

Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales  
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Centro Universitario Tonalá  
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

# Agua, ciudad y territorio

COMPILADORES

Yolima Del Carmen Agualimpia Dualiby  
Mario Guadalupe González Pérez  
Francisco Jalomo Aguirre  
Edith Xio Mara García García

# Agua, ciudad y territorio



COMPILADORES

© Yolima Del Carmen Agualimpia Dualiby

© Mario Guadalupe González Pérez

© Francisco Jalomo Aguirre

© Edith Xio Mara García García

PRIMERA EDICIÓN, 2021

D. R. © 2021 Universidad de Guadalajara

Av. Juárez 976

Colonia Centro, CP 44100

Guadalajara, Jalisco, México

ISBN 978-607-98917-9-4

IMAGEN DE PORTADA

© Carlos Enrique Castro Méndez

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Editado en México

# Agua, ciudad y territorio

---

## COMPILADORES

Yolima Del Carmen Agualimpia Dualiby

Mario Guadalupe González Pérez

Francisco Jalomo Aguirre

Edith Xio Mara García García

---



UNIVERSIDAD DE  
GUADALAJARA  
Red Universitaria e Institución Benemérita de Jalisco



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
Patrimonio Cultural y Científico de Bogotá





Dedicado a la Dra. Nohora Avella  
de Benavides (q.e.p.d)



# Contenido

9 Prólogo

## Agua, territorio y naturaleza

- 15 **Capítulo 1.** Hacia el ordenamiento del territorio. El eclecticismo del agua y el suelo: suelos hidroconductores (SHC). Caso microcuenca de la quebrada Barbillas, Colombia / *Yolima Del Carmen Agualimpia Dualiby, Carlos Enrique Castro Méndez*
- 43 **Capítulo 2.** Modelo de desarrollo ambiental desde la cosmogonía del agua. Departamento del Vaupés, Colombia / *Fernando Sánchez Sánchez*
- 67 **Capítulo 3.** Repensando las políticas de desarrollo regional por cuencas hidrológicas de México bajo el concepto de “cuenca social” o “hidrosocial” / *Alicia Torres Rodríguez*
- 83 **Capítulo 4.** Conflictos socioambientales de los pobladores de Agua Caliente en el municipio de Poncitlán, Jalisco, y la violación de sus derechos humanos / *Elvira Medina Alvarado*
- 95 **Capítulo 5.** Determinación de áreas susceptibles a inundación en cuencas urbanas: el microsistema Garabatos, México / *Miriam Ascencio Ibarra, Mario Guadalupe González Pérez, José Andelfo Lizcano Caro, Edith Xio Mara García*
- 117 **Capítulo 6.** Ciudad Región sostenible: la importancia del recurso hídrico para la Sabana de Bogotá / *Jair Preciado Beltrán*



## Gestión del agua para consumo en zonas urbanas

- 133 Capítulo 7.** Avances del proyecto cultural Cátedra del Agua de la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” / *Helmut Espinosa García, Yolima Del Carmen Agualimpia Dualiby, Edier Hernán Bustos Velazco*
- 145 Capítulo 8.** Realidades y retos en la gestión integral del recurso hídrico (GIRH) en Colombia y México / *Yefer Asprilla Lara, Eladio Rey Gutiérrez, Francisco Jalomo Aguirre*

## Agua y salud pública

- 167 Capítulo 9.** Efecto del cambio climático en la distribución espacial de las condiciones ambientales para la malaria en Colombia / *Juan Carlos Alarcón-Hincapié*
- 205 Capítulo 10.** Adsorción de contaminantes emergentes del agua con nanomateriales / *Hasbleidy Palacios Hinestroza, José Alfredo García Alonso, Víctor Hugo Romero Arellano, Florentina Zurita Martínez, Jorge del Real, Belkis Coromoto Sulbarán Rangel*
- 215 Capítulo 11.** Oxidación química y supercrítica como alternativas puntuales de tratamiento de vertimientos urbanos generados en prácticas veterinarias / *Rosalina González Forero, Alejandra Guerrero, Liria Galeano, Paula Cárdenas, Andrea Landínez*
- 227 Capítulo 12.** Remoción de flúor en agua para consumo humano y su relación con la reducción de enfermedades asociadas / *Aída Lucía Fajardo Montiel Rafael González Pérez, Hermes Ulises Ramírez Sánchez, Lourdes Graciela Cabrera Chavarría, Hugo Javier Coss y León Monterde, Mario Enrique García Guadalupe, Héctor Hugo Ulloa Godínez*

# Prólogo

El agua es un elemento único, fundamental y presente en todas las especies vivas que habitan el planeta, lo que la convierte en el soporte de la existencia de flora, fauna y ecosistemas. Por ello, este trabajo busca dar respuesta a diversas interrogantes en torno a dicho líquido en su relación con el territorio, la naturaleza, la gestión, la ciudad y la salud pública, pues los hace confluír y converger, los alimenta y actualmente los expone a retos que en ningún otro estadio de la existencia humana habían ocurrido.

Debido a su importancia, se ha estipulado en diversos documentos internacionales, —como es el caso de la Declaración de los Objetivos del Milenio, ahora Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, el Pacto Internacional de Derechos Civiles y Políticos, la Declaración de Mar del Plata, las Convenciones de Ginebra y sus protocolos, la Convención sobre la Eliminación de Todas las Formas de Discriminación contra la Mujer, e incluso en las constituciones políticas de países como México y Colombia— que el acceso al agua debe ser reconocido como un auténtico derecho humano. Sin embargo, hoy existe la pugna en el contexto internacional entre quienes consideran al agua un recurso y a la vez mercancía, y quienes la enaltescen como un elemento al que todos deberían tener acceso libre.

Por ello, la presente obra aborda dicha dicotomía a través de los resultados de investigaciones y reflexiones de los cuerpos académicos de la Univer-

sidad de Guadalajara referentes a recursos naturales, cambio climático y sustentabilidad, Desarrollo Sustentable en la Utilización, Biomedicina y Salud ambiental, materiales avanzados, ciencias de materiales y agua, medio ambiente y sustentabilidad. De igual manera, incorpora la participación de los grupos de investigación PROGRASP-GAIA y SERVIPÚBLICOS de la Universidad “Francisco José de Caldas”. Todo con la intención de abonar a las discusiones y participar en la generación de conocimiento.

Las tres unidades que componen este trabajo —el agua y su relación con el territorio y la naturaleza, la gestión del agua como recurso urbano, y el agua asociada a la salud pública— son abordadas con una estructura metodológica que permite al lector dilucidar de manera integral los diferentes factores y componentes que, en términos de herramientas e instrumentos, conforman la planeación y planificación para el uso de este recurso en todas las actividades productivas: agua, ciudad y territorio, tres elementos de interés para comprender los fenómenos y afrontar los retos contemporáneos que hoy se viven.

El ser humano nace, crece, se desarrolla y muere en un espacio concreto, donde realiza sus actividades. A ese espacio se le llama *territorio*. Éste es el lugar en el que se mantiene una relación entre “algo” o “alguien” y una porción de ese espacio: la existencia de lo primero le da significado al segundo por medio de su interacción. Por ejemplo: una cuenca hidrográfica y un determinado elemento natural ahí contenido, como es el agua, entran en relación con una o varias ciudades, en algún momento y punto específicos; es decir, el territorio es el contenedor espacial de las interacciones objetivas y relacionales entre “algo” y “alguien”.

Es así que el presente documento expone la relación que mantiene el agua, ese “algo”, en su interacción con ese “alguien”: sociedad, población y ecosistemas, lo que constituye al territorio como crisol que soporta elementos y en el cual se funden. Es aquí donde la relación agua-ciudad-territorio cobra relevancia bajo una reflexión tan simple como decir que sin agua no sería posible desarrollar ninguna actividad económica, social, cultural o natural.

Si se considera que un territorio es la concreción del poder en el espacio, lo que da lugar a decir que éste termina donde la capacidad de ejercer el poder desaparece, es posible entender que la relación que guardan el territorio, el agua y las ciudades no solamente puede ser concreta y continua, sino virtual y discontinua. Esto facilita hablar, en los diversos capítulos de esta obra, no sólo de territorios concretos y específicos, sino también de territorios virtuales, donde el agua puede desplazarse en sus interacciones sociales, económicas, naturales y culturales por medio de intercambios comerciales y a través de flujos migrato-

rios de un territorio a otro, sin que exista entre ambos una continuidad física o geográfica. Esto da lugar a conceptos como el de John Anthony Allan del King's College de Londres al hablar de "agua virtual".

El concepto de territorio, entonces, toma tal flexibilidad que llega a definirse independientemente de las características, escala y tamaño del grupo social que lo controla. De esta manera, podemos hablar del "territorio de un individuo" hasta del "de una corporación", del "de una municipalidad" hasta del "de una región", convirtiendo al agua en protagonista de una multiplicidad de entendimientos para el territorio y las ciudades.

Bajo estas reflexiones, el lector de estas páginas encontrará, en varias de las visiones aquí presentes, fenómenos complejos y aspectos que cuestionan la delimitación del territorio de un municipio *versus* el de una cuenca hidrográfica, así como otros dilemas al respecto, como el de la división político-administrativa y la gestión de dicho elemento.

En cada capítulo, el territorio será definido según el tema abordado. Así, por ejemplo, la necesidad de agua de una ciudad tendría una delimitación específica que debería responder no necesariamente a lo político-administrativo sino a la satisfacción de una necesidad básica, y la delimitación del agua en los ecosistemas y en temas de salud responderá, por tanto, a dilemas para ordenar el territorio, a la atención de riesgos por inundaciones y aspectos de saneamiento, calidad y potabilización.

Considerando lo anterior, se encuentra que las redes de algunos de los servicios que abastecen una ciudad diseñan otros territorios, dinámicos y cambiantes, ajustándolos a sus necesidades, delimitándolos conforme a su función y a su relación, lo que provoca que choquen, se contrapongan, se traslapen y se enfrenten como territorios formales e informales, reales e ideales.

A partir de esto, surgen diversas preguntas: ¿Cómo abordar el proyecto del territorio en su relación con el agua y, a su vez, en su relación con las ciudades para una distribución equitativa? ¿Es la creación de nuevos modelos de gestión hídrica una posible respuesta de delimitación territorial ante el tema agua y ciudad? ¿Delimitan el territorio efectivamente los nuevos y viejos órganos conforme al elemento a administrar? ¿Son adecuados los marcos normativos existentes cuando se habla de agua? ¿Cómo y por qué se han transformado las instituciones encargadas de la gestión del agua frente a la nueva urbanización del mundo, tendiendo a la atención de territorios reales? ¿Debe ser una tendencia inducida y favorable la creación de órganos de administración hídrica o, por el contrario, debe inhibirse su presencia para gestionar el recurso en una ciudad, de conformidad con una delimitación territorial que responda a estos dos elementos?

Es necesario transitar hacia una nueva urbanística del territorio que aporte elementos sólidos para la sostenibilidad como una dialéctica amplia de corresponsabilidad y complementación. Para ello se requiere de una nueva estructura en la que se integren las tendencias y los factores incidentes en los ecosistemas y las condiciones sociales, éticas, culturales, económicas y políticas. Esto solamente puede ser producto del diálogo de intenciones, compromisos y prácticas entre los factores y actores del desarrollo a escala territorial, lo que representa nuevos retos que deben estudiarse para la integración e implementación de instrumentos idóneos de planificación y gestión del agua. Por lo tanto, la delimitación del territorio en su relación con el agua y la ciudad se convierte en un asunto de vital importancia, y estará en función del ciclo hidrológico, del ciclo urbano del agua o de ambos.

El agua no es un elemento inerte. Se mueve en el planeta a través de los distintos territorios, evaporándose, precipitándose, infiltrándose y escurriendo. Tiene su representación más próxima en el territorio físico a través de las cuencas hidrográficas, donde es intervenida para crear un “ciclo urbano del agua” o “ciclo del agua urbana”, como invención antrópica, para canalizarla a las ciudades, captándola, almacenándola, tratándola, distribuyéndola, consumiéndola, desechándola, recolectándola, a veces saneándola y reusándola, y siempre disponiéndola a las cuencas hidrográficas nuevamente, aunque no en la misma calidad y cantidad con la que fue tomada en un principio.

A diferencia de cuando se obtiene específicamente de una cuenca y se conduce a las ciudades o centros de consumo, al extraer el agua de ríos, presas, vasos reguladores, lagos, lagunas o pozos que la atrapan en el subsuelo, ésta es tratada para hacerla agradable y apta para su uso cuando se le retorna al ciclo hidrológico. Lo anterior es uno de los principales retos que hoy impone el modelo de dominación de los elementos naturales: el tratamiento justo y adecuado del agua en pro de los ecosistemas.

El saneamiento de las aguas residuales es un requisito sin el cual los problemas de higiene de las ciudades modernas —por ejemplo, el acceso al agua potable para combatir enfermedades como la cólera, la diarrea e incluso otras que afectan a piel y ojos— serían imposibles de solucionar. Cuando se habla de la planeación urbanística, se deben entender los procesos territoriales estudiados a través de sistemas complejos, condicionando cualquier intervención en las urbes y territorios actuales, como se reflexiona en este libro al hablar de gestión del agua y consumo en zonas urbanas, pues ella sustenta el funcionamiento de una ciudad.



# Agua, territorio y naturaleza





## CAPÍTULO 1

# Hacia el ordenamiento del territorio. El eclecticismo del agua y el suelo: suelos hidroconductores (SHC). Caso microcuenca de la quebrada Barbillas, Colombia

- Yolima Del Carmen Agualimpia Dualiby<sup>1</sup>
- Carlos Enrique Castro Méndez<sup>2</sup>

## 1. Introducción

El ordenamiento territorial (OT) es definido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) como la política que “permite organizar el uso, aprovechamiento y ocupación del territorio sobre la base de las potencialidades y limitaciones, teniendo en cuenta las necesidades de la población y las recomendaciones generadas por todos los instrumentos de planificación y gestión” (Mosley, 2014). Es a partir de esta definición que se pretenden articular los procesos de gestión para la conservación del agua mediante la inclusión del suelo como elemento regulador de los caudales base en las fuentes hídricas, y como elemento del ambiente que propende al sostenimiento de los ecosistemas.

La gestión integral del recurso hídrico, mediante la jerarquización de cuencas hidrográficas, puede realizarse con el propósito común de su sostenibilidad, ya sea para el consumo humano o para el desarrollo de fines productivos.

---

1 Ingeniera civil. Dr. en Ciencias Técnicas con especialidad en Hidráulica. Docente investigadora. Coordinadora del Comité de Investigaciones de la Facultad del Medio Ambiente. Grupo de investigación PROGASP-GAIA. Universidad Distrital “Francisco José De Caldas”. Colombia. yagualimpia@udistrital.edu.co.

2 Doctorando en Geografía. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”. Colombia. cecastro77@gmail.com



Cuando la decisión sobre el uso de las tierras se realiza desde un solo enfoque, genera inconvenientes por la falta de integralidad en la planificación del territorio (Agualimpia y Castro, 2016). Es el caso de la microcuenca de la quebrada Barbillas, ubicada en la cuenca alta del río Magdalena, principal arteria fluvial y en la cual el IDEAM (2014) identificó situaciones de conflicto por la presencia de usos agrícolas no acordes con la aptitud de los suelos. De igual forma, se reporta la deforestación de vertientes junto con acciones negativas que influyen en la disminución del rendimiento hídrico en dos sectores que tienen acceso directo al Magdalena (los ríos Seco y Cabrera), que se caracterizan por el aporte de abundante carga de sedimentos. Adicionalmente, según estudios realizados por la Corporación del Alto Magdalena (CAM) (2017), la presión por el uso del agua de la quebrada Barbillas, acompañada de la variabilidad climática, causa impacto en la oferta de agua en el municipio de La Plata, departamento del Huila, en Colombia.

En este capítulo se pretende identificar los servicios ambientales de los suelos y determinar su papel en la regulación del caudal base de las fuentes hídricas, específicamente para la quebrada Barbillas-cuenca alta del río Magdalena, Colombia. Para esto, es necesario un enfoque ecléctico en los componentes ambientales agua y suelo, articuladores del desarrollo y la sostenibilidad territorial, dado que, en algunos casos, cuando se crean normas relacionadas con el aprovechamiento y la productividad, son independientes de la reglamentación de sistemas del medio ambiente, y pueden llegar a ser contradictorias, lo que atenta contra la sostenibilidad y la sustentabilidad ambiental.

## 2. Antecedentes

La utilización excesiva de agua en algunos espacios agrícolas cercanos a cauces de los ríos impacta fuertemente a los ecosistemas fluviales al reducir el caudal ambiental y minimizar el hábitat de las especies. La ocupación urbana en suelos con aptitud agrícola atenta contra de la seguridad alimentaria, lo cual ocasiona un conflicto rural generado por la oportunidad inmobiliaria.

La investigación realizada con el grupo PROGASP de la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” permitió la conceptualización de suelos que, aunque liberados a la ocupación de usos urbanos, cumplían con el servicio ambiental de transportar agua y nutrientes, advirtiendo que su desaparición impactaba la sostenibilidad de las prácticas agrícolas en las partes bajas. Particularmente se analizaron los usos alternativos con base en la disponibilidad de agua, y se encontró que su oferta disminuiría la siembra de varios cultivos si se quería

conservar el caudal ambiental para los ecosistemas localizados en el sector aguas abajo (Castro y Agualimpia, 2015).

El suelo, como elemento ambiental que almacena y regula los procesos hidrológicos, deja de cumplir su función con el cambio de uso rural a urbano, lo cual obliga a la modificación del paisaje mediante la construcción de diques artificiales que pueden generar desbordamientos en otros sectores; es decir, el paisaje aguas abajo adquiere la función de almacenar y regular las aguas superficiales que dejaron de cumplir los terrenos aguas arriba.

La investigación se realizó con la idea de fortalecer la aplicación de los objetivos para el desarrollo sostenible, y es un aporte a la planificación del territorio en tiempos en que Colombia revisa los planes de ordenamiento territorial (OT) y continúa con el ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas como elementos distanciados uno del otro por la abundante normatividad en estos temas y las profundas contradicciones para organizar el territorio con instrumentos técnicos de menor escala: el suelo es tomado como una variable más que determina un uso poco derivado de la aptitud y que se centra más en la conveniencia política, lo que va en contra de la sostenibilidad del medio ambiente.

De acuerdo con el diagnóstico del índice de uso realizado por el CAM (2017), el aprovechamiento de aguas de la quebrada Barbillas se desarrolla en 36 concesiones que suman un caudal de 141 l/s para consumo humano y agrícola. En el mismo informe se establece que el caudal promedio es de 198 l/s, lo cual equivale a la extracción del 71% de agua constituida legalmente. Esto supone una extracción excesiva que atenta contra el mantenimiento de los ecosistemas naturales. Los conflictos por el uso del agua están relacionados con la destinación de prácticamente todo el caudal para consumo humano en la planta de acueducto de La Plata, Huila.

El consorcio INPRO-HIDROTEC realizó en 1995 el proyecto “Cuenca alta del río Magdalena” con el fin de definir las agendas ambientales para reducir el impacto ambiental en los municipios de esta zona, incluido La Plata, Huila. La fuente de información en la temática de suelos, aplicada en ese entonces, provenía del estudio general del departamento de Huila a la escala general 1:100.000 (IGAC, 1994).

Así como se tienen suelos con alguna vocación de uso en agricultura, las cuencas, por su configuración morfométrica y aporte al sistema hídrico, tienen una vocación de uso para que en ella se establezcan sistemas intensivos agrícolas. En algunas cuencas, los usos inapropiados en la agricultura no sólo permiten que los procesos erosivos produzcan cantidades altas de sedimentos a los ríos,

sino que además la salud y desarrollo de la población, y el agua que se tenga para consumo, pueden reducirse a niveles insostenibles.

En Colombia, la utilización de aguas superficiales para el aprovechamiento humano y los sistemas productivos ha causado la desaparición de varios ríos y quebradas. Los estudios recientes advierten que la quebrada Barbillas podría desaparecer con el tiempo.

### 3. Metodología

El estudio se basó en cinco enfoques que enmarcan el eclecticismo agua-suelo, con datos conseguidos en el sitio de análisis y respaldados por información secundaria.

Se examinó la morfometría de la microcuenca para establecer las condiciones físicas que determinan la hidráulica de cada sector con sus particularidades, y se realizaron las secciones transversales para representar los niveles máximos y actuales. También se revisaron las condiciones climáticas y su incidencia en las posibilidades ambientales. En ellas se tuvieron en cuenta el gradiente de temperatura, su condición de uso y la distribución de especies naturales.

La aptitud de uso de las tierras se utilizó como condicionante de las posibilidades de uso agrícola desde la sostenibilidad del recurso suelo, y en busca del mantenimiento de la base ambiental o sustrato de los ecosistemas. Como complemento a lo anterior, analizaron el movimiento de agua en los suelos, las tendencias y formas de regulación de los caudales.

Todo lo anterior fueron contrastado con el de la disponibilidad de agua, que se orienta hacia el catastro multipropósito de utilidad para dar coherencia a los resultados presentados en este capítulo.

