disponible para su captación, almacenamiento y distribución.

En este contexto, una de las zonas de regulación hídrica que ha sido poco reconocida como estratégica para garantizar la disponibilidad de agua de Bogotá D.C. y los municipios circundantes es la región amazónica, ya que al por su aparentemente lejanía de la ciudad se ve como un espacio marginal al centro del país, que presta unos servicios ecosistémicos locales y poco se ha analizado sobre su influencia en la regulación hídrica en dicho territorio, que como se ha explicado a lo largo de este artículo, reviste de gran importancia en el transporte de humedad a través de los ríos voladores para la formación de precipitaciones en la región y, por tanto, en la recarga de las fuentes hídricas de las que depende su abastecimiento de agua.

De lo anterior, se concluye que, existen fuertes relaciones entre los ríos voladores de la Amazonia y la regulación hídrica en los principales sistemas de abastecimiento de agua de Bogotá D.C. y la región circundante. Si la deforestación en la Amazonia continúa, tiene el potencial de disminuir las precipitaciones que llegan a los Andes, la cuenca del Orinoco y la cuenca del Magdalena y, por tanto, en la capacidad de las fuentes hídricas para la recarga de agua, con los consecuentes impactos sobre el bienestar y la calidad de vida de los habitantes de la capital del país y los municipios aledaños.

Para avanzar en la comprensión sistémica y holística de dichas dinámicas, es necesario desarrollar análisis de series de tiempo de mínimo 30 años de los niveles de los caudales de los ríos y embalses que abastecen a Bogotá D.C. y la región circundante, con las tasas de deforestación de la Amazonia y las proyecciones de los escenarios climáticos, que permitan determinar las relaciones entre dichas variables y su influencia en la seguridad hídrica de los habitantes de Bogotá D.C. y la región circundante.

Un aspecto fundamental que resulta de interés para integrar en dicho análisis es la propuesta que hace Guhl (2012) sobre la Región Hídrica de Bogotá (RHB), fundamentada en la Gestión Integrada del Agua y el Territorio (GIAT), que reconoce la importancia de organizar el territorio y su gobernanza en función del agua.

La GIAT va más allá de la concepción limitada de la gestión de los recursos hídricos que tradicionalmente ha primado en el país, en la que el territorio de intervención se reduce principalmente a los límites municipales, y no se tienen en cuenta las interdependencias espaciales, en particular el carácter regional

del ciclo hidrológico y las dinámicas entre la orografía y los ecosistemas indispensables para el mantenimiento y la regulación del agua, las cuales tienen, en su mayoría, una extensión supramunicipal (Guhl, 2012) y para el caso que se analiza en este artículo supra regional.

Para alcanzar este enfoque, Guhl (2012), propone el concepto de Región Hídrica, cuyos límites resultan de la integración de los siguientes criterios que se consideran esenciales para el ordenamiento y planificación del territorio en función del agua: 1. *el hidrográfico*, como estructurante y que debe abarcar tanto el sistema hídrico natural como el construido, es decir los embalses, trasvases de aguas que provienen de otras cuencas, canales, conducciones, entre otros; 2. *el político-administrativo*, que determina el espacio para la gestión del Estado con relación al territorio y al agua, desde las competencias municipales y 3. *el ecológico*, que abarca los ecosistemas de cuya conservación y buen funcionamiento depende la prestación de los servicios ambientales que garantizan la disponibilidad de agua suficiente y de buena calidad para satisfacer las necesidades sociales y naturales de la región.

Es así como, en la integración de los criterios 1 y 3, se sugiere considerar los servicios ecosistémicos que el bosque amazónico presta para el reciclaje de la humedad y su transporte hacia Bogotá D.C. y la región circundante a través de los ríos voladores, como fuente fundamental para la formación de precipitaciones y por tanto, para la regulación del ciclo del agua y el abastecimiento hídrico en la RHB, la cual, de acuerdo con la propuesta de Guhl (2012), no solo abarca la cuenca del Río Bogotá, sino que incluye los límites de la jurisdicción de 53 municipios de la cuenca y el Distrito Capital, con una extensión de 9.582 Km², abarcando los páramos de Sumapaz y Chingaza (Guhl, 2012).