### 4. Marco teórico

La FAO (2002) estudió la parte alta de las cuencas hidrográficas como zona clave en la regulación y provisión de agua para sus sectores bajos, para lo cual fueron considerados los servicios ecosistémicos como orientadores de la gestión integral entre los componentes tierra y agua. Mediante un taller electrónico, recogió el conocimiento de expertos en el mundo sobre la humedad del suelo como reservorio de aguas que es necesario caracterizar y cuantificar a la escala apropiada, según los elementos técnicos y operativos con los que se cuente. Se planteó el control e instauración de prácticas de manejo del suelo, consideradas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2007) para determinación de los usos alternativos sostenibles en Colombia como solución al escurrimiento de aguas.

Las cuencas hidrográficas se reconocen como áreas de planificación del recurso hídrico en que consideran a los humedales como la interfase agua-tierra y cumplen un rol especial en el funcionamiento de los demás ecosistemas (Andrade, 2004). En contraste, la disponibilidad de agua es determinada por la intensidad de la demanda ejercida por la población y por los índices de escurrimiento, para lo cual se toman como ejemplos a la región del Caribe y la zona andina, respectivamente (Castillo, 2006).

Dentro de este contexto, el enfoque ecléctico es indispensable. Cuando se trata la temática de suelos, necesariamente se deben involucrar los factores que los formaron y que se utilizaron para su identificación y delimitación cartográfica; éstos fueron clasificados por Jenny (1941), Dokuchaev (1886) y McBratney *et al.* (2003). El primero es el clima, que muestra el rango de temperatura y la condición de humedad, cuya distribución en un relieve o posición geomorfológica (segundo factor) determina diferentes grados de humedad y sequedad en los suelos. Un tercer factor es el material de origen, que permite conocer sobre la susceptibilidad a la erosión o erodabilidad y la disponibilidad de nutrientes. Un cuarto elemento es la distribución de las coberturas vegetales, que ocasiona diferencias en el hábitat de micro y mesoorganismos que construyen suelo. Finalmente, tenemos el tiempo de formación y el sitio para determinar los procesos específicos de génesis del suelo.

Los factores climáticos, representados a través de índices de humedad (IDEAM, 2014), pueden ser determinantes en la oferta natural de agua, y pueden servir para conocer su disponibilidad (Prieto, 2002). Sin embargo, es necesario analizar los índices morfométricos de las cuencas (IGAC, 2017) para determinar los tiempos de concentración de las aguas y la capacidad de regulación del escurrimiento.

Los suelos no se encuentran expuestos directamente a las lluvias, por tanto, cuando se quiere obtener un dato de almacenamiento de agua en el suelo a escala detallada, es necesario conocer la distribución de las coberturas vegetales. Jiménez y Vargas (1998) argumentan que bajo los árboles se desarrolla un microclima variado que afecta la incidencia de la radiación solar, el viento, la humedad relativa y la temperatura. Estos autores clasifican la oferta de agua en “precipitación incidente”, la que llega directamente a la cobertura vegetal, y “precipitación neta”, la que llega efectivamente al suelo. Durante programas de riego se utiliza el factor 0.75 para reducir el dato obtenido del pluviómetro y de esta manera generar la precipitación efectiva. La pérdida de agua regulada cuando se intervienen los bosques es una idea que Mojica (1978) planteó a través del balance de agua desde las pérdidas por evaporación y el cambio de almacenaje en el suelo, lo cual causa un impacto en los aumentos súbitos de caudal en los ríos.

Como complemento a lo abordado hasta el momento, están los suelos hidroconductores (SHC): unidades de paisaje con la facilidad de concentrar los flujos subsuperficiales de agua en el suelo, debido a la presencia de capas impermeables que subyacen y conducen el agua hasta los sitios más bajos. Corresponde a la forma que se propone para identificar la calidad del servicio ambiental que cumple el suelo (Castro y Agualimpia, 2015). El concepto de “suelos hídricos” se utiliza con fines prácticos para definir el procedimiento que se debe seguir en la delimitación y conservación de zonas húmedas (USDA–NRCS, 2010). Estos suelos anegados se encuentran casi siempre bordeando lagunas y los alrededores de zonas húmedas que acumulan aguas de tipo léntico o lóxico.

Finalmente, en la Constitución Política de Colombia de 1991 se explica, en varios de sus artículos, que los procesos de OT son necesarios para alcanzar uno de los fines del Estado:

... servir a la comunidad, promover la prosperidad general y garantizar la efectividad de los principios, derechos y deberes consagrados en la Constitución; facilitar la participación de todos en las decisiones que los afectan y en la vida económica, política, administrativa y cultural de la nación.

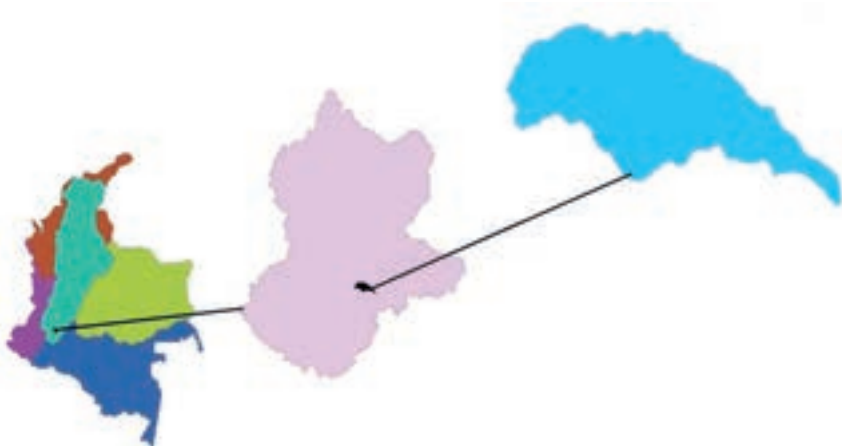
Por su parte, el artículo 80 reza que “el Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución”.

En concordancia con lo expresado en la Constitución Política de Colombia de 1991, se expidió la Ley 388 de 1997, en la que se manifiesta que las entidades territoriales municipales deberán promover el desarrollo en su territorio. De esta forma se concierta el Plan de Desarrollo Municipal a través del OT. En este marco político y legal, el proceso de ocupación y transformación del territorio debe ser orientado, según la población que se maneje, por los planes de ordenamiento territorial (POT), los planes básicos de ordenamiento territorial (PBOT) y los esquemas de ordenamiento territorial (EOT), en los que se establecen las funciones de los diferentes espacios del territorio municipal, con el propósito de garantizar una mejor calidad de vida.

## 5. Resultados y discusiones

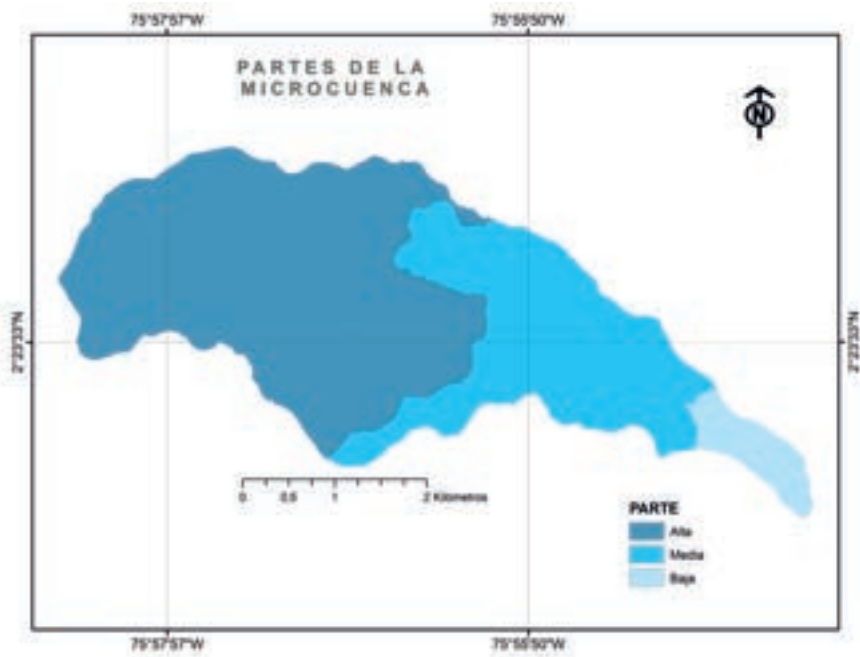
La zona trabajada se localiza en el área hidrográfica del Magdalena Cauca, en la zona hidrográfica del Alto Magdalena, y hace parte de la subzona hidrográfica del río Páez.

**Figura 1.** Localización del área de trabajo en el contexto nacional



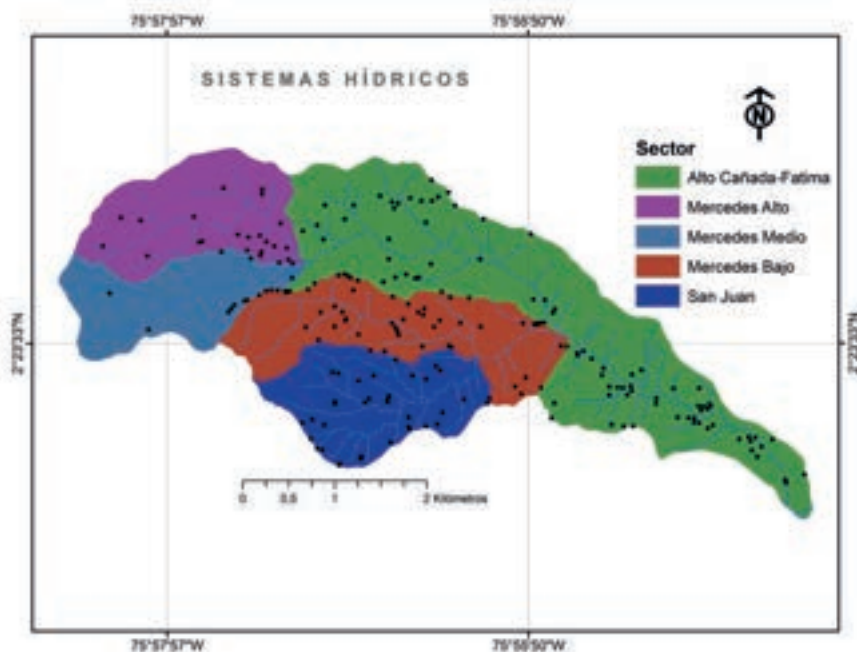
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2.** Sectorización de la microcuenca Barbillas



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.** Subdivisión por ramales o sistemas hídricos de la microcuenca Barbillas



Fuente: Elaboración propia.

La microcuenca de la quebrada Barbillas tiene una extensión de 1 518.6 hectáreas, y se localiza en el municipio de La Plata, Huila, al sur de Colombia, entre las coordenadas 75° 57'37,279" 75° 54'12,000" y 2° 24'41,332" 2° 22'31,040".

### 5.1 Con respecto a la morfometría

La microcuenca de la quebrada Barbillas, por su condición predominantemente montañosa, presenta la siguiente sectorización: 947.5 ha tienen procesos erosivos en potencia debido a las fuertes pendientes en el sector alto (62.4%); en el centro persisten procesos erosivos y deposicionales entremezclados localizados en el sector medio con una extensión de 497.12 ha (32.7%), y un sector bajo con procesos de sedimentación en 73.95 ha (4.9%).

**Tabla 1.** Parámetros morfométricos de los sistemas hídricos

Sistema hídrico	San Juan	Mercedes Bajo	Mercedes Alto	Mercedes Medio	Alto Cañada-Fátima
Parámetros morfométricos	ramal 1	ramal 2	ramal 3	ramal 4	ramal 5
Altitud máxima (msnm)	2 118.09	2 239.36	1 844.98	2 573.75	2 170.73
Altitud mínima (msnm)	1 474.40	1 276.33	2 974.78	1 841.42	1 021.24
Altitud media (msnm)	1 796.08	1 757.86	2 220.36	2 207.55	1 595.85
Área (ha)	220.27	266.46	227.35	186.95	617.56
Perímetro (m)	6 820.73	9 693.11	6 907.81	7 384.05	17 225.37
Longitud máxima (m)	2 856.82	4 550.76	2 974.78	2 752.26	7 542.47
Ancho máximo (m)	755.63	627.75	897.86	701.82	957.03
Vertiente mayor (km)	0.76	0.65	0.98	0.65	0.73
Vertiente menor (km)	0.26	0.10	0.17	0.06	0.09
Eje axial (km)	2.86	4.55	3.15	2.72	7.97

Fuente: Elaboración propia.

El análisis físico mostró que en la mayor parte de la cuenca prevalecen los procesos erosivos activos, los cuales pueden desencadenar deslizamientos frecuentes cuando se intervienen las coberturas naturales. Aun en éstas, los suelos tienden a ser inestables y los procesos de remoción se ven incrementados en algunos suelos derivados de materiales altamente susceptibles a la erosión, entre los que se cuentan: las rocas ígneas tipo tonalitas, que se meteorizan para conformar suelos sueltos de textura arenosa susceptibles a deslizamientos; las pizarras o rocas formadas en profundidad por presión, que al salir a superficie son fácilmente erodables, y las cuarcitas, que generan deslizamientos y desplomes. En el sector alto abundan las cenizas volcánicas, que tienden a retener abundante cantidad



de agua y, por acción de la gravedad en pendientes fuertes, incrementan la probabilidad de derrumbes.

El análisis fisiográfico, por su parte, incluye la identificación de los patrones de drenaje. A través de ellos se delimitaron los sistemas hídricos que constituyen los límites físicos de la oferta de agua superficial.

Se tomaron las dimensiones de captación de las aguas de lluvia de cada uno de estos sistemas hídricos, con el fin de determinar la eficiencia hidráulica basada en conceptos teóricos suficientemente probados, y a través de los cuales se establece la relación de las dimensiones y la forma de la cuenca con los tiempos de concentración de agua y la dinámica fluvial medida en las posibilidades de crecientes.

Es necesario aclarar que, cuando se establecieron los sistemas hídricos, se incluyó la localización de la población georeferenciada en campo mediante la localización de las unidades habitacionales, ya que no se contaba con información cartográfica detallada y fue necesario complementarla en el sitio y con análisis de imágenes *Sentinel* de varios años.

De acuerdo con el Departamento Nacional de Estadísticas (DANE), para el 2018 la población en el área rural fue de 38 285 habitantes, mientras que en la ciudad de La Plata, Huila, fue de 27 771 (42%). Esto muestra el carácter rural de la quebrada Barbillas y la importancia del servicio que presta a la ciudad, pues sus aguas son captadas para el acueducto urbano.

Los nombres utilizados para identificar los sistemas hídricos provienen de los de las veredas que constituyen los nombres locales de contenido sociocultural. La presión por los usos del agua en la cuenca, desde las necesidades de los seres humanos y sus sistemas productivos, se concentran en el sector medio, especialmente en el sistema hídrico de Alto Cañada y Fátima, en donde hay mayor cantidad de asentamientos humanos y un sistema agrícola con altas necesidades de riego.

La quebrada Barbillas, como eje colector de las aguas escurridas en los cinco sistemas hídricos, tiene una longitud de 10 480 m (figura 4), mientras que la suma de los ejes axiales de cada uno de estos sistemas es de 21 248 m. Esto muestra su importancia en el análisis del escurrimiento de agua en cada localidad y la necesidad de análisis morfométricos para cada sistema hídrico.

El sistema hídrico Alto Cañada-Fátima tiene el mayor tamaño de captación de aguas pluviales, que en proporción representan el 41% del área de la microcuenca. Los otros sistemas hídricos tendrán capacidades similares en relación a los tamaños. En cualquiera de los casos, el sistema hídrico más grande contiene el mayor recorrido de la quebrada Barbillas como eje axial, y los demás sistemas hídricos se constituyen en ramales que aportan aguas superficiales a ese sector en donde se concentran todas las aguas de la microcuenca.

**Figura 4.** Variación de la altitud en el recorrido de la quebrada Barbillas



Fuente: Elaboración propia.

La forma del sistema hídrico como elemento hidráulico o de conducción de aguas superficiales se obtuvo con la aplicación de dos fórmulas de Horton: la primera relaciona el área con dos veces la longitud del eje colector central; la segunda es el índice de alargamiento en donde se analizan las longitudes y anchuras máximas. En ambos casos se identifica que todos los sistemas hídricos de la microcuenca Barbillas tienen forma alargada.

De acuerdo con Horton, el índice de forma menor a 0.4 y el índice de alargamiento mayor a 1 corresponden a un sistema hídrico dispuesto en formas alargadas. Si se analiza la microcuenca completa, destaca que la componen sistemas alargados que tienen como características hidráulicas generales un bajo poder de regulación de escurrimiento de agua; mayor probabilidad de que se presenten picos de crecimiento en los caudales; mayores tiempos de respuesta a una lluvia continua y persistente, y menores tiempos de concentración de agua, lo que incrementa los riesgos de torrencialidad. Estos sistemas hídricos son frágiles y dependientes de las prácticas de manejo que se sigan. Para disminuir el riesgo de concentración de aguas, requieren de un mayor manejo de las coberturas de conservación y de la protección de los ecosistemas de bosques de galería.

**Tabla 2.** Análisis de la forma de los sistemas hídricos

Análisis Horton	Morfometría	Sistema hídrico		
		San Juan	Mercedes Bajo	Mercedes Alto
Índice de forma	Área (km <sup>2</sup> )	2.20	2.66	2.27
	Longitud axial (km)	8.18	20.70	9.92
	Índice de forma	0.27	0.13	0.23
	Interpretación	Alargada		
Índice de alargamiento	Longitud máxima (km)	2 856.82	4 550.76	2 974.78
	Ancho máximo (km)	755.63	627.75	897.86
	Índice de alargamiento	3.78	7.25	3.31
	Interpretación	Alargada		

Fuente: Elaboración propia.

El segundo aspecto que permite encontrar diferencias en la conducción de agua se analiza con el índice de rugosidad de cada sistema hídrico, en el cual se compara la densidad de drenaje con el grado de desnivel entre las cotas superior e inferior.

Se encontraron diferencias en factores de escurrimiento de aguas por mayor cantidad de drenajes, relacionadas con el desnivel en los sistemas hídricos de las Mercedes Bajo y Alto Cañada-Fátima. Esto se revierte en un aumento en el nivel de desalojo de aguas, en la velocidad de escurrimiento y, posiblemente, en los índices de erosión superficial, si se les compara con los demás sistemas hídricos. De acuerdo con lo anterior, los sistemas hídricos localizados en el sector medio de la cuenca tienen altos índices de escurrimiento de aguas que requieren un manejo óptimo de las coberturas vegetales y uso con intensas prácticas de manejo de las aguas de escorrentía.

**Tabla 2.** Análisis de la forma de los sistemas hídricos (continuación)

Análisis Horton	Morfometría	Sistema hídrico	
		Mercedes Medio	Alto Cañada - Fátima
Índice de forma	Área (km <sup>2</sup> )	1.87	6.18
	Longitud axial (km)	7.40	63.52
	Índice de forma	0.25	0.10
	Interpretación	Alargada	
Índice de alargamiento	Longitud máxima (km)	2 752.26	7 542.47
	Ancho máximo (km)	701.82	957.03
	Índice de alargamiento	3.92	7.88
	Interpretación	Alargada	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.** Análisis de la rugosidad de los sistemas hídricos

Sistema hídrico	Densidad de drenajes (km/km <sup>2</sup> )	Desnivel (m)	RC	Interpretación de la rugosidad
San Juan	1.15	0.64	0.74	Baja
Mercedes Bajo	1.25	0.96	1.20	Moderada
Mercedes Alto	1.12	0.75	0.84	Baja
Mercedes Medio	1.06	0.73	0.77	Baja
Alto Cañada-Fátima	1.16	1.15	1.33	Moderada

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.** Aspecto del relieve y el uso del sector de los sistemas hídricos Mercedes Bajo (cultivos de café) y Alto Cañada-Fátima (pastos, café y arbustales)



Fotografía: Castro, 2018.

Todos los sistemas hídricos que componen la microcuenca Barbillas presentan el eje axial recargado hacia una vertiente, lo cual significa diferencias locales en el almacenamiento y regulación de agua en los suelos.

## 5.2 Con respecto a la condición climática

Al revisar el levantamiento de suelos del departamento, se encontró que a esta escala estaba identificado un solo clima ambiental, el templado húmedo, y los lineamientos que se siguieron con este estudio al tomar decisiones para el ordenamiento del uso no fueron los más acertados. Esto justifica el ajuste de la cartografía de suelos y, con él, la necesidad de una zonificación climática aplicada a levantamientos de suelos de mayor detalle, ya que la línea base ambiental requiere conocer la oferta biofísica y la disponibilidad neta de agua para

los sistemas productivos. Agua y suelo son factores base de la producción agrícola en Colombia y en cualquier región latinoamericana.

Se revisó el gradiente de temperatura realizado para la vertiente occidental de la cordillera oriental en el proyecto PROGASP, aplicado en la actualidad en los trabajos de la Subdirección de Agrología del Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” que quedaron consignados en manuales de procedimiento revisados constantemente durante los trabajos de campo.

No se ha realizado un procedimiento de zonificación climática para la escala detallada. Se siguió con el planteamiento para la escala semidetallada mediante la confrontación de los resultados obtenidos con la información rasterizada y la comprobación en campo con termómetros para medidas durante la descripción de los perfiles de suelos a una profundidad de 50 cm, correspondiente a la temperatura estabilizada del suelo.

La información se corroboró con la identificación de especies indicadoras de cambio de los pisos térmicos y su condición de humedad obtenida a través del índice de Holdridge.

El clima frío húmedo, caracterizado por una temperatura estabilizada promedio anual del suelo entre 12 y 16°C, fue confirmado en campo durante la descripción de calicatas y con la ayuda de termómetros a una profundidad de 50 cm en el suelo. Las especies reportadas durante los trabajos de campo se empezaron a encontrar desde los 1 920 m de altitud. Las más comunes fueron: moco (*Sauravia acaba*), balso blanco (*Heliocarpus americanus* L.), guamo (*Inga spectabilis*), chaparro (*Adenania floribunda*), palma chonta o palma boba (*Cyathea caracasana*), lechero (*Sapium glandulosum*), roble (*Quercus humboldtii*), pacunga-chipaca (*Bidens laevis*), cadillo (*Heliocarpus americanus*), yarumo (*Cecropia arachnoidea*), sauco (*Sambucus nigra*), palma chonta o palma boba (*Cyathea caracasana*), tuno (*Miconia sp.*), moquillo (*Sauravia acaba*), berraquillo, chicharron, surrumbo (*Trama micrantha*), granizo (*Heliosmum bomplandianum*), cafeto (*Palicourea guianensis*) y plegadera (*Selaginella scandens*).

La transición al clima frío estuvo marcada por la aparición de las especies de guadua (*Guadua angustifolia*), laurel árbol (*Nectandra sp.*), plomo, ondequera (*Casaria corymbosa*), balso blanco (*Heliocarpus americanus* L.), nacedero (*Trichanthera gigantea*), tuno (*Miconia sp.*), plomo (*Casaria corymbosa*), ojo de poeta (*Thunbergia alata*), nacedero (*Trichanthera gigantea*), cebolla junca (*Allium fistulosum*), boquillo o moco (*Sauravia acaba*) y cucharo (*Myrsine guianensis*).

El clima templado húmedo cubre la mayor parte de la microcuenca y tiene como límites desde los 900 a los 1 920 msnm. En la medida en que se baja en la vertiente, el clima se hace menos húmedo y se incrementan los índices de

**Figura 6.** Aspecto de la hoja lechero (*Sapium gladulosum*)



Fuente: Castro, 2018

evapotranspiración. Las especies son muy variadas, aunque han sido intervenidas por los seres humanos y se encuentran más dispersas: punta de lanza o lacre (*Vismia bacifera*), buganbil (*Bougainvillea gabra*), bore (*Colocasia esculenta* L.), cayeno resusitado (*Hibiscus rosa sinensis*), palo de coral o guayabito (*Adenania floribunda*), cachimba (*Erythrina poeppigiana*), sangregao (*Croton smithianus*), venturosa (*Lantana camara*), vainillo o velero, cañofisto (*Senna spectabilis*), verbena morada (*Stachytarpheta cayennensis*), guamo machete (*Inga densiflora*), caucho flor blanca (*Ficus* sp.), mosquero (*Croton gossypifolius*), ubito (*Cavendishia nuda*), guamo o rabo e mico (*Inga edulis*), mandaguasca (*Baccharis trinervis*), chilca (*Baccharis latifolia*), cadillo o amor seco (*Desmodium* sp.), emilia (*Emilia* sp.), amaranto (*Amaranthus dulcis*), maní forrajero (*Arachis pintoi*), ortiga (*Urera caracasana*), guadua (*Guadua angustifolia*), bejuco (*Filodendrum discarpium*), casco de vaca o pata de vaca (*Bauhinia variegata*), bijao (*Calathea bihao*), caimo (*Pouteria* sp.), jaboncillo (*Sapindus saponaria* L.), copa de oro (*Allamanda cathartica*), cucharo (*Myrsine coriacea*), pasto braquiaria (*Braquiaria decumbens*), ficus (*Ficus* sp.), guamo (*Inga* sp.), cadillo (*Heliconia americana*), garrocho (*Viburnum cornyphallium*), guacharaco (*Cupanea*

*cinerea*), oral, gualanday (*Jacaranda caucana*), platanillo (*Heliconia sp.*), surrumbo, berraquillo, chicharron (*Treina micrantha*), caucho (*Ficus sp.*), cordoncillo (*Piper aduncum*), moquillo (*Sauravia acabra*), balso blanco (*Heliocarpus americanus L.*), yarumo (*Cecropia arachnoidea*), caspe o pedro hernández (*Toxicodendron striatum*), chaparral.

Las especies introducidas comunes fueron: ciprés (*Cupressus lusitánica*), pino pátula (*Pinus patula*), eucalipto (*Eucaliptus globulus*) y urapán (*Fraxinus chinensis*). Las variedades comerciales fueron: café variedad Colombia (*Coffea sp. Var Colombia*), Café variedad F6 (*Coffea sp.*), café variedad castilla (*Coffea sp. Var Castillo*), café variedad caturra (*Coffea sp. Var Caturra*) y café variedad (*Coffea arabica*). Otros cultivos en este clima fueron: cacao (*Theobroma cacao*), guanábano (*Annona muricata*) y mango (*Mangifera indica*).

El análisis de la cobertura vegetal en la microcuenca Barbillas mostró que el 47.5% se compone de vegetación arbustiva, el 33.6% contiene estrato arbóreo, el 16.1% tiene estructura herbácea y el 2.7% son especies epífitas o enredaderas.

### 5.3 Con respecto a la aptitud de uso de los suelos

La aptitud de uso de los suelos responde a la pregunta: ¿cuál es la capacidad del uso de los suelos sin el riesgo a la degradación, determinado a partir de los planteamientos teóricos trabajados en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos? (USDA-NRCS, 2014). El levantamiento de suelos realizado por el IGAC, a través de la Subdirección de Agrología (IGAC, 2018), identificó inicialmente 65 unidades cartográficas de suelos mediante la descripción y muestreo de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas realizadas en 55 nuevos perfiles de suelos descritos en la microcuenca de Barbillas. No obstante, en términos de capacidad de uso potencial agrícola, la limitación al uso está enmarcada en la fuerte pendiente. De los estudios se obtuvo que los suelos tienen poca profundidad efectiva, lo cual disminuye las posibilidades de uso agrícola intensivo. Esto determina una región particularmente sensible en la relación suelo y agua que requiere con urgencia bases técnicas para la orientación del modelo de desarrollo que se sigue en el esquema de ordenamiento territorial actual, y que en última instancia afecta o no la calidad de vida de sus pobladores.

El suelo, como elemento ambiental constitutivo de los ecosistemas (a partir de la visión integral), cumple una función básica del servicio ambiental que requiere ser aplicado para mantener el equilibrio en la producción natural y agrícola en este sistema de entrada y salida de agua, lo que permite un flujo energético que mantiene la biodiversidad en este espacio geográfico del departamento de Huila.

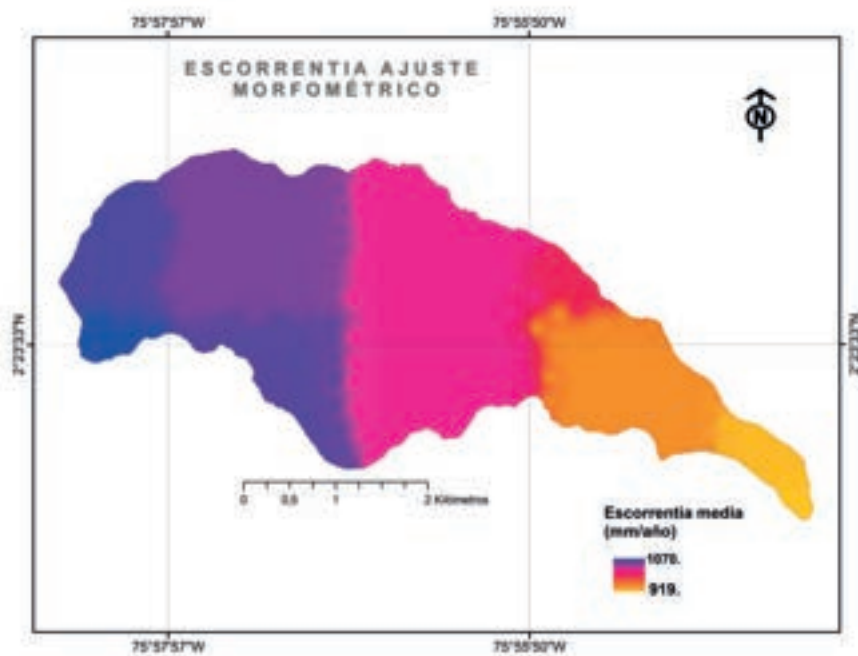


El suelo tiene como característica ambiental importante la presencia de fragmentos de roca dentro de él, lo que le permite cumplir el servicio ambiental de regular las aguas freáticas y mejorar la permeabilidad, que en algunos casos podría generar deslizamientos en épocas de lluvias, lo que determina la sostenibilidad de la microcuenca de Barbillas.

La cartografía de suelos facilita el conocimiento de sus características químicas, físicas y mineralógicas. Las primeras se relacionan con la disponibilidad o la deficiencia de elementos nutritivos para los cultivos o las plantas, también con la presencia de elementos en cantidades tóxicas, capacidad de intercambio y balance de nutrientes. Las características físicas se relacionan con las posibilidades de anclaje de cultivos, entre las que se cuentan como restrictivas las capas endurecidas o compactadas y la presencia de abundantes fragmentos de roca o contacto rocoso, lo cual disminuye las posibilidades de almacenamiento de agua y nutrientes para las prácticas agrícolas. El suelo se analiza desde sus características de almacenaje, regulación y conducción de las aguas, las cuales determinan el servicio ambiental dirigido a un problema que se debe resolver en el ordenamiento del uso y establecimiento de las prácticas de manejo para optimizar la regulación de los procesos hidrológicos ante una presión por el uso del agua. Finalmente, los análisis de mineralogía del suelo permiten conocer la capacidad de fertilidad de las tierras y especialmente la cantidad potencial de elementos nutritivos almacenados en la fracción gruesa del suelo, es decir, en las arenas, y la capacidad de intercambio de nutrientes en la fracción fina.

El estudio del suelo fija una capacidad de uso en agroforestería y conservación, ya que dominan las clases agrológicas 7 y 8, cuyas restricciones o limitaciones son las fuertes pendientes y la poca profundidad efectiva. Se realizaron 55 pruebas de conductividad hidráulica por el método invertido en cada uno de los perfiles de suelos descritos. Se aplicaron las técnicas de Philips para conocer los índices de infiltración y de sortividad. Los resultados fueron que: 7.28% del área presenta movimientos de agua entre lentos y moderadamente lentos localizados en el sector bajo de la cuenca en suelos de régimen ácuico, arcillosos o con capas compactadas; el 21.86% de los suelos estudiados presenta movimientos de agua en el suelo moderadamente rápidos (6.3 a 12.7 cm/h), cuyas características principales son las texturas moderadamente finas y espesas capas superficiales orgánicas; el 1.86% tiene movimientos moderados de agua en el suelo (2 a 6.3 cm/h) que en alguna época del año provoca grietas superficiales y contiene arcillas expansivas, y el 69% retiene agua en poco tiempo, pues se mueve a más de 12.7 cm/h, lo que se interpreta como rápida y muy rápida

**Figura 7.** Distribución de la escorrentía media bruta en la microcuenca Barbillas



Fuente: IDEAM, 2014.

infiltración, y corresponde a suelos de diversa granulometría que contienen abundantes fragmentos de roca en superficie y dentro del suelo.

#### 5.4 Con respecto a la disponibilidad de agua

El Estudio Nacional del Agua realizado por el IDEAM (2014) es el referente técnico científico de la oferta de agua en las cuencas colombianas y se constituye en la información básica estructurada en información *rasterizada* de los elementos hidrológicos definidos por el grupo de expertos en modelación de la escorrentía.

La información se encuentra a escala 1:500.000 y cubre todo el territorio continental colombiano. Para precisar la oferta hídrica a niveles más detallados, el IGAC (2017) trabajó en la temática de disponibilidad de agua superficial para

**Tabla 4.** Definición del factor morfométrico de cada sistema hídrico de la microcuenca Barbillas (parte 1)

Análisis morfométrico	Microcuenca Barbillas					
	San Juan		Mercedes Bajo		Mercedes Alto	
	Valor	Índice	Valor	Índice	Valor	Índice
Densidad de drenaje	5.13	0.75	3.59	0.75	4.97	0.75
Relación de bifurcación	1.56	0.9	1.73	0.9	1.33	0.9
Índice de concentración	1.03	0.99	2.28	0.99	0.28	0.71
Promedio		0.88		0.88		0.79

Fuente: Elaboración propia.

el catastro multipropósito y presentó algunos avances que se aplican en la presente investigación.

El procedimiento consistió en la generación de una malla de puntos georeferenciados que cubrían la zona de estudio para extraer el valor digital de la escorrentía media del mapa producido por el IDEAM (2014). El objetivo era definir una celda de 12 m con un valor de lámina de escorrentía para generar un nuevo *raster*.

El primer ajuste a la escorrentía se realizó con la morfometría de los sistemas hídricos, lo que ajusta la oferta bruta de la región acorde con las condiciones hidráulicas determinadas del valor promedio entre la densidad de drenajes, relación de bifurcación de Horton y los índices de confluencia hidráulica.

Para la afectación de la escorrentía con el valor promedio del análisis morfométrico, se convirtieron los sistemas hídricos en los valores 0.88, 0.79 o 0.75 y mediante reclasificación de la información rasterizada se obtuvo la escorrentía ajustada por morfometría.

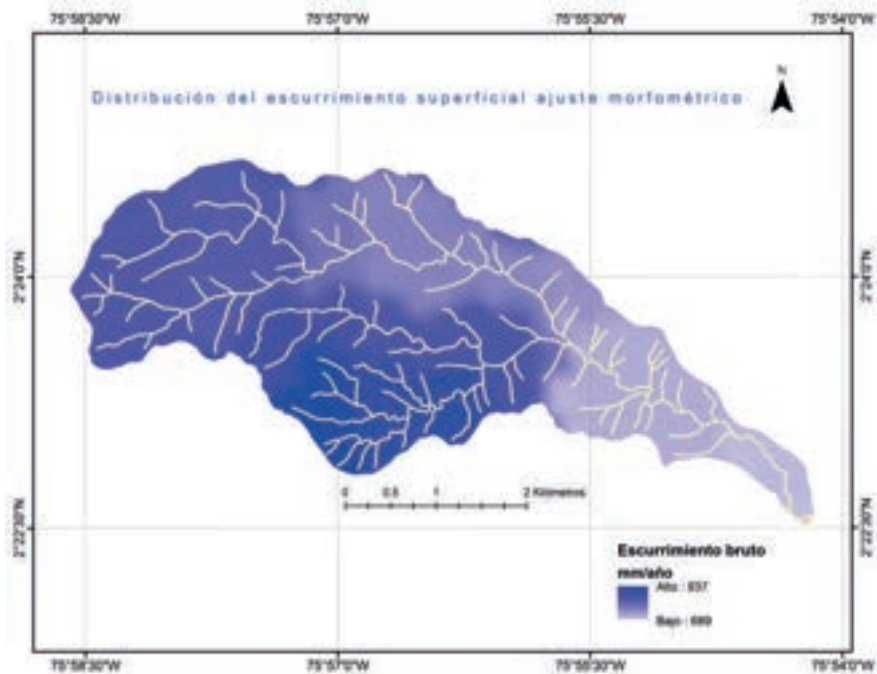
Nótese que el factor 0.75 asignado al sistema hídrico Alto Cañada-Fátima redujo la oferta bruta de agua en un 25%, lo que muestra un cambio sensible en la disponibilidad de agua para los procesos productivos, mientras que la combinación de la oferta bruta y la morfometría en los sistemas hídricos de San Juan y Mercedes Bajo configura una mayor oferta de agua superficial, al disminuir sólo el 12% de la oferta bruta.

**Tabla 4.** Definición del factor morfométrico de cada sistema hídrico de la microcuenca Barbillas (parte 2)

Análisis morfométrico	Microcuenca Barbillas			
	Mercedes Medio		Alto Cañada-Fátima	
	Valor	Índice	Valor	Índice
Densidad de drenaje	3.96	0.75	3.51	0.75
Relación de bifurcación	1.18	0.9	2.89	0.8
Índice de concentración	0.21	0.71	0.31	0.71
Promedio		0.79		0.75

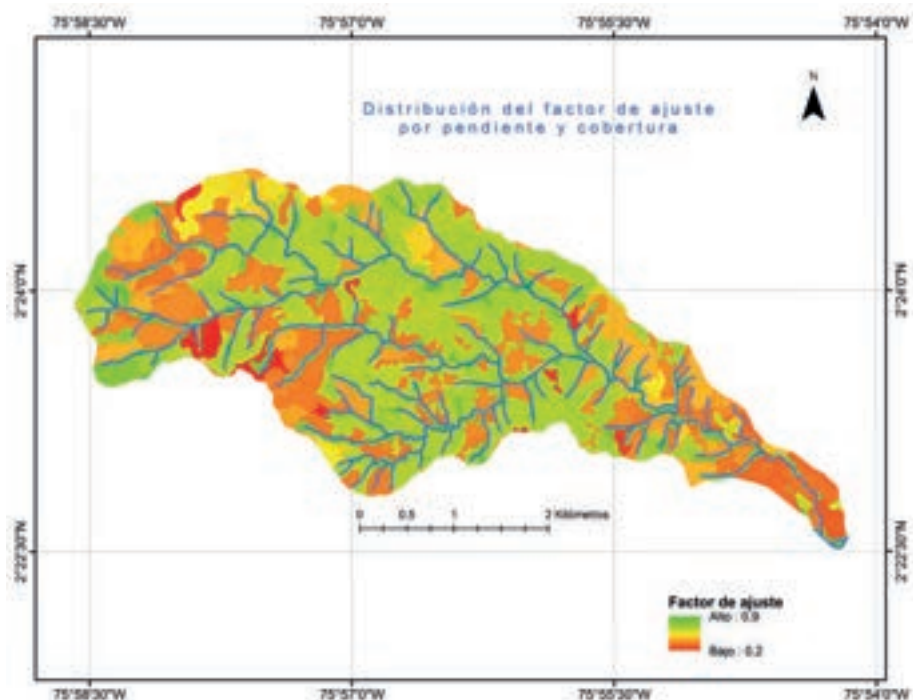
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8.** Distribución de la escorrentía media ajustada por morfometría de la microcuenca Barbillas



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 9.** Distribución del factor de ajuste por pendiente y cobertura en la microcuenca Barbillas

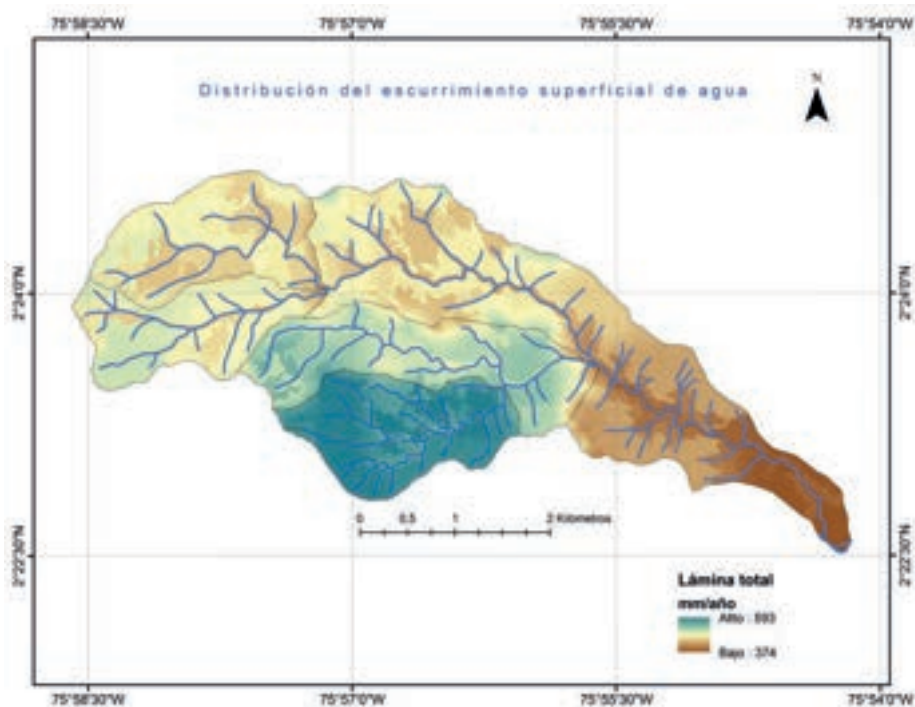


Fuente: Elaboración propia.

Para optimizar la información espacial de cómo se distribuye el agua de escorrentía en la cuenca, en los talleres realizados con expertos en la Subdirección de Agrología del IGAC se propuso la combinación de dos covariables espaciales: la primera, la interpretación de las coberturas naturales, y la segunda se obtuvo del estudio del relieve a partir de la pendiente del terreno determinada durante el reconocimiento de suelos con la ayuda del modelo digital del terreno que contiene celdas de 12 m de lado.