CONCLUSIONES: ¿QUÉ HACER? HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

El rol activo que juega la Amazonia en la regulación climática e hidrológica global y regional, puede verse alterado por los motores del cambio ambiental descritos en este artículo. Los modelos que analizan las tasas de deforestación y las proyecciones climáticas indican que a 2100 la Amazonia será una región más seca, lo cual acelerará el proceso de sabanización. Dado que el bosque amazónico es un sistema complejo, la combinación de estos factores puede llevar a que la región llegue a un punto de no retorno, con los consecuentes impactos sobre la prestación de servicios ecosistémicos.

En lo que se refiere al transporte de humedad atmosférica que viaja desde la Amazonia hacia otras regiones, el proceso se ha estudiado a partir de una variedad de métodos y modelos matemáticos que integran diferentes variables; sin embargo, a pesar de que cada vez los estudios son más robustos y complejos, no se han analizado los efectos agregados de la deforestación y el cambio climático en la Amazonia en regiones ubicadas a grandes

distancias como Bogotá D.C. y los municipios circundantes, un territorio en el que habitan más de 12 millones de personas y que tiene la característica de ser altamente vulnerable a los efectos del cambio climático, en especial sobre la dimensión de seguridad hídrica.

En este contexto, resulta indispensable avanzar en la investigación científica que permita comprender las teleconexiones entre el reciclaje de agua en la Amazonia y el ciclo hidrológico de la capital del país y la región circundante. En este análisis, es fundamental considerar aspectos como la variabilidad climática en múltiples escalas de tiempo, por ejemplo, en las diferentes fases de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO); los procesos atmosféricos y físicos en los páramos de Sumapaz y Chingaza; el nivel de los ríos y los embalses que almacenan el agua para su posterior distribución; los efectos locales del cambio climático y aspectos álgidos de gobernanza y gobernabilidad de las instituciones y demás actores sociales que interactúan en la gestión del agua.

Una política integral para la gestión del agua y el territorio en Bogotá D.C. y la región circundante, debe considerar la acción coordinada entre los niveles nacional, regional, municipal y Distrital. En el orden regional, los límites político-administrativos, en los que comúnmente se centran las acciones de las autoridades ambientales y demás actores encargados de dicha gestión, superan las teleconexiones entre el ciclo hidrológico de los páramos de Sumapaz y Chingaza y la Amazonia descritas en este documento. Bajo este escenario, los análisis futuros sobre el abastecimiento de agua en Bogotá D.C., deben integrar variables complejas, como las dinámicas de los ríos voladores de la Amazonia y, a partir de ello, diseñar estrategias innovadoras que propendan por mantener la homeostasis para la formación de precipitaciones, que es regulada por el bosque amazónico.

A nivel local, resulta crítico el análisis de las propiedades funcionales de los páramos de los cuales depende el abastecimiento de agua en Bogotá D.C. y los municipios aledaños; esto abarca el monitoreo de su productividad en términos hidrológicos, incluyendo los efectos de la deforestación y el cambio climático en la Amazonia para la formación de precipitaciones. Para tal efecto, la recomendación de Diazgranados, et al., 2021, de la necesidad de instalar estaciones de monitoreo hidroclimáticas permanentes y de acceso al público en general, que den muestra de cambios pequeños que ocurran antes de que un cambio más grande sea inminente, puede aportar al diseño y ajuste de las estrategias y los planes de gestión para hacer frente a dichos impactos.

En este contexto, es importante señalar que los impactos sobre los servicios ecosistémicos pueden modificar la dinámica social y económica de las comunidades locales y afectar sus medios de vida, por lo tanto, se hace un llamado a los gobiernos para que actúen de manera coordinada y comprendan que los Sistemas de la Tierra están interconectados y que una intervención local puede tener efectos drásticos en aspectos fundamentales para el bienestar y la calidad de vida, como la

disponibilidad hídrica, en regiones localizadas a gran distancia de donde estos ocurren.