El procedimiento fue la asignación de un factor de 1 a las tierras de relieves planos, y de igual forma el factor 1 a bosques naturales que conservan la escorrentía. Se asignaron valores que variaban hasta el factor 0.2 en zonas de pendientes superiores a 75% y coberturas eriales o afloramientos rocosos en donde la escorrentía llega a los valores mínimos. El índice utilizado en este ajuste a escala semidetallada incluye los pesos ponderados, asignando un factor de 0.7

**Figura 10.** Distribución de la lámina de escorrentía total anual de la microcuenca Barbillas

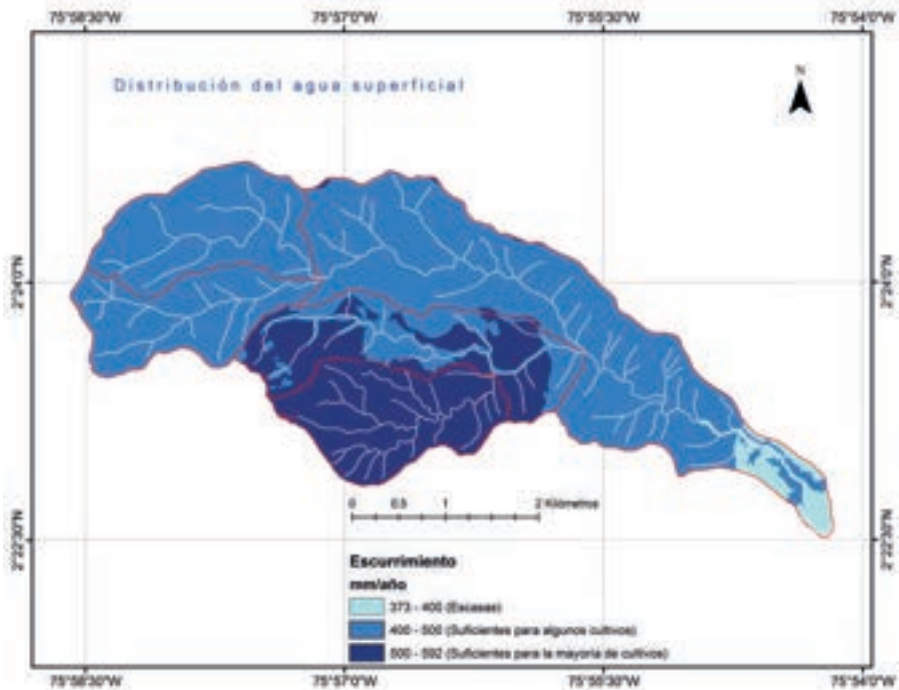


Fuente: Elaboración propia.

a la cobertura vegetal y 0.3 a la pendiente. La razón para darle mayor peso a la cobertura es que la pendiente ya se había aplicado durante el análisis morfométrico del índice de rugosidad. Estos valores asignados a la cartografía rasterizada permitieron la afectación de la escorrentía media ajustada a un valor que cambia espacialmente y permite el acercamiento.

Los tonos verdes de la cuenca en la figura 9 son dominantes, lo que muestra un buen estado de conservación de las coberturas vegetales, por lo menos de tipo permanente. Las zonas en tonos rojo presentan bajo índice de protección hidrológico debido a la pérdida de coberturas vegetales permanentes. Se observa también que en el sector alto hay focos de intervención que afectan la hidrología de la microcuenca de la quebrada Barbillas; esto influye en la disminución del servicio ecosistémico de proteger y regular su caudal base.

**Figura 11.** Distribución del agua superficial en la microcuenca Barbillas



Fuente: Elaboración propia.

Mediante el proceso cartográfico se combinaron, en forma de factor, el mapa rasterizado de escurrimiento ajustado por morfometría y el valor de ajuste por cobertura y pendiente. Con ellos se obtuvo el producto final: la distribución espacial del escurrimiento medio anual que le permite al tomador de decisiones conocer las áreas más sensibles en escurrimiento de agua. Este proceso disminuye las falencias al tener un dato puntual dependiente de la presencia o ausencia de una estación que provea de información de caudales.

En la figura 10 se identifican los sistemas hídricos y las coberturas vegetales dominantes que influyen en la distribución del análisis de la escorrentía, para determinar con mayor detalle la varianza de valores de escorrentía media anual.

En términos generales, la microcuenca Barbillas cuenta con una adecuada oferta neta el agua, con valores promedio entre 374 y 593 mm/año, cantidad que será sostenible si se tienen en cuenta la aptitud del suelo, sus requerimientos

de agua y si se controlan sus concesiones. Uno de los factores que deben estudiarse se relaciona con la capacidad de carga de la cuenca.

Si se le compara con los resultados del Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2014), la zona se encuentra en proporciones parecidas a las de la Cordillera Oriental, con lugares de tipo similar en zonas del Valle del Cauca, sector norte del departamento de Cesar, y en las áreas rurales de Montería, en donde los índices de evapotranspiración son más altos, lo que ocasiona desbalances regionales.

A través de la reclasificación de valores en rangos se puede determinar un dato útil en el ordenamiento de los usos como una propuesta sobre la disponibilidad de aguas superficiales basada en valores promedio anuales, derivados de la experiencia con el catastro multipropósito que se adelanta en el IGAC (2017).

Se tienen tres categorías verificadas durante los trabajos de campo en el sector bajo de la microcuenca: 1) las aguas superficiales son escasas, 2) hay un conflicto de uso, pues se capta el agua para la población de La Plata y 3) los predios localizados en este sector no cuentan con agua para la producción agrícola, ya que en primera instancia están los requerimientos de agua de la población. Allí las láminas de escurrimiento promedio anual son inferiores a 400 mm.

Una lámina promedio anual entre 400 y 500 mm es suficiente para algunos cultivos, como el café y otros permanentes. Sin embargo, estas zonas requieren de la protección de las coberturas vegetales y de la restauración de algunos ecosistemas. Finalmente, el sistema hídrico de San Juan tiene una mayor disponibilidad de agua que pudo verificarse en campo con la presencia de abundantes quebradas y nacimientos de agua, y en la presencia de coberturas vegetales que regulan el escurrimiento de manera eficiente. Las acciones pertinentes en estas áreas son el mantenimiento de las coberturas y delimitación de las zonas de ronda que recientemente se hicieron públicas en la legislación colombiana.

## 6. Consideraciones finales

Los suelos hidroconductores (SHC) son importantes para los procesos productivos actuales, pues conducen los flujos subsuperficiales y los deja a disposición de los usos de cualquier tipo, como el del consumo humano y el que se requiere para el mantenimiento de los ecosistemas naturales. Caso contrario es el de las zonas con sustratos permeables, cuya función se identifica en la recarga de acuíferos.

Los SHC potencian su capacidad de llevar y regular agua en dos aspectos muy importantes: 1) la composición granulométrica que en última instancia determina la velocidad con la que se mueve el agua en el suelo y 2) la razón de rugosidad que involucra el grado de la pendiente, la cual acelera o retarda el proceso de



conducción del agua hacia los sitios más bajos. Mientras los suelos hídricos tienen su representación en las tierras bajas o cenagosas, los SHC pueden presentarse en sectores altos de montaña y en transicionales a las tierras bajas.

En terrenos de rugosidad baja y pendiente plana, los SHC se identifican por las características morfológicas de color del suelo, mientras que en paisajes de alta rugosidad los suelos deben su eficiencia al movimiento de agua en suelos saturados y a la acción de la gravedad. En zonas planas, el servicio ambiental se da en términos de capacidad de almacenaje y permanencia de agua en el suelo y en zonas con alto relieve, en la eficiencia de la regulación obtenida de la velocidad con que se mueve el agua en el suelo, ayudado por el factor relieve o desnivel de los terrenos.

El OT, desde el análisis realizado por la FAO, se aplica en pro del desarrollo sostenible, ya que, como ellos mencionan, se tienen en cuenta aspectos como “la pobreza y la equidad, la productividad de los asentamientos humanos, el medio ambiente y la prevención de los desastres, la propiedad y tenencia de la tierra, la gobernabilidad y la participación ciudadana” (FAO, 2014). En este sentido, se requiere que desde el eclecticismo se trabajen el agua y el suelo y se determinen los SHC, ya que en algunos casos las medidas de protección de los recursos hídricos basadas exclusivamente en la revegetalización de las cuencas no son suficientes y es necesario considerar la susceptibilidad de los suelos a los movimientos en masa y a la degradación de las tierras.

## Referencias

- AGUALIMPIA, Y. Y CASTRO, C.E. (2016). Análisis de posibles conflictos entre usos agrícola, rural, urbano y ambiental de los suelos. *Revista Ingeniería y Región*, 16(2), 85-97.
- ANDRADE, A. (2004). *Lineamientos para la aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integral del recurso hídrico*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente-PNUMA-Oficina regional para América Latina y el Caribe.
- CAM. (2017). *Corporación Regional del Alto Magdalena. Diagnóstico de la Quebrada Barbillas y sus principales afluentes*. Jurisdicción del municipio de La Plata, departamento del Huila.
- CASTILLO, E. (2006). *Agua, eje articulador de vida*. Catedra Low Maus. Universidad Industrial de Santander-UIS.
- CASTRO, C.E. Y AGUALIMPIA, Y. (2015). Análisis de proyección de la demanda de agua para el uso agrícola de un sector de la Sabana de Bogotá. *Revista Tecnogestión*, 12(1), 13-25.
- DOKUCHAEV, V. (1886). Razbor glavneishich pochvennych ponyatyi (in Russian). En V. V. Dokuchaev, *Selected Papers 1949*. Selhozgiz.
- FAO. (2014). Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura-FAO. (19 de marzo de 2014). Plataforma de Territorios Inteligentes. Ordenamiento territorial. <http://www.fao.org/in-action/territorios-inteligentes/componentes/ordenamiento-territorial/contexto-general/es/>
- FAO. (2002). Relaciones tierra-agua en cuencas rurales. Actas del taller electrónico. *Boletín de Tierras y Aguas de la FAO No. 9*. Roma. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua*. Instituto de Hidrología Meteorología y Medio Ambiente.
- IGAC. (1994). *Estudio General de suelos del Departamento del Huila. Bogotá. Memoria técnica y cartografía. Consulta interna*. Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”.
- IGAC. (2017). *Seminario taller sobre disponibilidad de agua para catastro*. Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”.
- IGAC. (2018). *Levantamiento detallado de suelos en la microcuenca de la quebrada Barbillas, municipio de La Plata-Huila*. Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”. En ejecución.
- IGAC Y MAVDT. (2007). *Definición de usos alternativos y sostenibles para la ocupación de las tierras a nivel nacional (Colombia)*. Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- JENNY, H. (1941). *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. Dover Publications.
- JIMÉNEZ, F. Y VARGAS, A. (1998). *Sistemas agroforestales. Apuntes del curso corto*. CATIE-GTZ.

- MCBRATNEY, A.B., MENDOCA SANTOS, M.L. Y MINASNY, B. (2003). *On digital soil mapping*. Geoderma.
- MOJICA, I. (1978). *Influencia de la cobertura boscosa en el régimen hidrológico de las cuencas*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. IICA-OEA.
- PRIETO, C. (2002). *El agua sus forma, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación*. Universidad Central.
- USDA-NRCS. (2010). *Keys to Soil Taxonomy*. 12va ed. United States Department of Agriculture.
- USDA-NRCS. (2014). *Field Indicator of Hydric Soils. A Guide for identifying and Delineating Hydric Soils*. Version 7.0. L. M. Vasilas, E. W. Hort, and C. V. Nobles. (eds). En cooperación con el National Technical Committee for Hydric Soils.

## Capítulo 2

# Modelo de desarrollo ambiental desde la cosmogonía del agua. Departamento del Vaupés, Colombia

■ Fernando Sánchez Sánchez <sup>3</sup>

### 1. Introducción

Conforme al dinamismo evolutivo, el ser humano ha desarrollado la capacidad de satisfacer sus necesidades en relación con el uso y usufructo de los recursos naturales, especialmente en su dependencia alrededor el agua. En este contexto se presentan nuevas formas de subsistencia, entre ellas la producción y comercialización de productos, que entran de manera tácita a presionar de forma real los consumos y aportes de contaminantes al medio ambiente.

En este entorno del desarrollo asociado a la necesidad de producir, transformar y mejorar las condiciones de calidad de vida y bienestar, el hombre desempeña el rol de guía del consumo, trayendo consigo la responsabilidad de planear su futuro a través de los recursos que sean accesibles a su forma de vida y de los cuales pueda sacar provecho económico.

Como resultado de esta supremacía y voluntad inherente de cada ser, dicha responsabilidad ha traído consigo ideas de negocio para la generación de fuentes de ingresos, las cuales promueven una gestión organizacional capaz de posicionar a nivel competitivo distintas empresas en torno a un sector determinado.

---

<sup>3</sup> Dr. en Gerencia Pública y Política Social. Docente investigador. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. fersasanchezphd01@gmail.com

Es la visión tradicional asociada al desarrollo urbano de las grandes urbes, que para nada corresponde a la interpretación desde la cosmogonía de las comunidades indígenas de la región de la Orino-Amazonia de Colombia.

El surgimiento de las conglomeraciones industriales en las distintas zonas del país puede ser visto como un mecanismo de apertura económica en la que prevalece el intercambio de bienes y servicios por grandes sumas de capital y valor agregado. No obstante, dicha acción viene acompañada de una competencia en la que la supervivencia de las empresas es directamente proporcional a la gestión ejecutada para satisfacer las necesidades de los consumidores.

La gran pregunta es si, desde lo social, económico y ambiental, este modelo es afín a dichas comunidades, para quienes, desde la conservación y la preservación de sus territorios, no existe como tal la idea de “desarrollo”, y si se toman como referente sus medios de producción y la manera como comparten de forma cooperada las acciones propias del consumo de lo que le extraen de la tierra de manera armónica.

En este sentido, la productividad está acompañada de estrategias que en conjunto optimizan el desempeño empresarial, pero no los modelos de trabajo de este tipo de comunidades, y ponen en peligro la subsistencia de estas identidades culturales, como si fueran a elevar el éxito corporativo de una factoría.

Puntualmente, este escrito tiene como fin generar un marco de referencia teórico que permita dirigir un diagnóstico a nivel competitivo en el departamento del Vaupés, tomando como referente los componentes propios de las comunidades que habitan esta región.

Como objeto de estudio, se pretende analizar el desempeño empresarial como indicador de medición de la competitividad y, de esta manera, evaluar los factores de competitividad empresarial con que cuenta el departamento del Vaupés, como actor importante y protagónico en la economía colombiana.

## 2. Marco teórico

A continuación se exponen las principales teorías de la competitividad, con el fin de realizar una aproximación de la evolución y conexión entre las mismas, dejando como referente importante la relación entre desarrollo ambiental y económico, y su posterior interpretación bajo la visión cosmogónica de las comunidades indígenas.

### 2.1 Distintos enfoques para el estudio de la competitividad

En la nueva teoría del comercio, el precio no es el único determinante de ventaja entre un agente económico y otro. Existen diferenciales que se deben tener

en cuenta a la hora de medir la ventaja, por ejemplo, la calidad, diversificación y factores de competencia imperfecta (monopolios, exenciones tributarias, subsidios, entre otros). La combinación de estos determinantes puede afectar las relaciones al momento de comerciar internacionalmente (Lombana y Rosas, 2008).

En la teoría clásica del comercio, la ventaja dependía del diferencial en costos. Para Adam Smith, la ventaja absoluta estaba basada en la especialización para minimizar costos absolutos (maximización del beneficio). Ésta era la vía por la cual un país obtenía mayores ganancias y el comercio se convertía en el generador de crecimiento en la producción mundial. David Ricardo avanza en la teoría, estableciendo costos relativos y no absolutos como determinantes para el establecimiento de la ventaja entre los países. Finalmente, para Heckscher-Ohlin, quienes suponen fronteras tecnológicas entre países en los cuales existen productos con similares cualidades, se postula la intensidad (abundancia) de los factores de producción como variable que hace la diferencia en cuanto al establecimiento de la ventaja comparativa (Lombana y Rosas, 2008).

Los supuestos de los economistas clásicos son muy fuertes para aplicarlos a la “realidad” económica; sin embargo, nadie discute las conclusiones a las que llegan Adam Smith y David Ricardo en tanto las economías se complementen (comercio interindustrial) y, por ende, haya necesidad de intercambiar. La cuestión es si esto no es una justificación para una pérdida constante en los términos de intercambio, donde los países más desarrollados exportan manufacturas mientras que los menos desarrollados importan materias primas. En la realidad, los términos de intercambio se ajustan más a economías sustitutas, en las que existen imperfecciones en el mercado y donde, a pesar de ello —contradiendo al pensamiento clásico—, el comercio continúa y, en algunos casos, se incrementa, como se dedujo de la integración europea en 1957, cuando naciones desarrolladas y en vías de desarrollo incrementaron su comercio intraindustrial.

Las escuelas más recientes del comercio internacional se basan en las conclusiones de Smith y Ricardo para postular teorías del comercio innovadoras. Es precisamente en la nueva teoría del comercio donde se busca enmarcar lo que podría ser una “teoría de la competitividad”. De hecho, la nueva teoría del comercio postula que los agentes económicos pueden crear ventaja comparativa a través de las estrategias de los privados o las políticas comerciales de los públicos.

Teniendo en cuenta que tanto los comercios inter e intraindustrial pueden motivar el crecimiento, éstos podrían unificarse en un único concepto que los abarque. En este punto la competitividad podría surgir como la definición vinculante.

Bajo estos criterios se puede aportar desde la visión de la argumentación que:

La noción de ventaja comparativa está basada en la posición de la dotación de factores de un país donde ninguna empresa participante dentro de una industria tiene una ventaja sobre otra basado en su dotación de factores (características de bienes públicos).

A diferencia de la ventaja comparativa, la ventaja competitiva es creada y apropiada por firmas individuales (características de bienes privados).

A mediados de los noventa, Michael Porter expone su modelo de ventaja competitiva de las naciones, pretendiendo dar respuestas teóricas a los modelos económicos clásicos expuestos por Smith y Ricardo, los cuales ya no explicaban suficientemente la competitividad. Sin embargo, el comercio sigue siendo un factor básico en el éxito competitivo de un país.

Bajo esta visión, en áreas tan importantes como la de la Orino-Amazonia colombiana, y en especial en la zona de estudio del departamento del Vaupés, la relación de sus habitantes con el agua y con el río Vaupés es fundamental para entender el componente cosmogónico de las comunidades con su entorno ambiental y sus interacciones sociales y económicas, determinadoras de sus condiciones de vida y bienestar. Lo anterior, desde una visión de la competitividad no económica sino ambiental.

## 2.2 La teoría económica moderna: el modelo de la ventaja competitiva de las naciones

Ramos (2001) expone que la teoría económica moderna surge como respuesta a una economía cada vez más globalizada, con un mayor grado de concentración empresarial, un incremento en el número de multinacionales que operan en diversos países, una creciente y cada vez más variada demanda y una oferta más diferenciada. Como argumenta Porter (1990), la presencia de multinacionales que no sólo exportan, sino que también compiten en el extranjero a través de sucursales, ha hecho insuficientes las explicaciones tradicionales de por qué y dónde exporta una nación.

El concepto de competitividad de los territorios se ha convertido en una de las principales preocupaciones de los gobiernos e industrias de cada nación. Cho y Moon (2000) se preguntan por qué naciones con un desarrollo más lento o con un mercado doméstico más pequeño para un producto emergen a menudo como líderes mundiales. Las últimas décadas del siglo xx constituyeron

una etapa de globalización con importantes consecuencias para las naciones que no han alcanzado un cierto nivel de desarrollo.

Las diferencias económicas entre países desarrollados y no desarrollados son cada vez más irreconciliables. Las presiones por ser competitivos son cada vez mayores y como resultado existe un mayor interés por conocer los factores determinantes de la competitividad internacional.

Michael Porter (1990) explica la confusión existente entre la ventaja comparativa de la teoría económica tradicional y la ventaja competitiva de la teoría económica moderna, mostrando cómo las industrias de las naciones son las que determinan el éxito de estas últimas, dado que las ventajas de una nación con respecto a otra no se basan en la dotación de los factores y el costo comparativo, sino en las elecciones estratégicas y en la capacidad de las industrias para innovar y mejorar.

En su libro *The Competitive Advantage of Nations*, Porter (1990) publica una investigación basada en la evidencia empírica de cien empresas ubicadas en diez países diferentes, en la cual manifiesta las causas su éxito o su fracaso, según las competencias internacionales; es decir, por qué un país obtiene o no éxito internacional en una empresa en particular. Para ello, plantea cuatro variables: la dotación de factores, las especificaciones de la demanda, las industrias conexas y las estrategias, estructura y competencia. A estos elementos los denominó los “componentes del diamante” y sostuvo que el éxito va en función directa a la interrelación entre ellos. Su conclusión es que las ventajas competitivas son las que permiten obtener éxito de una nación, y no sus ventajas comparativas.

El autor analiza a detalle las características de los factores de producción, diferenciando factores básicos (recursos naturales, clima, localización, topografía y población) y factores de vanguardia (mano de obra calificada, conocimientos tecnológicos). Estos últimos, afirma, son los de mayor relevancia para la determinación de la ventaja competitiva, pues son producto de la inversión tanto de la misma empresa como de terceros, e incluso del Gobierno.

La definición de competitividad de Michael Porter distingue tres elementos importantes: la empresa, la productividad y la localización.

**La empresa.** Los principales actores en la construcción de la competitividad son las empresas y no las naciones. Por ello, la de los países se basa en la capacidad que aquellas tienen para competir. En la perspectiva del autor, la base de la consecución de los fines a obtener descansa en la capacidad y sofisticación de las organizaciones que operan en el país. Ninguno es competitivo si sus empresas no lo son y, para ello, más allá de poseer eficiencia operativa, éstas deben tener un posicionamiento de estrategias único. El Estado no crea riqueza, pero puede



ayudar a crearla, de la misma forma en que puede alentar o desalentar la competitividad del país. Su papel en la economía cambia y se ajusta a las circunstancias particulares de cada país a través del tiempo.

**La productividad.** Está determinada por la eficacia con que un país usa sus recursos. En el sentido amplio, resulta de la calidad y singularidad de los bienes y servicios, y de la eficiencia con la que se producen. La capacidad innovadora de los países es, en última instancia, lo que sustenta el crecimiento de la productividad. Como consecuencia, los países más competitivos muestran un gran dinamismo en el comercio internacional de bienes y servicios, flujos crecientes de inversión directa al país y al extranjero y, sobre todo, un alto grado de innovación tecnológica.

**Localización.** La conceptualización geográfica incide de manera directa en productividad de la organización, desde un marco funcional en la que se encuentra, debido a la intensificación de la globalización. Las empresas, conforme se internacionalizan, tienen que tomar decisiones respecto a la localización de sus mercados, sus plantas industriales, laboratorios de investigación y *outsourcing*, entre otros. Las empresas están orientadas a elegir la localización que garantice el mejor ambiente de negocios para lograr sus objetivos estratégicos, y que les asegure un alto nivel de rentabilidad en el largo plazo.

### 2.3 Determinantes de la competitividad

Se plantea que la competitividad está determinada por la dotación de los recursos con los que cuenta el país, los aspectos macroeconómicos que la caracterizan, así como los microeconómicos que la sustentan (Chiri, 2011). El conjunto de recursos naturales, la localización geográfica, el legado histórico cultural, entre otros, constituyen el *endowment* (dotación de recursos) con los que cuenta un país.

En este sentido, Porter distingue los países con una prosperidad “heredada” y los que tienen una “creada”. Entre los primeros se encuentran generalmente los países ricos en recursos naturales como, por ejemplo, Tanzania, en África, y Qatar, en Medio Oriente. Los segundos se conforman por los países que tienen una prosperidad “creada” basada en las fortalezas de sus economías, como Singapur y Japón.

### 2.4 Macroeconomía de la competitividad

La macroeconomía de la competitividad crea el potencial para una alta productividad y fija el contexto para la competitividad. Los aspectos macroeconómicos

**Figura 1.** Determinantes de la competitividad



Fuente: Porter, 1990.

que influyen en el nivel que alcanza un país se encuentran en dos áreas: la infraestructura social e institucional y las políticas macroeconómicas.

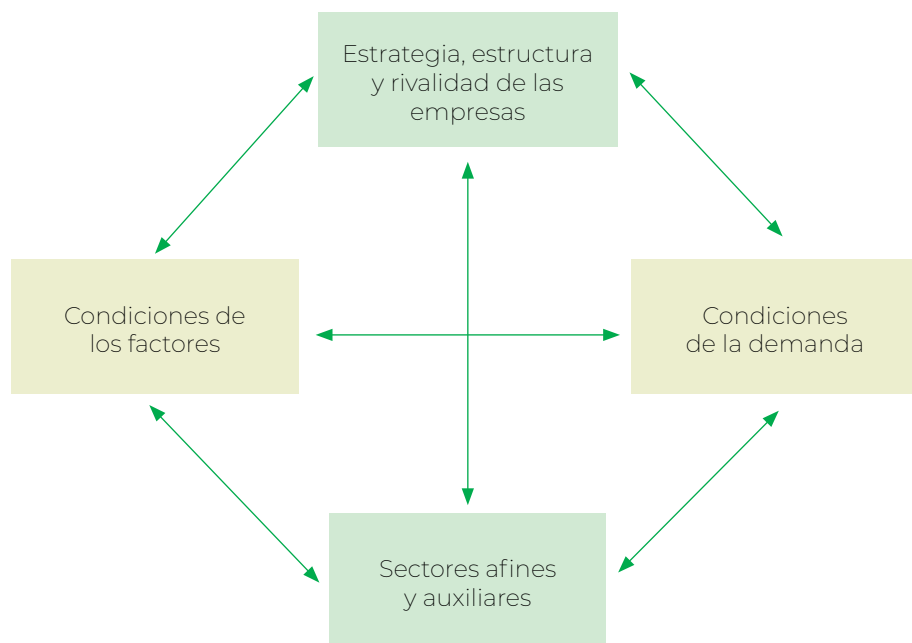
## 2.5 Microeconomía de la competitividad

El ambiente microeconómico en el que las empresas desarrollan sus prácticas operativas, donde diseñan e implementan sus estrategias y el dinamismo de la competencia local, es clave para un país.

La microeconomía de la competitividad está determinada por el comportamiento de tres elementos: la calidad del ambiente de los negocios, el estado del desarrollo del *cluster* y el nivel de sofisticación de las operaciones y estrategias de las empresas.

Los entornos nacionales ejercen una influencia poderosa en la ventaja competitiva de las empresas y las industrias. En ese sentido, el modelo del diamante de Michael Porter (1990) está basado en un análisis de las características del entorno nacional y de cuatro variables que influyen en las empresas para establecer y mantener la ventaja competitiva en los mercados internacionales. Este modelo, entonces, representa una teoría económica moderna de la ventaja competitiva de las naciones.

**Figura 2.** Los determinantes de la ventaja competitiva



Fuente: Porter, 1990.

## 2.6 El modelo de diamante de la competitividad de Michael Porter

Teóricamente, Porter analiza la competitividad de las empresas en el llamado “diamante de la competitividad”, en el que cuatro determinantes interrelacionados (condiciones de los factores de producción; condiciones de la demanda; estrategia, estructura y rivalidad; sectores afines y de apoyo) y dos elementos exógenos (gobierno y azar) determinan su potencial competitivo.

**Condiciones de los factores de producción.** Son aquellos que establecen las bases para la actividad de las empresas y se constituyen por el conjunto de recursos humanos y materiales: la localización, población educada y capacitada, infraestructura física, infraestructura administrativa, infraestructura científica y tecnológica, recursos naturales, la información para los negocios y la disponibilidad de capital, entre otros.

Lombana y Rosas (2008) exponen que las condiciones de los factores siguen la línea de las teorías neoclásicas en las cuales las empresas tienen ventaja comparativa por el capital, tierra y/o trabajo que poseen (o en los que hay intensidad de utilización, de acuerdo con Hecksher-Ohlin). El avance en la teoría de la ventaja competitiva se encuentra en la inclusión de la tecnología como factor de producción, que hace que los anteriores factores puedan desarrollarse e incluso se creen nuevos.

Estos elementos son cruciales para que las empresas actúen en un ambiente favorable. La disponibilidad o carencia de factores hacen que el ambiente para la empresa sea atractivo o desalentador. Los retos de los países son: aumentar la eficiencia de la utilización de los ya existentes, ampliar su disponibilidad, elevar permanentemente a los más altos estándares y fortalecer la especialización de los mismos alrededor de los *clusters* (Chiri, 2011). De acuerdo con Porter, los factores de producción recogidos en el diamante son agrupados en cinco categorías básicas:

1. Recursos humanos: Representan la cantidad, la capacidad y el coste del personal, teniendo en cuenta la ética y las horas normales de trabajo.
2. Recursos físicos: Constituyen la abundancia, la calidad, la accesibilidad, el coste de la tierra, el agua, las condiciones climáticas, el tamaño y la localización. La localización afecta al coste del transporte y la factibilidad en los intercambios culturales y empresariales.
3. Recursos del conocimiento: Integran el *stock* de conocimiento científico, técnico y de mercado sobre bienes y servicios que tiene una nación. Estos recursos proceden de las universidades y centros de investigación públicos o privados, instituciones estadísticas públicas, asociaciones comerciales, bases de datos.
4. Recursos de capital: Representan la cantidad y el coste de capital disponible para realizar inversiones en la industria.
5. Infraestructura: Abarca el tipo, la calidad y el coste de uso de la infraestructura disponible que afecta a la competencia, incluyendo el sistema de transportes, el sistema de comunicaciones, el correo, el envío de paquetes postales, los pagos o transferencias de fondos, los servicios sanitarios y otros.

Cada uno de estos factores difiere entre empresas, industrias y naciones.

**Condiciones de la demanda.** Está compuesta por las particularidades del mercado local y el comportamiento del consumidor, es decir, la sofisticación de la demanda interna por la cual las empresas obtienen la calidad y/o eficiencia

de sus productos. Entre más sofisticada y exigente por la calidad de los bienes y servicios, las empresas o industrias están forzadas a ser más competitivas. Los desafíos de los países son: mejorar la calidad de la demanda, elevar los estándares de calidad, seguridad, salud y medio ambiente, utilizar las compras del Gobierno para estimular la oferta de productos de alta calidad, apoyar la formación de *clusters* en áreas donde la demanda local es relativamente avanzada debido a razones geográficas y culturales, y establecer políticas que alienten la demanda temprana de productos avanzados y con un alto grado de innovación. Es importante entender que, a medida que los compradores son más sofisticados, las empresas están obligadas a mejorar en tecnología e innovación en sus procesos, productos y servicios. Porter (1990) puntualiza tres atributos:

1. La composición de la demanda.
2. El tamaño de la demanda y el patrón de crecimiento.
3. La internacionalización de la demanda.

**Los sectores afines y auxiliares.** El tercer determinante de la competitividad es la búsqueda de la cooperación de las empresas como cadenas productivas. Este análisis se puede ver a nivel intersectorial en las empresas (análisis horizontal), y cadena de valor, si se hace intersectorialmente (análisis vertical).

La representación del conjunto de proveedores de insumos, maquinaria, servicios y tecnología, entre otros factores, así como la presencia de empresas de sectores afines y relacionados, reflejan la fortaleza del mercado local y favorecen la competitividad. Un territorio es más competitivo cuanto más se aleja de la noción de empresas aisladas, y se orienta a cadenas productivas.

El reto de los países es atraer proveedores internacionales que influyan en la sofisticación, en la mejora de maquinarias y servicios, en desarrollar estas cadenas productivas emergentes y en establecer programas de apoyo para mejorar la base de los proveedores locales.

Porter (1990) afirma que la interacción de estos cuatro elementos es dinámica y exige su constante desarrollo para llevar al país, a la región y a la ciudad a niveles superiores de competitividad.

**Estado del desarrollo de los *clusters*.** Este modelo de desarrollo se estructura como un grupo interconectado de empresas e instituciones asociadas, ligadas por elementos comunes y complementarios ubicadas en cierta proximidad geográfica y que se dedican a la producción de determinados bienes o a la

prestación de servicios. Desde este enfoque se constituye una forma alternativa de ver la economía.

Tradicionalmente, la organización de la economía es sectorial y, consecuentemente, también lo es la política económica. La propuesta de Porter sugiere ver la organización y la política económica a través de estas estructuras de desarrollo ambiental y económico, ya que reflejan mejor la racionalidad económica.

La interacción de empresas que producen bienes similares o complementarios en espacios geográficos específicos es casi una manera natural de comportamiento empresarial. En este sentido, Porter coloca el “modelo de producción” como unidad de análisis central de la competitividad.

**Sofisticación de las operaciones y estrategias de las empresas.** La competitividad de un determinado sector es consecuencia de la convergencia de los modos de dirección y de organización prevalecientes en cada país y de sus fuentes de ventajas competitivas. De acuerdo con Chiri (2011), para llegar a niveles altos de competitividad internacional, las empresas pasan de la eficiencia operacional al posicionamiento estratégico. La primera consiste en asimilar, adaptar y expandir las mejores prácticas del mercado, es un paso necesario para obtener mayor rentabilidad, pero no suficiente. Las organizaciones más competitivas crean un posicionamiento estratégico único y sostenible.

### 3. Metodología para medir la competitividad en el departamento del Vaupés

El desarrollo de la presente investigación se estructuró tomando en consideración el método deductivo inductivo, partiendo de una problemática general asociada al componente de desarrollo bajo la política pública de competitividad y articulándola a la estructura de la región Orino-Amazonia, bajándola de manera específica al área de estudio: la del departamento del Vaupés. Es importante comprender que ésta se definió bajo la relación de información primaria, secundaria y terciaria, la cual permitió, a partir de la consulta de estudios, informes, documentos técnicos, confrontar la realidad de la región mediante visitas de campo al área de estudio y la entrevista con los diferentes actores del proceso como fueron comunidades indígenas, sector productivo, entes de decisión a nivel del Gobierno central, regional y departamental.

Bajo este esquema metodológico se estableció la relación de causalidad entre las variables dependientes e independientes definiendo los diferentes componentes del modelo propuesto como resultado, que a su vez sirvieron de instru-

mentos y herramientas para la construcción a nivel de propuesta del modelo de competitividad ambiental departamental. En este sentido se explicarán a continuación los modelos y momentos metodológicos trabajados.

La metodología empleada comprende tres momentos. En el primero se realizará un estudio exploratorio mediante la consulta de fuentes documentales, para obtener un referente teórico en materia de la competitividad. El segundo comprenderá la parte sustancial de la investigación, correspondiente al trabajo de campo mediante un estudio descriptivo cuantitativo que permita caracterizar la situación actual de competitividad del departamento. Un último momento corresponde a un estudio cualitativo, con el cual se buscará identificar las relaciones entre las variables y los factores competitivos para el Vaupés.

De acuerdo con Rojas, Romero y Sepúlveda (2000), la medición de la competitividad involucra el empleo de indicadores y factores que permiten diagnosticar el contexto económico a nivel sectorial, nacional o internacional donde se desarrolla la actividad económica, determinando aquellos elementos que le suman o restan competitividad. Al medir la competitividad, se enfatiza en los indicadores utilizados, así como en los resultados obtenidos.

### 3.1 Índice departamental de competitividad (IDC)

A nivel nacional, el índice departamental de competitividad (IDC) es la metodología empleada para analizar la dinámica empresarial en el territorio colombiano (Consejo Privado de Competitividad, 2014) y está basado en la metodología del índice global de competitividad del Foro Económico Mundial (WEF, por su sigla en inglés). Brinda elementos que permiten analizar la dinámica individual de los territorios en función de cada uno de los pilares, subpilares y variables analizadas y, por tanto, dimensionar el grado de convergencia de cada departamento frente a las mejores prácticas en el ámbito nacional.

De acuerdo con el Consejo Privado de Competitividad (2014), el IDC está compuesto por tres factores —los cuales se retoman más adelante por ser parte del estudio de competitividad adelantado a nivel nacional— que, a su vez, contienen diez pilares:

1. Condiciones básicas: Se incluyen seis pilares relacionados con instituciones, infraestructura, tamaño del mercado, educación básica y media, salud y medio ambiente.
2. Eficiencia: Contiene dos pilares relacionados con educación superior y capacitación, y eficiencia de los mercados.

**Tabla 1.** Departamentos incluidos en el índice departamental de competitividad

Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Nariño Sucre	Cesar Guajira Meta	Boyacá Caldas Cauda Córdoba Huila Magdalena Norte de Santander Quindío Risaralda Tolima	Antioquia Atlántico Bogotá D.C. Bolívar Cundinamarca Santander Valle del Cauca

Fuente: Consejo Privado de Competitividad, 2014.

3. **Sofisticación e innovación:** Está compuesto por dos pilares que miden la sofisticación y diversificación productivas, así como la innovación y la dinámica empresariales.

El IDC mide el desempeño competitivo de 21 departamentos y la ciudad de Bogotá, debido a la no disponibilidad de variables claves para los demás departamentos. Las regiones incluidas en el IDC fueron clasificadas en cuatro etapas, de acuerdo con su nivel de desarrollo, con el fin de diferenciar la importancia de los factores y pilares en el nivel de competitividad departamental.

La tabla 1 muestra los departamentos incluidos en el análisis de la competitividad realizado por el Consejo Privado de Competitividad.

Pese a las restricciones de información, el IDC correspondiente al año 2014 aporta la construcción de un indicador que integra a la totalidad de los 32 departamentos del país, por medio de un anexo técnico en su informe anual. De esta manera, se puede exponer la situación competitiva del departamento del Vaupés de acuerdo a algunas modificaciones en los pilares analizados en la medición de la competitividad.



**Tabla 2.** Factor “Condiciones básicas”: 1, 2 y 3,

<b>Factor 1. Condiciones básicas</b>		
<b>Pilar 1. Instituciones</b>	<b>Pilar 2. Infraestructura</b>	<b>Pilar 3. Tamaño del mercado</b>
<p>Desempeño administrativo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Eficacia, requisitos legales, capacidad administrativa y gestión.</li> </ul> <p>Gestión fiscal:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Autonomía fiscal.</li> <li>- Capacidad local de recaudo.</li> <li>- Capacidad de ahorro.</li> </ul> <p>Transparencia:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Índice de gobierno abierto.</li> </ul> <p>Seguridad y justicia:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tasa de homicidios.</li> <li>- Tasa de secuestros.</li> <li>- Tasa de extorsión.</li> <li>- Jueces por cada 100 mil habitantes.</li> <li>- Eficiencia de la justicia.</li> <li>- Productividad de jueces.</li> <li>- Acceso a mecanismos alternativos de justicia.</li> <li>- Facilidad para hacer cumplir los contratos.</li> </ul>	<p>Servicios públicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cobertura acueducto.</li> <li>- Continuidad acueducto.</li> <li>- Cobertura energía eléctrica.</li> <li>- Costo energía eléctrica.</li> </ul> <p>Conectividad:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Red vial primaria pavimentada.</li> <li>- Red vial secundaria pavimentada.</li> <li>- Porcentaje de vías pavimentadas en buen estado.</li> <li>- Costo de transporte terrestre a puertos.</li> <li>- Costo de transporte terrestre a mercado interno.</li> <li>- Pasajeros movilizados vía aérea.</li> <li>- Población conectada vía aérea.</li> </ul> <p>Infraestructura TIC:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Penetración internet banda ancha fijo.</li> <li>- Ancho de banda de internet.</li> </ul>	<p>Mercado interno:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tamaño del mercado interno.</li> </ul> <p>Mercado externo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tamaño del mercado externo.</li> </ul>

Fuente: Adaptado del IDC 2014 (Consejo Privado de Competitividad, 2014).

**Tabla 2.** Factor “Condiciones básicas”: 4, 5 y 6

<b>Factor 1. Condiciones básicas</b>		
<b>Pilar 4. Educación básica y media</b>	<b>Pilar 5. Salud</b>	<b>Pilar 6. Medio ambiente</b>
<p>Cobertura en educación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cobertura neta preescolar.</li> <li>- Cobertura neta educación primaria.</li> <li>- Cobertura neta educación secundaria.</li> <li>- Cobertura neta educación media.</li> <li>- Deserción escolar educación básica y media.</li> </ul> <p>Calidad en educación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Puntaje pruebas Saber 11 (Lenguaje, Matemáticas y Ciencias).</li> <li>- Puntaje pruebas Saber 5 (Lenguaje, Matemáticas y Ciencias).</li> <li>- Espacio en aulas educativas de establecimientos oficiales.</li> <li>- Calidad de los docentes de colegios oficiales.</li> <li>- Brecha entre colegios públicos y privados.</li> <li>- Relación estudiantes-docentes.</li> <li>- Inversión en calidad educación básica y media.</li> </ul>	<p>Cobertura en salud:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cobertura de aseguramiento en salud.</li> <li>- Camas hospitalarias totales.</li> <li>- Camas de servicios especializados.</li> <li>- Cobertura de vacunación triple viral.</li> </ul> <p>Primera infancia:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mortalidad infantil.</li> <li>- Mortalidad por anemia.</li> <li>- Inversión protección integral a primera infancia.</li> </ul> <p>Calidad en salud:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inversión en salud pública.</li> <li>- Mortalidad materna.</li> <li>- Esperanza de vida al nacer.</li> </ul>	<p>Medio ambiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Disposición adecuada de residuos sólidos.</li> <li>- Biodiversidad.</li> <li>- Empresas certificadas ISO14001.</li> <li>- Deforestación.</li> <li>- Prevalencia de desastres naturales.</li> <li>- Índice de gestión de riesgos.</li> </ul>

Fuente: Adaptado del IDC 2014 (Consejo Privado de Competitividad, 2014).

### 3.2 Aproximación de la medición de competitividad para 32 departamentos

Con el fin de medir la competitividad en los 32 departamentos del país, el IDC incluye una revisión de 63 variables —las cuales serán mencionadas a continuación—, que permite hacer una aproximación de la realidad competitiva de los territorios no incluidos en el IDC 2014 debido a limitaciones en la disponibilidad de la información (Consejo Privado de Competitividad, 2014). Además de los 32 departamentos antes mencionados, se incluyó a Bogotá y Cundinamarca como un solo ente territorial.

Las diferencias de este ejercicio con relación al IDC 2014, para 22 regiones que se analizaron, son las siguientes:

**Factor “Condiciones básicas”.** Los cambios se evidencian en el pilar “Instituciones”, que reduce sus variables de trece a diez. Este pilar pierde las siguientes variables: tasa de secuestro, tasa de extorsión y facilidad para hacer cumplir los contratos.