De otro lado, se considera oportuno migrar hacia una aproximación de gestión “*pull-push*”, es decir, buscar soluciones para la gestión del recurso hídrico, tanto en su entrada (región amazónica) como en su salida (disponibilidad hídrica de Bogotá y la región circundante), de tal manera que se favorezca la acumulación del recurso en las zonas de recarga para la ciudad. Lo anterior, es un asunto complejo y difícil, si se asume que es muy probable que, si no se toman acciones drásticas, la Amazonia llegará a un punto de no retorno.

Enfrentar este reto, requiere que las acciones realizadas localmente para la reducción de la deforestación y conservación de los bosques, se articulen con todos los países amazónicos, a través de programas internacionales/transnacionales; puesto que, implementar soluciones aisladas, siguiendo los límites político-administrativos de las naciones, no llevará a las transformaciones necesarias para garantizar que el bosque amazónico continúe prestando los servicios ecosistémicos de alcance regional y global que se han descrito en este documento.

En este camino, el fortalecimiento de la gobernanza de los bosques; romper las estructuras de poder entre los actores responsables de los cambios en el uso del suelo; las acciones locales de restauración de cuencas y zonas degradadas, bajo el enfoque de tratar de replicar las funciones del bosque, puesto que la reforestación nunca reemplazará el bosque nativo; la creación de un escudo amazónico en el piedemonte andino-amazónico para la conservación de zonas boscosas colindantes con la región Andina, son algunas de las alternativas que requieren de un trabajo conjunto y colectivo.

Para finalizar, se reitera la necesidad de profundizar en la investigación sobre las interconexiones no lineales entre la Amazonia, la Orinoquía y los Andes, con el fin de comprender holísticamente el impacto de la alternación del bosque amazónico en la integridad ecológica, biológica y climática de los páramos de los cuales depende el abastecimiento hídrico de Bogotá D.C. y la región circundante. El estado de salud del bosque amazónico para la prestación de servicios ecosistémicos de alcance regional y global está en riesgo por la deforestación, que se retroalimenta con el cambio climático, en una especie de círculo vicioso, y, por lo tanto, su conservación debe ser el centro de las estrategias para avanzar hacia la sostenibilidad territorial.

La bibliografía especializada revisada en esta investigación es un aporte importante al estado del arte sobre el estudio de las dinámicas de los ríos voladores de la Amazonia y su influencia en la disponibilidad de agua en otras regiones y puede servir de punto de partida para el planteamiento de hipótesis de investigación, que aporten cada vez más al conocimiento de las teleconexiones de los Sistemas de la Tierra, como fundamento para la toma de decisiones para evitar la sabanización de la Amazonia y con ello la pérdida de los valiosos e irremplazables servicios ambientales que presta el bosque tropical.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente al Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), por su colaboración para la elaboración de esta investigación, así como al profesor y amigo Ernesto Guhl Nanetti, por sus valiosas enseñanzas y aportes, que enriquecieron las reflexiones contenidas en este artículo.