El pilar “Infraestructura” se compone solamente de seis variables, debido a la no disponibilidad para todos los departamentos de las siguientes: continuidad acueducto, costo energía eléctrica, red vial primaria pavimentada, red vial secundaria pavimentada, porcentaje de vías pavimentadas en buen estado, costo de transporte terrestre a puertos y costo de transporte terrestre a mercado interno.

El pilar “Educación básica y media” se compone de diez variables al no estar disponibles las siguientes: espacio en aulas educativas de establecimientos oficiales y brecha entre colegios públicos y privados.

El pilar “Salud” se compone de nueve variables, ya que no está disponible la de mortalidad materna.

El pilar “Medio ambiente” se compone de cinco variables, pues no está disponible la de deforestación.

**Factor “Eficiencia”.** El pilar “Educación superior y capacitación” consta de seis variables, al ser eliminadas las siguientes por no estar disponibles: deserción escolar en educación superior y puntaje Pruebas Saber Pro.

El pilar “Eficiencia de los mercados” cuenta con cinco variables, al no estar disponibles las siguientes: carga tributaria para las empresas, facilidad para abrir una empresa, número de pagos de impuesto por año, facilidad para registrar propiedades, facilidad permisos de construcción, formalidad laboral, tasa global de participación laboral, desempleo, brecha de participación laboral entre hombres y mujeres, subempleo por competencias y cobertura de seguros.

**Tabla 3.** Factor “Eficiencia”

<b>Factor 2. Eficiencia</b>	
<b>Pilar 7. Educación superior y capacitación</b>	<b>Pilar 8. Eficiencia de los mercados</b>
<p>Cobertura en educación superior:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Cobertura bruta educación superior.</li> <li>-Graduados en posgrados.</li> <li>-Cobertura formación técnica y tecnológica.</li> <li>-Deserción escolar en educación superior.</li> </ul> <p>Calidad en educación superior:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Puntaje pruebas Saber Pro.</li> <li>-Calidad de docentes de educación superior.</li> <li>-Cobertura instituciones de educación superior con acreditación de alta calidad.</li> </ul> <p>Bilingüismo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Dominio de segundo idioma.</li> </ul>	<p>Eficiencia mercado de bienes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Grado de apertura comercial.</li> <li>-Carga tributaria para las empresas.</li> <li>-Facilidad para abrir una empresa.</li> <li>-Número de pagos de impuestos por año.</li> <li>-Facilidad para registrar propiedades.</li> <li>-Facilidad permisos de construcción.</li> <li>-Consultas y trámites en línea.</li> </ul> <p>Eficiencia mercado laboral:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Formalidad laboral.</li> <li>-Tasa global de participación laboral.</li> <li>-Desempleo.</li> <li>-Brecha de participación laboral entre hombres y mujeres.</li> <li>-Subempleo por competencias.</li> </ul> <p>Desarrollo mercado financiero:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Cobertura establecimientos financieros.</li> <li>-Índice de bancarización.</li> <li>-Cobertura de seguros.</li> <li>-Saldo de cuentas de ahorro.</li> </ul>

Fuente: Adaptado del IDC 2014 (Consejo Privado de Competitividad, 2014).

Las tablas 2, 3 y 4 muestran los tres factores y pilares analizados en el IDC realizado por el Consejo Privado de Competitividad en el año 2014.

Es interesante observar que en este análisis el componente descriptivo del agua no toma como referencia para ninguno de los departamentos de la Orino-Amazonia, y mucho menos para el caso del departamento del Vaupés, la relación que las comunidades tienen con ella ni su concepción cosmogónica, que quizás desde esa estructura social resulta importante para entender de manera integral la relación entre el medio ambiente y sus modos de producción.

Dentro del trabajo de campo en la región se pudo evidenciar que para su población, en su mayoría indígena, el concepto de “competitividad” es completamente inentendible a tal punto de que no lo acuñan en ninguna de sus

**Tabla 4.** Factor “Sofisticación e innovación”

<b>Factor 3. Sofisticación e innovación</b>	
<b>Pilar 9. Sofisticación y diversificación</b>	<b>Pilar 10. Innovación y dinámica empresarial</b>
Sofisticación: -Sofisticación de exportaciones. Diversificación: -Diversificación de mercados de destino de exportaciones. -Diversificación de la canasta exportadora.	Investigación: -Investigación de alta calidad. -Revistas indexadas. Inversión en CTI y patentes: -Inversión en ACTI. -Patentes y diseños industriales. Dinámica empresarial: -Tasa de natalidad empresarial neta. -Densidad empresarial. -Participación de medianas y grandes empresas.

Fuente: Adaptado del IDC 2014 (Consejo Privado de Competitividad, 2014).

20 lenguas o dialectos. La razón de fondo es que su producción está mediada por procesos comunitarios, donde el modelo de la competencia no se acuña de forma económica ni social.

#### 4. Análisis de la competitividad empresarial en el departamento del Vaupés

Para evaluar la competitividad en el departamento del Vaupés, el IDC se basa en las siguientes variables:

1. PIB total (miles de millones).
2. PIB total excluyendo minas y energía (miles de millones).
3. PIB per cápita (pesos).
4. PIB per cápita excluyendo minas y energía (pesos).
5. Valor de las exportaciones de media y alta tecnología per cápita (US\$).

Sin embargo, la escasa información presentada por el Consejo Privado de Competitividad no permite medir de manera satisfactoria la competitividad empresarial en el departamento, puesto que no hay una metodología eficaz para hacerlo en el área objeto de estudio.

De acuerdo con ICESI (2009), para saber si una empresa es competitiva o no, es necesario un análisis de acuerdo a los siguientes aspectos:

1. El nivel en el que se encuentra la empresa con respecto a las dimensiones de la competitividad, interna y externa.
2. Determinación de los factores claves de competitividad, tangibles o intangibles, de carácter externo o interno (p. ej., factores tangibles externos pueden ser el PIB o la inflación, y los intangibles internos pueden ser internacionalización o innovación, entre otros).
3. Las fuentes de ventaja competitiva que hacen referencia a las condiciones estructurales y políticas, si son externas a la organización, o a las condiciones competitivas y estratégicas, si pertenecen a los procesos internos de la organización.

Una vez hecho el análisis, se define la naturaleza de los agentes que intervienen en la competitividad de la empresa, es decir, si son internos o externos. Éstos no sólo ayudan a medir el nivel de competitividad, sino que también permiten reforzar o cambiar los aspectos necesarios para alcanzar mayores niveles.

El análisis permite conocer de forma detallada lo que está pasando a nivel interno y externo de la organización. Identificar las diferentes oportunidades y amenazas (externo), las debilidades y fortalezas (interno) (DOFA) de la empresa, fomenta la proyección a futuro para alcanzar las metas de manera efectiva y eficiente. “Una empresa competitiva, es aquella que es capaz de reaccionar de manera rápida y acertada ante los cambios repentinos del mercado y esta habilidad se logra a través de la observación de los factores” (ICESI, 2009, p. 34). A este respecto, Martínez (2006) afirma que, al medir la competitividad, la “referencia principal para obtener resultados positivos es un alto nivel de producto interior bruto y su tasa de crecimiento”.

En muchos casos, la competitividad es medida a través de las exportaciones, ya que frecuentemente los datos de valor agregado a nivel de sectores o empresas no están disponibles. Las estadísticas de exportación tienen la ventaja de que generalmente reflejan las valoraciones que indican los precios mundiales. Medir la competitividad de esta forma incluye el elemento dinámico del mercado: cambios en la demanda y en la capacidad de aumentar las cuotas.

## 5. Resultados y discusiones: capacidades actuales del departamento a nivel competitivo

De acuerdo con la Corporación Ventures, la tecnología y el conocimiento tienen una naturaleza acumulativa, es decir, que adquiridos previamente condicionan los que serán posteriormente desarrollados o utilizados.

Un plan de negocio que busque un alto impacto regional debe reconocer las necesidades y capacidades de personas o empresas en su departamento, y desarrollar los productos, capacidades o tecnologías que las satisfagan. En este aspecto, la competitividad empresarial puede ser medida bajo tres aspectos:

1. Perspectiva social: Se considera que las personas que han satisfecho sus necesidades básicas y cuentan con conocimientos o entrenamientos vocacionales están en mejor capacidad de enfrentar y resolver problemas complejos.
2. Perspectiva económica: Las zonas en las que la población tiene bajos ingresos deben promover el desarrollo de bienes o servicios asequibles a sus mercados.
3. Perspectiva física: Está relacionada con toda la infraestructura (vías, vías férreas, puertos, instalaciones industriales, servicios públicos) que soportan la actividad económica en el departamento.

Para una independencia económica y tecnológica en el departamento del Vaupés, se debe utilizar el indicador de proporción del déficit de balanza comercial/ PIB departamental. Éste debe interpretarse en conjunto con el tamaño del PIB total o el PIB per cápita del departamento de la siguiente manera:

1. Si la región tiene un PIB bajo y una balanza comercial muy baja, la interpretación más confiable es que la economía regional no es lo suficientemente avanzada o dinámica para generar flujos de comercio exterior.
2. Si la región tiene un PIB alto y una balanza comercial deficitaria (la diferencia entre exportaciones e importaciones es menor que cero), indica que esa economía depende en gran medida de insumos producidos en el extranjero y que está gastando la proporción calculada de su ingreso en adquirir esos productos.

## 6. Consideraciones finales

De la presente investigación se desprende una serie de consideraciones de mayor relevancia, las cuales valoran el grado de coherencia de los resultados obtenidos a través de la indagación de los distintivos marcos y referentes de los objetivos planteados.

Actualmente, Colombia cuenta con un Sistema Nacional de Competitividad consolidado en la política de competitividad y productividad en Colombia (Documento CONPES 3527), en el cual participan la academia, las empresas, los trabajadores, las regiones y las autoridades públicas, y cuyo propósito general consiste en volver al país más competitivo.

La ventaja competitiva es todo aquello que da superioridad a una empresa o país sobre los rivales. La principal diferencia entre ventaja comparativa y ventaja competitiva consiste en que la primera se deriva de la utilización de los recursos naturales, en tanto que la segunda resulta de la utilización de conocimiento (tecnología e innovación). Es decir, la ventaja comparativa es cuando se aprovechan los recursos de la naturaleza sosteniblemente (minerales, suelos, agua, entre otros), con eficiencia de capital y de mano de obra, mientras que en las ventajas competitivas la eficiencia proviene de la aplicación del conocimiento traducido en innovación.

Las ventajas competitivas necesitan actualizarse constantemente debido a los procesos de imitación por parte de los competidores. En este sentido, la innovación influye en la nación como lo hacen sus industrias en su promoción. La contribución de la teoría del diamante amplía la formulación de estrategias en un entorno internacional y, además, permite replantear estrategias en un contexto dinámico, destacando la innovación y la mejora como fuentes de creación y mantenimiento.

El índice departamental de competitividad (IDC) brinda elementos que permiten analizar la dinámica individual de los territorios colombianos a nivel competitivo, en función de cada uno de los pilares, subpilares y variables analizadas por el mismo. Sin embargo, debido a la no disponibilidad de variables claves para algunos departamentos —entre ellos el de Vaupés—, no es posible analizar con detalle su dinámica individual competitiva.

Pese a las restricciones de información, el IDC correspondiente al año 2014 integra en la medición a la totalidad de los 32 departamentos del país por medio de un anexo técnico en su informe anual. De esta manera se puede exponer la situación competitiva del departamento del Vaupés, de acuerdo a algunas modificaciones realizadas en los pilares analizados. Sin embargo, dicho anexo no emplea datos de años recientes.



Para evaluar la competitividad en el departamento del Vaupés, el IDC tomó en cuenta las siguientes variables: PIB total (miles de millones), PIB total excluyendo minas y energía (miles de millones), PIB per cápita (pesos), PIB per cápita excluyendo minas y energía (pesos), valor de las exportaciones de media y alta tecnología per cápita (US\$). No obstante, la escasa información presentada por el Consejo Privado de Competitividad no permite medir de manera satisfactoria la competitividad empresarial en el departamento, puesto que no hay una metodología eficaz para ello.

Al medir la competitividad, la referencia principal para obtener resultados positivos es un alto nivel de producto interior bruto y su tasa de crecimiento. Pero quizás lo más importante de este análisis es que todo el modelo de competitividad estructurado en nuestro país no responde a las necesidades regionales de la Orino-Amazonia, y mucho menos a un territorio como el del departamento del Vaupés, donde su comunidad de origen indígena responde a una interpretación del territorio muy diferente a la que tenemos en otras regiones del país. Ellos parten de su visión cosmogónica, de tipo politeísta, donde todas sus acciones de desarrollo están mediadas por sus sabedores: personas que, desde la estructura social, cumplen una función de vital importancia como es la de ponerse en contacto con sus dioses y acordar las condiciones sobre las cuales se deben estructurar sus asentamientos humanos, definiendo entre otras muchas cosas el tamaño de sus poblaciones en relación con sus recursos naturales.

Esto quiere decir que sus poblaciones están ligadas a su riqueza ambiental y su relación con agua, suelo y tierra, a partir de la disposición de las parcelas a sus alrededores, llamadas por ellos “chagras”. Estas estructuras de producción se dividen en doce áreas. Ante la pobreza de sus suelos, cada una de ellas corresponde a la producción de cada mes, lo que los lleva a estar abonado, cuidado y fortaleciendo las zonas de no producción para garantizar su subsistencia y seguridad alimentaria.

Desde esta visión tenemos que entender otra coyuntura: la del río Vaupés, denominada “río Negro”, que en su lenguaje son aguas con niveles de acidez, lo que hace que su parte limnológica e ictiológica sea muy pobre. Sólo en temporada de invierno se logra tener algo de producción piscícola, lo que hace más difícil toda la relación de subsistencia.

Por esta razón, estas comunidades, en sus malokas, en compañía de sus consejos de ancianos y con la presencia de sus representantes sociales y su sabedor, construyen lo que se denomina el “calendario ecológico”, que no es otra cosa que un decálogo de producción para todo el año, donde mezclan sus conoci-

mientos ancestrales, sociales, económicos y ambientales, dirigidos a garantizar la subsistencia de sus comunidades.

Toda esta planeación se hace con base en la relación que se tiene con el agua como fuente de vida, pues para ellos el origen de ésta se encuentra ahí y relacionan su concepción milenaria entre la *pacha mama*, que es la tierra, y la *pacha tata*, que es el agua, como una forma de tener balance energético, bajo el precepto de que “si el hombre está en paz con la naturaleza, está en paz con sus dioses y consigo mismo”. Esta visión rompe de manera sistémica con la que se tiene de competitividad en la política pública desde el centralismo del Estado colombiano.

De acuerdo al IDEAME, esta región posee una oferta hídrica seis veces mayor a su demanda, lo que la convierte en un área bioestratégica. Sin embargo, se promueve un desarrollo basado en el extractivismo y en la agricultura mecanizada, sin tomar como referencia las costumbres e interpretación sostenible de estas comunidades de su entorno ambiental, lo que no sólo vulnera su desarrollo, sino el equilibrio que todo ecosistema requiere desde la física, la química y, por supuesto, su cosmogonía.

## Referencias

- CHIRI, A. (2011). Marco analítico de la competitividad. En Michael E. Porter, *De la teoría a la práctica. Sección I. Fundamentos, origen y evolución de la competitividad*. Editorial Limusa, p. 38 a 47.
- CHO, D.S. Y MOON, H.C. (2000). *From Adam Smith to Michael Porter, evolution of competitiveness theory*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- CONSEJO PRIVADO DE COMPETITIVIDAD. (2014). *Índice departamental de competitividad*. Bogotá D.C.
- CORPORACIÓN VENTURES. (2015). *Ventures*. <http://www.ventures.com.co/index.php/concurso/entrenamiento-y-metodologia/2-uncategorised/65-vaupes-region-norte-occidente.html>
- ICESI, U. (2009). *Universidad ICESI. 10 de febrero de 2009*, p. 34. <http://www.icesi.edu.co/blogs/icecomex/2009/02/10/competitividad-en-las-empresas/>
- LOMBANA, J. y ROZAS, G.S. (2008). Marco analítico de la competitividad. Fundamentos para el estudio de la competitividad regional. *Revista Pensamiento y gestión*, N° 26.
- MARTÍNEZ, J. (2006). *Medición de la competitividad*. Costa Rica.
- MINISTERIO DE COMERCIO, INDUSTRIA Y TURISMO (2004). *Sistemas de indicadores de competitividad para el sector turístico colombiano*. Bogotá D.C.
- PORTER, M. (1991). *La ventaja competitiva de las naciones*. Javier Vergara Editor.
- RAMOS, R. (2001). *Modelos de Evaluación de la Competitividad Internacional. Una aplicación empírica al caso de las Islas Canarias*. (Tesis de grado. Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Islas Canarias).
- ROJAS, P., ROMERO, S. Y SEPÚLVEDA, S. (2000). *Algunos ejemplos de cómo medir la competitividad*. IICA.

## Capítulo 3

# Repensando las políticas de desarrollo regional por cuencas hidrológicas de México bajo el concepto de “cuenca social” o “hidrosocial”

■ Alicia Torres Rodríguez<sup>4</sup>

## 1. Introducción

En los últimos 150 años se consideró a las cuencas hidrográficas como la unidad “natural” y más adecuada para el desarrollo y gestión de los recursos hídricos. Dicho modelo influyó de manera significativa en las relaciones de la sociedad con el agua. No obstante, desde mediados del siglo XIX, las cuencas hidrográficas sufrieron diversas modificaciones en sus sistemas fluviales debido a la construcción de infraestructura hidráulica y de los cambios en los usos del agua de los ríos (Molle, 2006; Warner *et al.*, 2008). Delgadillo y Durán (2012) señalan que éstas se convirtieron en la unidad geográfica fundamental para la planificación y el desarrollo de recursos hídricos, la asignación de derechos y la creación de los marcos regulatorios correspondientes.

En el caso de México, las políticas de desarrollo regional se dieron a partir de cuencas hidrológicas a mediados del siglo XX, las cuales permitían visualizar las relaciones entre sociedad, naturaleza, territorio y gobierno en la gestión del agua con el objetivo de planificar, intervenir y gestionar su uso. En dicha planeación se contemplaba el desarrollo económico y social, para lo cual se realizaron proyectos que distinguían a los actores políticos y sociales locales y, con ello, los diferentes sectores económicos de las regiones hidrológicas: agrícolas,

---

4 Doctora en Ciencias Sociales. Profesora-investigadora del Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades de la Universidad de Guadalajara. [atorres59@gmail.com](mailto:atorres59@gmail.com).

urbanos e industriales. Además, estas cuencas rebasaban los límites político-administrativos, pues abarcaban por lo general varios estados y municipios de la República mexicana.

Con estas políticas se reconstruyeron espacios naturales, reconfigurando los espacios territoriales de las cuencas a partir del uso y distribución de los recursos hídricos por sectores económicos, así como a consecuencia de los trasvases intercuenca construidos para el abastecimiento de agua a las grandes ciudades como México y Guadalajara, que hasta la actualidad se alimentan de la cuenca conformada por el río Lerma, el lago de Chapala y el río Santiago (cuenca Lerma-Chapala-Santiago).

Por otra parte, no todas las localidades poseen un curso de agua directamente asociado a ellas. Por ello se ven en la necesidad de extraer el agua de acuíferos subterráneos a diferentes niveles, los cuales muchas veces pueden estar sobrexplotados o rebasados por el crecimiento urbano, poblacional e industrial. Así, el suministro se completa mediante trasvases de otras cuencas a través de la construcción de acueductos.

A nivel mundial, la gestión integral de recursos hídricos (GIRH) promueve el desarrollo y manejo coordinados del agua, la tierra y otros recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social. Es un modelo seguido a nivel planetario y ha derivado en políticas socioeconómicas y ambientales. Este enfoque se ha considerado utópico e idealista, ya que involucra procesos que no contemplan cuestiones cruciales como los intereses de los diversos actores sociales que participan en dicha gestión, las diferencias de poder entre ellos o la conflictividad relacionada con el agua. Asimismo, como unidad de gestión y planificación de los recursos hídricos, se antoja insuficiente para garantizar una gestión del agua adecuada en espacios que exceden a las áreas de influencia de los sistemas hídricos —territorios/regiones/ecosistemas—, y que pueda sustentar las necesidades sociales, ambientales, económicas y políticas (Delgadillo y Durán, 2012).

Este capítulo recupera algunos aspectos centrales de diferentes enfoques y disciplinas con los que se ha analizado la gestión del agua y del territorio —históricos, antropológicos, jurídicos, sociales y geográficos— que consideran los elementos simbólicos, culturales, políticos y económicos, y asume una relación dialéctica que concibe al espacio social-territorial como una unidad de gestión del agua (Santos, 1997). La primera parte de este documento presenta una revisión bibliográfica y documental para la discusión y definición de los conceptos clave como el de “cuenca hidrosocial”. La segunda muestra la aplicación de éstos al caso de la gestión del agua por cuencas hidrológicas implementada

en México. En la tercera se discuten sucintamente las políticas de desarrollo regional, con énfasis en el caso de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago. El capítulo cierra con una breve conclusión sobre las ventajas de la planificación por cuencas hidrológicas, e invita a repensar este concepto a partir del de cuencas hidrosociales.