REFERENCIAS

- Alvez, L., Marengo, J., Fu, R., & Bombardi, R. (2017). Sensitivity of Amazon Regional Climate to Deforestation. *American Journal of Climate Change*, 6(1), 75-98. doi:10.4236/ajcc.2017.61005
- AMAZALERT. (2014). Impactos del clima y el uso del uso en los bosques tropicales de la Amazonia. Resumen de los resultados de AMAZALERT. Brasil: AMAZALERT, A research project on impacts of climate change and land use change in Amazonia. Obtenido de <http://www.eu-amazalert.org/media/default.aspx/emma/org/10857486/AMAZALERT+Factsheet%2c+N%3bamer+7+Impactos+del+clima+y+el+uso+del+uso+en+los+bosques+tropicales+de+la+Amazona%3bada.pdf>
- Ampuero, A., Strikis, N., Apaestegui, J., Vuille, M., Novello, F., Espinoza, C., . . . Sifeddine, A. (2020). The Forest Effects on the Isotopic Composition of Rainfall in the Northwestern Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(4), 1-16. doi:<https://doi.org/10.1029/2019JD031445>
- Betts, R., Cox, P., Collins, M., Harris, P., Huntingford, C., & Jones, P. (2004). The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global change warming. *Theoretical and Applied Climatology*, 78, 157-175. doi:<https://doi.org/10.1007/s00704-004-0050-y>
- Boers, N., Marwan, N., Barbosa, H., & Kurths, J. (2017). A deforestation-induced tipping point for the South American monsoon system. *Scientific Reports*, 7(41489), 1-9. doi:[10.1038/srep41489](https://doi.org/10.1038/srep41489).
- Bonan, G. (2008). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320(13), 1444-1449. doi:[10.1126/science.1155121](https://doi.org/10.1126/science.1155121)
- Botero, R. (2020). Disminuye la velocidad de la deforestación, pero se agota la Reserva Forestal de la Amazonia. *Colombia Amazónica* (12), 61-78. Obtenido de https://sinchi.org.co/files/publicaciones/revista/pdf/12/1%20Hacia%20una%20Amazonia%20sostenible_ideas%20para%20una%20pol%C3%ADtica%20p%C3%ABblica.pdf
- Botero, R., & Rojas, A. (2018). Transformación de la Amazonia. Repercusiones del efecto sinérgico entre políticas erráticas e ingobernabilidad. *Colombia Amazónica*(11), 9-24. Obtenido de <https://sinchi.org.co/files/publicaciones/revista/pdf/11/1%20transformacion%20de%20la%20amazonia%20repercusiones%20del%20efecto%20sinergico%20entre%20polticas%20errticas%20e%20ingobernabilidad.pdf>
- Builes-Jaramillo, A., Marwan, N., Poveda, G., & Kurths, J. (2018). Non-linear interactions between the Amazon River basin and the Tropical North Atlantic at interannual timescales. *Climate Dynamics*, 50(7), 2951-2969. doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-017-3785-8>
- Carmona, A., Poveda, G., Sivapalan, M., Vallejo-Bernal, S., & Bustamante, E. (2016). A scaling approach to Budyko's framework and the complementary relationship of evapotranspiration in humid environments: Case study of the Amazon River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), 589-603. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-20-589-2016>
- Cavalcanti, I., Marengo, J., Alves, L., & Costa, D. (2016). On the opposite relation between extreme precipitation over west Amazon and southeastern Brazil: observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 37(9), 3606-3618. doi:<https://doi.org/10.1002/joc.4942>
- Contraloría de Bogotá. (2020). Presente y futuro del agua para Bogotá D.C. Bogotá: Contraloría de Bogotá. Dirección de estudios de economía y política pública. Obtenido de <http://www.contraloria-bogota.gov.co/sites/default/files/Contenido/Informes/Estructurales/Ambiente/Informe%20presente%20y%20futuro%20del%20agua%2C%20ajustes%20acueducto.pdf>
- Correa, C., Etter, A., Díaz-Timoté, J., Rodríguez, S., Ramírez, W., & Corzo, G. (2020). Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecological Indicators*, 117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106630>
- Cox, P., Betts, R., Harris, P., Huntingford, C., & Jones, C. (2004). Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, 78, 137-156. doi:<https://doi.org/10.1007/s00704-004-0049-4>
- Cox, P., Betts, R., Jones, C., Spall, S., & Totterdell, I. (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 184-187. doi:<https://doi.org/10.1038/35041539>
- D'Almeida, C., Vörösmarty, C., Hurtt, G., Marengo, J., Dingman, L., & Keim, B. (2007). The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. *International Journal of Climatology*, 27(5), 633-647. doi:<https://doi.org/10.1002/joc.1475>
- da Silva, R., Weth, D., & Avissar, R. (2008). Regional Impacts of Future Land-Cover Changes on the Amazon Basin Wet-Season Climate. *Journal of Climate*, 21(6), 1153-1170. doi:<https://doi.org/10.1175/2007JCLI1304.1>
- IDEAM, PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguvio, Instituto Alexander von Humboldt, Parques Nacionales Naturales de Colombia, MADS, DNP. (2014). El cambio climático en la región Bogotá Cundinamarca y sus implicaciones para el desarrollo regional 2011-2100. Bogotá: Plan Regional Integral de Cambio Climático para Bogotá Cundinamarca (PRICC). Obtenido de Plan Regional Integral de Cambio Climático: https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/19770/ImplicacionesCambioClimaticoBogota%28IDEAM_2014%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Debortoli, N., Dubreuil, V., Funatsu, B., Delahaye, F., Henke de Oliveira, C., Rodrigues-Filho, S., . . . Fetter, R. (2015). Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971-2010).

- Climate Change, 132, 251–264. doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-015-1415-1>
- Debortoli, N., Dubreuil, V., Hirota, M., Rodrigues, S., Lindoso, D., & Nabucet, J. (2016). Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. *International Journal of Climatology*, 37(6), 2889–2900. doi:<https://doi.org/10.1002/joc.4886>
- Diazgranados, M., Rodríguez, P., Tovar, C., Galvis, M., & Suzette, F. (2021). Ecosystem services show variable responses to future climate conditions in the Colombian Páramos. *Peerj*, 1–33. doi:[10.7717/peerj.11370](https://doi.org/10.7717/peerj.11370)
- Dubreuil, V., Arvor, D., Funatsu, B., Nédélec, V., & Mello- Théry, N. (2021). Climate Change in the Amazon: A Multi-scalar Approach. En D. Mercier, *Spatial Impacts of Climate Change*. (págs. 243–263). ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. Obtenido de <http://www.iste.co.uk/book.php?id=1731>
- Faus da Silva, M. A. (2008). Forest and Rainfall Interactions in the Amazon Basin. *Thematic Contribution*, 3(1), 46–53. Obtenido de https://www.ige.unicamp.br/terrae/V3/PDF/N3/T_A5_2.pdf
- Gatti, L., Basso, L., Miller, J., Gloor, M., Gatti, L., Cassol, H., . . . Neves, R. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*(595), 388–393. doi:<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Guhl Nannetti, E., & Cifuentes, A. (2020). Hacia una Amazonia sostenible: ideas para una política pública. *Colombia Amazónica*, 12, 13–37. doi:https://sinchi.org.co/files/publicaciones/revista/pdf/12/1%20Hacia%20una%20Amazonia%20sostenible_ideas%20para%20una%20pol%3ADtica%20p%3BABlica.pdf
- Guhl, E. (2012). Nuestra agua: ¿De dónde viene y para dónde va? Bogotá: Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá.
- Haddad, N., Brudvig, L., Clobert, J., Davies, K., Gonzalez, A., Holt, R., . . . Townshend, J. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth’s ecosystems. *American Association for the Advancement of Science*, 1(2), 1–9. doi:[10.1126/sciadv.1500052](https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052)
- Hoyos, I., Dominguez, F., Cañon-Barriga, J., Martínez, J., Nieto, R., Gimeno, L., & Dirmeyer, P. (2018). Moisture origin and transport processes in Colombia, northern South America. *Climate Dynamics* (50), 971–990. doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-017-3653-6>
- IDEAM, PNUD, Alcaldía de Bogotá Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguvio, Instituto Alexander von Humboldt, Parques Nacionales Naturales de Colombia, MADS, DNP. (2014a). Vulnerabilidad de la región capital a los efectos del cambio climático. Opciones de adaptación. Bogotá: Plan Regional Integral de Cambio Climático para Bogotá. Obtenido de http://www.ideam.gov.co/documents/40860/609198/Policy+paper_05_Vulnerabilidad+de+la+Regi%C3%B3n+Capital.pdf/4b603362-a58b-4a8b-898d-4df500b2536f?version=1.0