## 2. Metodología

Los conceptos presentados se abordan desde la investigación documental, así como las políticas públicas generadas en México para la gestión regional por cuencas hidrológicas y su aplicación a nivel nacional, sus impactos económicos, sociales y ambientales, y si éstos se corresponden con los nuevos enfoques de desarrollo regional de otros países y la preocupación por el medio ambiente debida a la sobrexplotación de los recursos naturales. A su vez, se presenta la transformación de la cuenca hidrológica más importante del país, que confronta la realidad con la planeación y los resultados esperados. Todo lo anterior nos lleva a formularnos la pregunta: ¿cómo replantear las políticas de desarrollo económico y social del país para incluir a los actores sociales y su interacción con el medio ambiente y el territorio, bajo el concepto de cuencas hidrosociales?

## 3. Discusión teórica sobre el concepto de “cuencas sociales” o “hidrosociales”

Considerar como naturales a los espacios territoriales en la actualidad ya no es acertado. Es necesario considerar que dichos territorios han sido construidos y producidos históricamente a través de procesos en las interfaces entre sociedad, tecnología y naturaleza, y se presentan como resultado de la mediación de estructuras de gobernanza e intervenciones humanas entrelazadas en lo biofísico, lo tecnológico, lo social y lo político. La construcción de estos espacios conlleva procesos de acumulación de recursos a partir, con frecuencia, del despojo a grupos vulnerables de sus medios de subsistencia, lo que genera desigualdades sociales y ambientales (Rutgerd *et al.*, 2016).

En el caso de los sistemas de abastecimiento de agua potable para el consumo humano que se corresponden con el territorio y que, a su vez, conforman áreas, regiones o provincias, guardando relación con su fuente de abastecimiento, almacenamiento (embalse, dique, acueductos) y distribución, ya sea ésta superficial o subterránea, se tienen como parte de la unidad de análisis de cuencas hidrológicas. No obstante, este enfoque no muestra las relaciones de los usuarios del agua fuera de la cuenca hidrológica, por lo que surge un nuevo concepto denominado la “cuenca social” o “hidrosocial”, al cual se le suman los diferentes

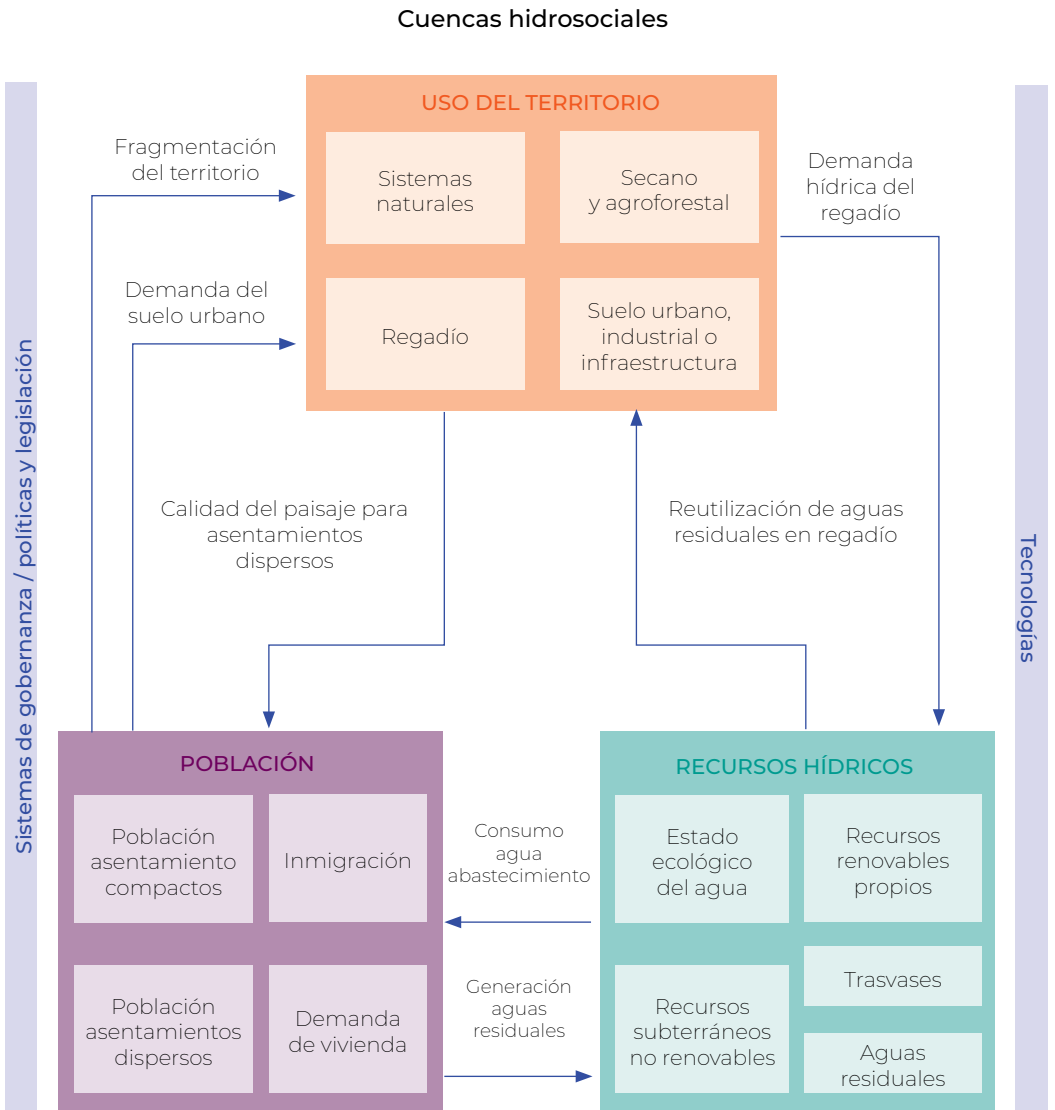
sistemas hídricos de explotación, que consideran, a su vez, los aspectos biofísicos e hidrogeográficos de la cuenca. Asimismo, se reconocen las múltiples y complejas relaciones entre la gente y el agua en la región (SRHYC, MAASP y Gobierno de la Provincia de Córdoba, s.f.).

Damonte Valencia (2015) nos señala que el concepto de “territorio hidrosocial” se conforma de otros tres interrelacionados: “poder hídrico”, “ciclo hidrosocial” y “territorio”.

En cuanto al poder hídrico, menciona que hay múltiples formas y que puede localizarse no sólo en el Estado, sino en actores sociales que por diversas vías logran hacerse del control del agua a través del dominio de la infraestructura hídrica, como grandes represas o canales o por medio del desarrollo de discursos simbólicos, técnicos o expertos gracias a los conocimientos o políticas dominantes que buscan subordinar saberes y manejos locales o a partir de la privatización del agua. A su vez, nos dice que el poder hídrico surge de una combinación de mecanismos. Por ejemplo, el desarrollo de infraestructura y los discursos de eficiencia hídrica que pueden favorecer procesos de despojo hídrico a favor de élites nacionales o globales, y como un proceso histórico entre sociedad y agua.

El ciclo hidrosocial se entiende como la interacción entre el agua y la sociedad de manera diacrónica en que la acción humana (y el poder inherente a ella) reconfigura el ciclo natural del agua y viceversa, que transforma el paisaje hídrico —entendido como un producto social e histórico— y conforma los territorios hídricos. Por tanto, los territorios hidrosociales integran el espacio físico de la cuenca hidrológica con los espacios sociales, definidos a partir del uso que hacen las poblaciones de los recursos hídricos y de la manera en cómo éstas se conectan con el flujo del agua. Esto sucede por la articulación de tres espacios territoriales en el contexto de las interacciones sociopolíticas: los espacios físicos de cuenca (infraestructura y sistemas hídricos), los espacios sociales (usos y manejos materiales y simbólicos que los actores sociales hacen del agua en la cuenca) y los espacios político-administrativos (formados por los discursos de desarrollo territorial y la institucionalidad de regulación hídrica). Es la relación entre el Estado y la sociedad la que define y redefine las prácticas institucionalizadas para el uso y acceso del agua y el territorio, pudiendo ser formales o no formales, es decir, normativas o consuetudinarias, morales o tradicionales, o una combinación de ellas (Douglas, 1986; Damonte Valencia, 2015).

**Figura 1.** Modelación de los sistemas hidrosociales



Fuente: Elaboración propia con datos de Martínez Fernández, s.f.



Podríamos definir, entonces, el concepto de cuenca social o hidrosocial como: el espacio geográfico definido por la cuenca hidrológica más los espacios geográficos hasta donde llegan las aguas por la acción de la gente. Ello deriva en un análisis más complejo e integral al relacionar y vincular la disponibilidad de agua con la demanda de la población, pues dicha definición tiene en cuenta ambiente geográfico (cuencas superficiales), agua subterránea y acciones antrópicas (pasadas y presentes), como acueductos o embalses, que definen de alguna manera los límites de abastecimiento de una región determinada. Así, para estas unidades o sistemas hídricos de explotación se consideran criterios físicos (cuenca hidrológica, hidrogeología, localización, altura topográfica y relieve) y criterios de explotación (fuente de abastecimiento, almacenamiento y distribución) (SRHYC, MAASP y Gobierno de la Provincia de Córdoba, s.f.). Lo anterior permite analizar los sistemas de gobernanza que afectan a un sistema de cursos de agua, de ahí la importancia de los actores sociales al construir territorios hidrosociales en un contexto de competencia por el recurso hídrico.

#### 4. Las cuencas hidrográficas e hidrológicas en México desde el enfoque de cuencas hidrosociales

Como se señaló párrafos arriba, la gestión de los recursos hídricos por cuencas ha transitado de cuencas hidrográficas a cuencas hidrológicas, aunque en varios países se sigue con el primer enfoque, y en otros se ha establecido el segundo haciendo uso a su vez de las aguas subterráneas ubicadas en los espacios socio-territoriales o unidades de gestión del agua. No obstante, ambos no consideran a éstas desde el uso extensivo ni la acción de la gente sobre ellas dentro de un marco de gobernanza del agua ante las problemáticas socioeconómicas y ambientales, como se puede apreciar en los sistemas de abastecimiento lejano de las ciudades ubicadas en otras cuencas, como la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) o la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG).

Las cuencas hidrográficas, como unidades de gestión y planificación del agua, han pasado por varias etapas, originadas en China, y han sido parte de la política europea del agua. Este enfoque de cuencas hidrográficas como la unidad natural ha evolucionado a partir de su contexto y propuestas bajo diferentes intenciones. Warner *et al.* (2008, citado en Delgadillo y Durán, 2012) presentan un resumen que parte del siglo XIX hasta el presente, dividido en tres periodos importantes:

1. La primera aproximación surge en el siglo XIX en la cuenca del Nilo, la cuenca del Indo y el oeste de EEUU para la planificación simultánea del desarrollo de recursos hídricos. Se construyen numerosas represas en el río a fin de regular el flujo natural y para múltiples fines (navegación, energía, riego, control de inundaciones, consumo urbano e industrial).
2. Se inspiró en el desarrollo socioeconómico de las regiones a través de la creación de la *Tennessee Valley Authority* en 1933, como parte del *New Deal* (nuevo trato) derivado de la crisis económica causada por la Gran Depresión, en aras de activar el desarrollo de una de las regiones más pobres de los EE.UU. y como un experimento a gran escala. Se señalaba que este tipo de planificación beneficiaría no sólo a las presentes, sino también a las generaciones futuras, la industria, la agricultura y la silvicultura, la prevención de inundaciones y la vinculación de todas ellas, con el fin de lograr el desarrollo integral socioeconómico regional. Pese a que no tuvo malos resultados, el concepto sirvió para la continuidad en la construcción de represas a gran escala y consolidar la autoridad en manos de burocracias hidráulicas (Molle, 2006, citado en Delgadillo y Durán, 2012).
3. En 1990 surge fuertemente el enfoque de ecosistemas, en el que se considera una cuenca hidrográfica como un continuo de los ecosistemas, y el agua como parte integral de los mismos. Fue una reacción a la tendencia de construcción de embalses generados por el auge del desarrollo de la planificación a gran escala y, con ella, la construcción de embalses. Esta perspectiva incorpora los principios de Dublín en los enfoques centrales de la GIRH —de manera más clara, las dimensiones ambiental y social—, y posteriormente es adoptada por la Unión Europea en su Directiva Marco del Aguas (UE, 2000 citado en Delgadillo y Durán, 2012), así como por otros Estados en todos los continentes.

Este tipo de planeación y gestión de las cuencas hidrográficas se da más por parte de los grandes consorcios y entidades nacionales y multinacionales que trabajan en el desarrollo de recursos hídricos. La motivación de estas “élites” tiene relación con los aspectos de equidad y/o la preservación de los ecosistemas. Además, es utilizada por ciertos sectores gubernamentales y financieros para justificar intervenciones o afectaciones, pero pocas veces ha sido un espacio real de planificación, concertación y coordinación para los principios centrales del desarrollo de recursos hídricos y políticas de gobernanza del agua. Esto ha puesto al borde de la desaparición a los ecosistemas

existentes y, en especial, a las especies mayores de flora y fauna (Molle, 2006, citado en Delgadillo y Durán, 2012).

En el caso de México, la reconfiguración de las relaciones sociales y políticas se da a partir de la implementación de las políticas públicas de desarrollo regional por cuencas hidrológicas. En un contexto de competencia por el recurso hídrico, éstas propiciaron el crecimiento productivo de dichas regiones y generaron cambios en el territorio, en lo político, físicos e institucionales, hasta construir cuencas hidrosociales.

En la década de 1940, México centró su atención en sus cuencas hidrológicas, con el objetivo de establecer políticas de desarrollo regional, siguiendo el modelo del valle de Tennessee basado en una gestión integral de los recursos hídricos. En el lapso de 1947 a 1959 se crearon varias comisiones de cuencas centralizadas (Papaloapan, Tepalcatepec, Fuerte y Grijalva), cuyo fin fue armonizar la programación regional con la problemática del desarrollo nacional, teniendo como eje articulador las cuencas hidrológicas, y la cooperación de los gobiernos estatales y de los organismos gubernamentales que las integraban. Se trataba de incorporar lo político-económico (Ávalos, 2015). El proyecto cubrió una multitud de facetas de la vida de esas regiones. Se buscó principalmente la habilitación de las áreas mediante su electrificación, ampliación agrícola, intensificación de las vías de comunicación, de niveles de sanidad y educación, y la relocalización demográfica a zonas más convenientes. Era un proyecto perfilado a sentar las bases macroeconómicas del desarrollo de dichas zonas (Revista de Comercio Exterior, 1956).

A partir de estas políticas de desarrollo regional se modifica el territorio. Se comenzó con la construcción de infraestructura física que permitió sentar las bases político-económicas dentro del territorio hidrológico y el acaparamiento de los recursos hídricos por parte de los sectores agrícolas, industriales y urbanos, lo que modificó las formas de gestión del agua. Sin embargo, no en todas las cuencas hidrológicas del país se implementaron de la misma manera. En el caso de la planificación regional integral de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago, no se consideró el uso de los recursos hídricos, aunque sí su espacio hidrosocial (Barkin *et al.*, 1970).

Las políticas regionales por cuencas hidrológicas contaban con una línea de fomento a la descentralización industrial, con nuevas políticas industriales y criterios geográficos para guiar el proceso de industrialización. Por medio de incentivos al capital, se intentó inducir la localización de las actividades, obviando el tipo de establecimiento de la industria (Rutgerd *et al.*, 2016). Por lo tanto, las ciudades se industrializaban a través de subsidios directos e indirectos y de

privilegios que el empresario industrial recibía del sector público, y se generaba una serie de ventajas para la concentración de la industria, el comercio y los servicios. Como consecuencia, de 1940 a 1970, la densidad poblacional por la migración rural-urbana incrementó .

La centralización del programa de desarrollo regional por cuencas hidrológicas a través de sus comisiones de cuencas no contaba con la participación de los usuarios, por lo que, frente a la pasividad político-institucional de los gobiernos estatales, se disuelve en 1976 sin protestas sociales. El modelo se basó en un esquema técnico-ingenieril de débil e inadecuada coordinación que dio lugar a un severo deterioro ambiental, con lo que se deja en claro que la gestión del agua de manera exclusiva no asegura la gestión de la cuenca como territorio (Rutgerd *et al.*, 2016).

Sólo los proyectos de desarrollo regional por cuencas hidrológicas (Papa-loapan y Tepalcatepec) aliviaron el congestionamiento de la Meseta Central y dieron paso a la agricultura (Rutgerd *et al.*, 2016), aunque, por otra parte, se señalaba que lograron poco en cuestión de la descentralización económica y en la disminución del flujo de emigrantes hacia zonas urbanas, pese a que la instalación de industrias en límites de ciudades fue mínima. Las comisiones excluyeron este apartado de la mayoría de los programas, excepto para las industrias de procesamiento agrícola directo.

La reorganización del territorio a partir de las políticas de desarrollo regional por cuencas hidrológicas ha mostrado a la par impactos positivos y negativos. Las actividades productivas acumuladas a lo largo de ríos disminuyen calidad, cantidad y variabilidad de afluentes fomentados por el Estado con múltiples actores privados y públicos, nacionales e internacionales (Soares *et al.*, 2008). Pese a lo anterior, el discurso de gestión por cuencas sigue presente en instrumentos de políticas públicas relacionados con el recurso hídrico, basados en la división hidrológica-administrativa aún con una fuerte influencia ingenieril que retomó aspectos básicos del enfoque de cuencas, y fortalecido con el de cambio climático en la política ambiental, con una visión de recurso hídrico que considera interacciones socioambientales e hidroterritoriales.

Actualmente, la gestión del agua se encuentra desligada de las políticas de desarrollo regional como tal, y sólo se supedita a las instituciones responsables de su control de acuerdo a la Ley de Aguas Nacionales (LAN), donde la base política hídrica nacional es la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) por cuenca hidrológica, con lo que se fortalecen los mecanismos para mantener o reestablecer el equilibrio en las cuencas hidrológicas del país y el de los ecosistemas vitales para el agua. En este sentido, la LAN define a la GIRH como “el

proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con éstos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales” (Valencia *et al.*, 2015, p. 206). A continuación, se analiza el impacto de las políticas de desarrollo regional por cuencas hidrológicas, detonantes de diferenciación entre las regiones las que conforman.

## 5. Políticas económicas de desarrollo regional en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago

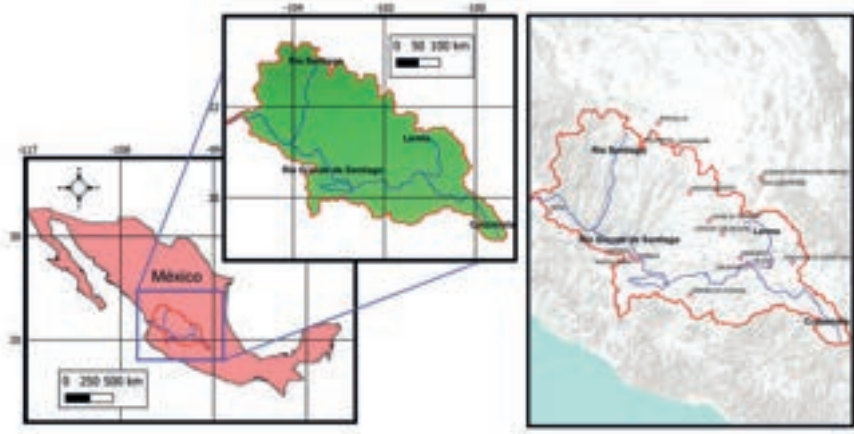
México no ha contado con proyectos reales de desarrollo regional, entendidos como el proceso de cambio sostenido que tiene como finalidad el progreso permanente de la región, de la comunidad regional o como un todo, y de cada individuo residente en ella (Boisier, 1996). Al contrario, se han realizado intentos de planeación económica, principalmente sectoriales y a escala nacional en sectores básicos como comunicaciones, irrigación, industria y agricultura, así como en aquellos de beneficio social como educación, vivienda y salud pública. Dichos planes sectoriales responden, más bien, a un impulso de formación de capital privado, dándole prioridad a la “eficiencia” económica con respecto a la equidad o justicia social, para posteriormente obtener crédito externo (Barkin *et al.*, 1970; Boisier, 1996):

... el desarrollo regional se ha considerado el proceso generador de riqueza económica, de bienestar social, así como de sustentabilidad, y cuando se manifiesta en igualdad de oportunidades para todos —personas, sectores y regiones— se pensaría entonces que el desarrollo tiende a reflejarse en la armonía de las propias ciudades y regiones. No obstante, cuando el desarrollo no es armónico, sacrifica a cualesquiera de estos componentes, pero sobre todo el bienestar y la sustentabilidad, en aras del crecimiento económico. (Alba Vega, 1991, p. 149).

Una de las políticas de desarrollo regional de mayor impacto en México fue la intervención del Estado por comisiones de cuencas hidrológicas a partir de 1943 para inducir la “marcha hacia el mar”. Se consideró lo más propio a fin de estimular el desarrollo regional descentralizado fuera de la Meseta Central. El programa pretendía establecer una frontera agrícola y relocalizar la industria y la fuerza de trabajo laboral del México central ya sobresaturado.