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2017). Análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático en Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Obtenido de IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM.: <http://www.cambioclimatico.gov.co/resultados>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. Connors, C. Péan, S. Berger, . . . B. Zhou, Edits.) Cambridge University Press. In Press.
- Kruijt, B., Frieden, D., Dolman, H., Meir, P., Aguiar, A.-P., Kok, K., & Bird, N. (2014). AMAZALERT Final project summary for policy. Reino Unido: AMAZALERT project. Obtenido de <http://www.eu-amazalert.org/media/default.aspx/emma/org/10856284/D6.7+AMAZALERT+summary+for+policy+makers.pdf>
- Lovejoy, T., & Nobre, C. (2019). Amazon tipping point: Last chance for action. *Science advances*, 5(12), 1. doi:[10.1126/sciadv.aba2949](https://doi.org/10.1126/sciadv.aba2949)
- Lovelock, J. (1983). Gaia as Seen Through the Atmosphere. En P. Westbroek, & E. de Jong, *Biomining and Biological Metal Accumulation* (págs. 15–25). Springer, Dordrecht. doi:https://doi.org/10.1007/978-94-009-7944-4_2
- Makarieva, A., & Gorshkov, V. (2007). Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1013–1033. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-11-1013-2007>
- Mallick, K., Trebs, I., Boegh, E., Giustarini, L., Schlerf, M., Drewry, D., . . . Munger, J. (2016). Canopy-scale biophysical controls of transpiration and evaporation in the Amazon Basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 20(10), 4237–4264. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-20-4237-2016>
- Marengo, J. (2004). Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget. *Climate Dynamics*, 24(1), 11–22. doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-004-0461-6>
- Marengo, A., Nobre, C., Sampaio, G., Salazar, F., & Borma, S. (2011). Climate change in the Amazon Basin: Tippingpoints, changes in extremes, and impacts on natural and human systems. En M. Bush, R. Flenley, & W. Gosling, *Tropical Rainforest Responses to Climatic Change* (págs. 259–283). Berlín: Springer-Verlag .
- Marengo, J. (2009). Long-term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920s. *Hydrological Processes*, 23(22), 3236–3244. doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.7396>
- Marengo, J., Douglas, M., & Silva, P. (2002). The South American low-level jet east of the Andes during the 1999 LBA-TRMM and LBA-WET AMC campaign. *Journal of Geophysical Research*, 107(D20), LBA 47-1–LBA 47-11. doi:<https://doi.org/10.1029/2001JD001188>
- Marengo, J., Fisch, G., Alves, L., Sousa, N., Fu, R., & Zhuang, Y. (2017). Meteorological context of the onset and end of the rainy season in Central Amazonia during the GoAmazon2014/5. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(12), 7671–7681. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-17-7671-2017>
- Martínez, A., & Dominguez, F. (2014). Sources of Atmospheric Moisture for the La Plata River Basin. *Journal of Climate*, 27(17), 6737–6753. doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00022.1>
- McClain, M., & Naiman, R. (2008). Andean Influences on the Biogeochemistry and Ecology of the Amazon River. *BioScience*, 58(4), 325–338. doi:<https://doi.org/10.1641/B580408>

- Molina, R., Salazar, J., Martínez, A., Villegas, J., & Arias, P. (2019). Forest-Induced Exponential Growth of Precipitation Along Climatological Wind Streamlines Over the Amazon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(5), 2589-2599. doi:<https://doi.org/10.1029/2018JD029534>
- Nepstad, D., Stickler, C., Soares-Filho, B., & Merry, F. (2008). Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. *Philosophical Transactions of The Royal Society Publishing*(363), 1737-1746. doi:<https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0036>
- Nobre, C., Obregón, G., Marengo, J., Fu, R., & Poveda, G. (2009). Characteristics of Amazonian climate: main features. *Amazonia and Global Change* (Vol. 186). (M. Keller, m. Bustamante, J. Gash, & P. Silva Dias, Edits.) *Geophys Mon Ser*.
- Nobre, C., Sampaio, G., Borma, L., Castilla-Rubio, J., Silva José, & Cardoso, M. (2016). Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences or the Uniter States of America*, 113(39), 10759-10768. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>
- Nobre, A. (29 de Agosto de 2017). Qué son los "ríos voladores" de Sudamérica que llevan por aire tanta agua como el Amazonas. (A. Martins, Entrevistador) *BBC Mundo*. Recuperado el 5 de Octubre de 2021, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-41038097>
- Otavo, S., & Murcia, U. (2018). La Amazonia se quema: detección de áreas con mayor ocurrencia de incendios de vegetación como estrategia para la prevención y control. *Colombia Amazónica*(11), 59-71. Obtenido de <https://www.sinchi.org.co/files/publicaciones/revista/pdf/11/3%20la%20amazonia%20se%20quem%20de%20de%20reas%20con%20mayor%20ocurrencia%20de%20incendios%20de%20vegetacin%20como%20estrategia%20para%20la%20prevencin%20y%20control.pdf>
- Poveda, G., Álvarez, D., & Rueda, Ó. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dydamics*, 36, 2233-2249. doi:[10.1007/s00382-010-0931-y](https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y)
- Poveda, G. (2011). El papel de la Amazonia en el clima global y continental : impactos del cambio climático y la deforestación. Leticia: Universidad Nacional de Colombia. Vicerrectoria de Sede. Dirección Académica [Leticia], Instituto Amazónico de Investigaciones (IMANI).
- Poveda, G., Jaramillo, L., & Vallejo, L. (2013). Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. *Water Resources Research*, 50(1), 98-118. doi:<https://doi.org/10.1002/2013WR014087>
- Raup, C., & Dias, P. (2004). Effects of nonlinear processes on the inter-hemispheric energy propagation forced by tropical heat sources. *Revista Brasileira de Meteorología*, 19(2), 177-188.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F., Lambin, E., . . . Schellnhuber, H. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Nature*, 461(24), 472-475.
- Rondón, D., Gonazález, L., & Rodríguez, C. (1996). *Ecología de dos sistemas acuáticos de Páramo*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Álvarez Lleras.
- Ruiz-Vásquez, M., Arias, P., Martínez, A., & Espinoza, J. C. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*, 54, 4169-4180. doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M., & Satyamurty, P. (2007). Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, 34(17), 1-7. doi:<https://doi.org/10.1029/2007GL030612>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2020). Plan de Acción Climática de Bogotá D.C. 2020-2050. Obtenido de Secretaría Distrital de Ambiente: <https://ambientebogota.gov.co/es/plan-de-accion-climatica-pac>
- Soares-Filho, B., Nepstad, D., Curran, L., Cerqueira, G., Garcia, R., Azevedo, C., . . . Schlesinger, P. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 23, 520-523. doi:<https://doi.org/10.1038/nature04389>
- Spracklen, D., & García-Carreras, L. (2015). The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophysical Research Letters*, 42(11), 9546-9552. doi:<https://doi.org/10.1002/2015GL066063>
- Staal, A., Tuinenburg, O., Bosmans, J., Holmgren, M., van Nes, E., Scheffer, M., . . . Dekker, S. (2018). Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*, 8, 539-543. doi:<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y>
- Vargas, O., & Pedraza, P. (2004). *Parque Nacional Natural Chingaza*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Xavier, L., Becker, M., Cazenave, A., Longuevegne, L., Llovel, W., & Filho, R. (2010). Interannual variability in water storage over 2003-2008 in the Amazon Basin from GRACE space gravimetry, in situ river level and precipitation data. *Remote Sensing of Environment*, 1629-1638. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.02.005>