En tal contexto, pero con objetivos diferentes, en noviembre de 1950 nace la Comisión Lerma-Chapala-Santiago. Se requería involucrar a los estados de la cuenca en la solución del novedoso y grave problema de escasez de agua en

**Figura 2.** Cuenca Lerma-Chapala-Santiago.  
Principales ríos y centros de población, 1995



Fuente: Elaboración propia con imágenes de Google, 1995.

el lago de Chapala. Dicha Comisión, junto con la Secretaría de Hacienda y Crédito Público y Nacional Financiera, en un intento de planificación regional integral, trató de armonizar la programación regional con la problemática de desarrollo nacional por la vía de programas sectoriales y estatales fundamentales en el ramo agropecuario, y proyectos específicos de inversión dirigidos a la consecución de los objetivos regionales (Alba Vega, 1991).

Las comisiones ofrecieron una forma de planear y coordinar el gasto público por medio de secretarías y gobiernos estatales en regiones donde era difícil realizarlo. El proyecto del Lerma-Chapala-Santiago no pasó de la etapa de planeación. Las posibilidades de coordinación general asociadas con la planeación integral de una cuenca hidrológica fue lo que atrajo al Gobierno mexicano, más que las del uso de los recursos hidráulicos de una manera coordinada (Barkin *et al.*, 1970).

La Comisión Lerma-Chapala-Santiago fue creada por razones políticas, pues se necesitaba involucrar de inmediato a los estados en la cuenca del río cuya extensión otorga tal nombre: localizado en el centro de la República mexicana, desde el Estado de México, recorre 700 km de sureste (SE) a noroeste (NW), cruza el lago de Chapala y desemboca en el océano Pacífico (Alba Vega, 1991). Es la cuenca hidrológica más grande de México.

Dicha Comisión comprendía inicialmente nueve entidades: Aguascalientes, Durango, Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán, Nayarit, Querétaro y Zaca-

tecas. Posteriormente, el Plan Lerma Asistencia Técnica incluyó la totalidad de cada estado e incorporó a Colima. La parte superior de la cuenca, que incluye la mayor parte de la superficie drenada por el río Lerma, es muy distinta a las otras cuencas hidrológicas desarrolladas por otras comisiones, pues cubre una larga historia como rica zona agrícola y como centro industrial de altas tasas de crecimiento económico (Barkin *et al.*, 1970). El valle de México no se encuentra dentro de la cuenca, pero domina la economía de toda la mesa central.

El nacimiento de la Comisión tiene lugar en la coyuntura de otras experiencias ocurridas dentro y fuera de México. Fue inspirada en el *Tennessee Valley Authority*. Su función principal es la planeación y coordinación de inversiones de diversos organismos federales, dentro de un área determinada que traspase los límites de las entidades federativas, así como las destinadas al fomento económico. Busca acrecentar la producción agrícola y la oferta de energía hidroeléctrica a fin de superar el freno potencial sobre el crecimiento industrial manufacturero. También, consiste en propiciar un desarrollo regional más equitativo (Alba Vega, 1991).

Dentro de la Comisión Lerma-Chapala-Santiago surgió en 1963 el Plan Lerma Asistencia Técnica (PLAT), con financiamiento del Gobierno de México y del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), con una inversión participada al 50% de 150 millones de dólares. Dicho plan, a diferencia de otros, adjunta un componente regional muy marcado para estudios económicos y sociales en las áreas de influencia de las obras hidráulicas proyectadas. Además, plantea la necesidad de un estudio macroeconómico de la cuenca, a fin de sustentar la programación del conjunto de proyectos hidráulicos.

En el marco del PLAT, se realizaron estudios regionales al medio físico para conocimiento de las condiciones de suelo, clima, agua y evaluación de recursos, perfilados a orientar la programación de la zona y la elaboración de proyectos de óptima utilidad. Se elaboró un programa agrícola (1967-1975) en zonas de riego y temporal. De igual manera, se establecieron lineamientos sobre la implementación de dicho desarrollo y requerimientos de crédito, asistencia técnica, obras de riego, mecanización, comercialización y tenencia de la tierra, así como propuestas de promoción e instalación industrial. Ejemplo de ello son los primeros estudios para el corredor industrial de Jalisco.

No obstante, el Plan fue sólo un instrumento de análisis y estudio. No se disponía de grandes recursos financieros ni de capacidad de decisión en materia de inversiones. A diferencia de comisiones como Tepalcatepec, Papaloapan, Balsas, Grijalva y El Fuerte, sólo se podían sugerir acciones, lo que propició un distanciamiento entre la planeación y la ejecución de programas. Aunado a ello,

la gran extensión y heterogeneidad de la cuenca, así como por estar integrada por varios estados, dificultaron conciliar lo regional con lo estatal. En muchas ocasiones, representó poderes locales y regionales por encima de las entidades federativas.

La intervención estatal en el desarrollo mexicano regional sigue un curso histórico concreto y se inscribe en un modelo económico definido a nivel de la economía nacional. Debido a tal consideración, se piensa que los modelos económicos definidos a nivel de la economía nacional condicionan el tipo de intervención estatal en las regiones.

Además de los proyectos de cuencas hidrológicas, el Gobierno federal ha constituido una política de desarrollo regional. Una de sus estrategias fue la instalación de parques industriales dotados de infraestructura. En 1970, Nacional Financiera creó el Fideicomiso para el Estudio y Fomento de Conjuntos, Parques y Ciudades Industriales. De manera conjunta con la política de desarrollo regional, se enunció una serie de definiciones especiales (instrumentos) para favorecer la industrialización regional, aunque ya formaban parte de intervenciones estatales como: corredor industrial, parque, área, zona, complejo o ciudad industrial. Dicha política planteaba la descentralización de la vida nacional y del desarrollo regional: desarrollo estatal integral, fortalecimiento municipal y reordenación de la actividad económica en el territorio nacional. No obstante, no se consideraron de una manera más integral los procesos políticos ni los intereses de los diversos actores sociales, las diferencias de poder ni la conflictividad del agua.

## 6. Consideraciones finales

La revisión de las políticas de desarrollo regional por cuencas hidrológicas en México nos llevó a la reflexión de las acciones tomadas para el mejoramiento de la gestión del agua. Concluimos que este modelo no consideró la interacción del hombre con el agua y las problemáticas que ella genera. Aunado a esto, se siguen gestando políticas que, si bien contemplan en su discurso el cuidado del medio ambiente, dejan de lado la acción del hombre que lo habita y vive de manera cotidiana, y a la vez lo contamina y sobreexplota.

De lo anterior, destaca que uno de los objetivos principales de las políticas de desarrollo regional era el del urbano-industrial del país y la descentralización de la ya sobresaturada y problemática Ciudad de México. Sin embargo, los obstáculos para ello fueron la ineficiente programación, el crecimiento urbano industrial del centro del país y el de la demanda de recursos hídricos para diferentes fines sin considerar de manera directa a los usuarios, así como



la competencia por dichos recursos hídricos con Guadalajara y, en el transcurso de tal proceso, su agotamiento y el desarrollo económico y social de la cuenca.

Indudablemente, el modelo de desarrollo regional por cuencas hidrológicas significó beneficios inmediatos para la región y subregiones, entre ellos, la creación de empleos, mejor nivel de vida y participación de servicios públicos en escuelas, hospitales, infraestructura, carreteras y comunicaciones, por mencionar algunos. No así, en lo ambiental y social. El precio que se ha pagado es muy alto, pues las áreas rurales han transferido en corto plazo su capital a los centros urbanos que obliga a la migración. Otro de los costos fue el deterioro del medio ambiente, sobreexplotado y contaminado, con lo que se tiende a la desintegración de la cuenca hidrológica Lerma-Chapala-Santiago, cuestión que se visualiza en ciertos periodos del año. La sustentabilidad de la región pende de un delgado hilo.

Otro de los problemas encontrados es cómo y desde dónde se definen las cuencas, ya sean abiertas o cerradas, pues en muchas ocasiones comparten ámbito jurídicos y políticos-administrativos. Así, la gobernanza y gobernabilidad del agua se complejiza, pues con frecuencia los actores sociales locales y nacionales que interviene en ella para transferir, almacenar, compartir y utilizar los recursos disponibles de agua responden a intereses locales y particulares, lo que dificulta la implementación de los proyectos integrales en manejo del agua. Por otra parte, al transferir aguas de una cuenca a otra, se deben considerar los trasvases y su gestión más allá del espacio territorial que ocupan, así como los esfuerzos humanos, las luchas y los conflictos para hacerse de ella.

Una visión integrada en el manejo del agua es aquella que involucra a todos los pobladores, incluyendo a los de las cuencas hidrológicas, y considera las zonas de aprovechamiento y trasvase de aguas a cuencas aledañas para una mejor gestión del espacio hidrosocial que se pretende planificar, intervenir y gestionar, priorizando las acciones estratégicas y definiendo las responsabilidades de los actores y sectores económicos involucrados en aras de aprovechar y proteger el medio ambiente. Asimismo, esta perspectiva considera la gestión económica-administrativa y ambiental en las cuencas hidrosociales, no sólo a partir de las cuencas hidrográfica e hidrológica, sino también de los espacios geográficos hasta donde las aguas llegan por las acciones antrópicas, y reconoce las múltiples y complejas relaciones entre la gente y el agua en la región. Finalmente, deben tenerse en cuenta las cuestiones de poder hídrico, ciclo hidrosocial y el territorio que permitan fortalecer los sistemas de gobernanza y gobernabilidad de la gestión del agua, y así revertir los problemas socioambientales de las cuencas hidrosociales en México.

## Referencias

- ALBA VEGA, C. (1991). *Las burocracias del desarrollo*. El Colegio de México.
- ÁVALOS, C. (2015). Incidencia del enfoque de cuencas en las Políticas Públicas de México. En A.L. Burgos, G. Bocco y J. Sosa Ramírez (Coord.) (2015), *Dimensiones sociales en el manejo de cuencas*. UNAM, CIGA, Fundación Río Arronte.
- BARKIN, D. Y KING, T. (1970). *Desarrollo económico regional (enfoque por cuencas hidrológicas de México)*. Siglo XXI.
- BOISIER, S. (1996). *Modernidad y Territorio*. Cuadernos del ILPES.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). (2015). *Atlas de México 2015*. Gobierno de la República, Semarnat, Conagua. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>
- DAMONTE VALENCIA, G.H. (2015). Redefiniendo territorios hidrosociales: control hídrico en el valle de Ica, Perú (1993-2013). *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 12(76), 109-133. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.cdr12-76.rthc>
- DOUGLAS, M. (1986). *How Institutions Think*. Syracuse University Press.
- DELGADILLO, O. Y DURÁN, A.L. (2012). *La cuenca hidrosocial: Una aproximación conceptual y metodológica para la gestión del agua en cuencas*. Universidad Mayor de San Simón. [http://www.centro-agua.umss.edu.bo/wp-content/uploads/2017/03/2012\\_Cuenca-hidrosocial.pdf](http://www.centro-agua.umss.edu.bo/wp-content/uploads/2017/03/2012_Cuenca-hidrosocial.pdf)
- GOOGLE. (1995). *Mapa de México, AAA*. Google. <https://www.google.com.mx/search?q=Mapa+de+M%C3%A9xico,+AAA,+1995&tbm=isch&itbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEWjd2Ln7yFXWAhXChlQKHQNgBWoQsAQIjg&biw=1486&bih=752&dpr=1.25>
- MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, J. (S.F). *Modelación de los sistemas hidrosociales. Observatorio de la sostenibilidad en la Región de Murcia*. Universidad de Murcia. [http://www.upo.es/ghf/giest/GIEST/otros\\_documentos/868\\_PonenciaKD\\_Julia\\_Martinez.pdf](http://www.upo.es/ghf/giest/GIEST/otros_documentos/868_PonenciaKD_Julia_Martinez.pdf)
- REVISTA COMERCIO EXTERIOR. (1956). *La Planificación Regional en México*. [http://revistas.banco-mex.com/mexico/revistas/552/1/CE\\_NOVIEMBRE\\_1956\\_1.pdf](http://revistas.banco-mex.com/mexico/revistas/552/1/CE_NOVIEMBRE_1956_1.pdf)
- RUTGERD, B., HOOGESTEGER, J., SWYNGEDOUW, E., VOS, J. Y WESTER, P. (2016). Hydrosocial territories: a political ecology perspective. *Water International*, Vol. 41:1, 1-14. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1080/02508060.2016.1134898>
- SANTOS, M. (1997). *La naturaleza del espacio. Técnico y tiempo. Razón y emoción*. Ariel.
- SECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS Y COORDINACIÓN (SRHYC), Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos (MAASP), Gobierno de la Provincia de Córdoba. (s.f). *Cuencas hidrosociales*. Recuperado de: <http://tinchot.ferozo.com/cuencas-hidrosociales/>

- SOARES, D., VARGAS, S. Y NUÑO, R.M. (2008). Introducción. En *La gestión de los recursos hídricos: realidades y perspectivas*, tomo I, pp. 7-24. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Universidad de Guadalajara.
- VALENCIA VARGAS, J.C., DÍAZ NIGENDA, J.J. Y IBARROLA REYES H.J. (2015). *La gestión integrada de los recursos hídricos en México: nuevo paradigma en el manejo del agua*. Estudios Rurales y Asesoría Campesina AC. [http://www.era-mx.org/biblio/politica/Mjo-Cuencas\\_GestionIntegr.pdf](http://www.era-mx.org/biblio/politica/Mjo-Cuencas_GestionIntegr.pdf)
- WARNER, J., WESTER, P. Y BOLDING, A. (2008). Going with the flow: river basins as the natural units for water management? *Water Policy*, 10(S2), 121-138. <http://www.iwaponline.com/wp/=10S2/wp010S20121.htm> [Accessed
- WITTFOGEL, K.A. (1975). *Oriental despotism: A comparative study of total power*. Yale University Press.

## Capítulo 4

# Conflictos socioambientales de los pobladores de Agua Caliente en el municipio de Poncitlán, Jalisco, y la violación de sus derechos humanos

■ Elvira Medina Alvarado<sup>5</sup>

## 1. Introducción

La localidad de Agua Caliente ubicada en el municipio de Poncitlán Jalisco, México. Es una población que cuenta con enormes rezagos económicos, sociales, culturales, ambientales y de salud.

En años recientes se ha generado una alarma entre sus pobladores por problemas relacionados con la insuficiencia renal padecida en integrantes de diversas familias del municipio del municipio. Se tiene la hipótesis de que el agua que están consumiendo, provenientes de pozos y del lago de Chapala está contaminada.

## 2. Marco teórico

La presente investigación responde a una serie de estudios realizados por la Secretaría de Salud Jalisco, la Secretaría de Desarrollo e Integración Social del Estado de Jalisco, la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Estado de Jalisco, la Fundación Hospitales Civiles de Guadalajara “Fray Antonio Alcalde” y la Universidad de Guadalajara, para determinar las causas del incremento exponencial de casos de insuficiencia renal en la población de Agua Caliente.

---

5 Doctora en Agua y Energía. Adscrita al Centro Universitario de Tonalá.  
elvira.medina@academicos.udg.mx

La investigación la encabeza el Dr. Felipe Lozano Kasten, profesor investigador de la Universidad de Guadalajara, quien encontró, de acuerdo a los estudios mencionados, que las personas de dicha comunidad están orinando plomo, mercurio y tungsteno, entre otros elementos. El doctor informó que los resultados obtenidos hasta diciembre de 2017 sugieren que por lo menos 270 de los 950 habitantes de Agua Caliente padecen algún grado de daño renal; la mayoría, niños de cinco a nueve años de edad.

No existe una causa única sobre el aumento de casos de este padecimiento, como se había adjudicado a la calidad del agua. El estudio revela que el origen de la enfermedad es multifactorial, es decir, influyen el consumo de agua, el aire que se respira, los alimentos que se consumen y las viviendas insalubres carentes de drenaje: todo ello como consecuencia del abandono e indolencia de las autoridades federales, estatales y municipales, quienes son los encargados de respetar y garantizar los derechos humanos de la población.

### 3. Metodología

Mediante el método etnográfico, se describieron las condiciones de vida de los habitantes de la comunidad de Agua Caliente, así como la problemática de salud que sufren desde hace años. Luego de esto, utilizando el método cualitativo, se determinaron las violaciones a los derechos humanos de las cuales han sido objeto por parte de los gobiernos federal, estatal y municipal. Finalmente, se realizó una lista de recomendaciones para cumplir de manera gradual y progresiva con la obligación de respetar y garantizar estos derechos.

### 4. Los derechos humanos

Todos los derechos humanos tienen su origen en la Declaración Universal de Derechos Humanos (DUDH), aprobada en 1948 por la Asamblea General de las Naciones Unidas. En un principio era una declaración “simple”, carente de poder jurídico independiente vinculante, que se limitaba a manifestar una serie de principios y normas generales. Después llegó la adopción de dos convenciones relativas a grupos de derechos específicos. En 1966, los Estados miembros de las Naciones Unidas adoptaron el Pacto Internacional de Derechos Civiles y Políticos (PIDCP) y el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (PIDESC). De éstos y la DUDH, con sus respectivos protocolos facultativos, se constituye la Carta Internacional de Derechos Humanos.

Todos los derechos económicos, sociales y culturales, incluidos los derechos al agua y al saneamiento, están sujetos al principio de “realización progresiva”. Decir realización progresiva es casi tanto como afirmar que los Estados partes

tienen el deber ante el PIDESC de adoptar “medidas deliberadas, concretas y selectivas” en pos de las obligaciones ahí contraídas, y con las que hasta este momento el Gobierno municipal de Poncitlán no ha cumplido. Asimismo, se reconoce que la plena realización de los derechos humanos es un proceso a largo plazo que a menudo se enfrenta a numerosas limitaciones de carácter técnico, económico y político. La finalidad de la realización progresiva no es ofrecer a los Estados una excusa para la inacción, sino que reconoce el hecho de que, por lo general, la realización plena se alcanza poco a poco y que siempre hay margen para mejorar las condiciones. En el conjunto de los derechos humanos no existen niveles ni jerarquías pues todos tienen igual relevancia, por lo que el Estado se encuentra obligado a garantizarlos en forma global y de manera justa y equitativa, en pro de la igualdad.

La Observación General número 3 del Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (CDESC) sobre la naturaleza de las obligaciones de los Estados partes señala que “todas las medidas de carácter deliberadamente retroactivo[...] deberán justificarse plenamente[...] en el contexto del aprovechamiento pleno del máximo de los recursos de que se disponga”. La obligación de acceder y utilizar *el máximo de los recursos de que se disponga* implica para el Estado solicitar asistencia internacional cuando sea necesario y recaudar los ingresos precisos a través de impuestos y otros mecanismos.

Pese a que la realización progresiva de los derechos económicos, sociales y culturales puede ser un proceso continuo, esos derechos conllevan también obligaciones con efectos inmediatos. Éstas varían en función del contexto, pero la de respetar, proteger y cumplir los derechos de un modo no discriminatorio, participativo y responsable es inmediatamente vinculante. De forma similar, todos los Estados deben adoptar medidas inmediatas de cara a la plena aplicación de los derechos para todas las personas. En el caso del agua y el saneamiento, deben enfocarse todos los esfuerzos hacia la realización efectiva y universal proporcionando un nivel mínimo de acceso a todas las personas.

Los Estados deben cumplir las normas jurídicas consagradas en los instrumentos de derechos humanos y en el derecho consuetudinario internacional. Los titulares de los derechos pueden exigir reparación en aquellos casos en que los Estados incumplan sus obligaciones a este respecto. Los derechos humanos definen la relación entre el Estado y los titulares de los derechos.

Las violaciones de derechos humanos incluyen las contravenciones, por parte de los gobiernos, de los derechos garantizados por la legislación en esta materia, así como las acciones y omisiones que puedan atribuirse directamente al Estado. En este sentido, se produce una violación cuando una ley, una política

o una práctica contraviene o ignora las obligaciones de un Estado en materia de derechos humanos, o cuando éste elimina o retira las salvaguardias existentes para su cumplimiento.

Los derechos al agua y al saneamiento no existen de forma aislada del resto de derechos humanos. De hecho, hay una fuerte correlación entre aquellas personas que no pueden disfrutar de los derechos al agua y al saneamiento, y aquellas que no disfrutaban de los derechos a la vivienda, alimentación, educación y salud, situación que sufre toda la comunidad de Agua Caliente. Así, los derechos al agua y al saneamiento pueden considerarse fundamentales para la realización de muchos de esos otros derechos humanos. Sin un acceso adecuado al agua potable y al saneamiento, la salud está en peligro. Si están enfermos, los niños y niñas no pueden asistir a la escuela o, si asisten, son incapaces de prestar atención. Además, los niños, y especialmente las niñas, también faltan a la escuela porque deben recorrer largas distancias para recoger agua. Las adolescentes tienen mayor probabilidad de faltar a la escuela o de abandonar sus estudios si los centros educativos carecen de retretes independientes y seguros para ellas. La falta de agua potable y la consiguiente falta de higiene también influyen en la mortalidad materna e infantil. La realización del derecho a la vivienda requiere acceso a los servicios básicos para garantizar que la vivienda sea realmente adecuada, y eso incluye el agua y el saneamiento.

## 5. Problemática de la comunidad de Agua Caliente

Como se mencionó con anterioridad, en los últimos años, se ha generado una alarma entre la población de la comunidad de Agua Caliente, municipio de Poncitlán Jalisco, por problemas relacionados con la insuficiencia renal que están padeciendo integrantes de diversas familias.

La Secretaría de Salud, la Secretaría de Desarrollo e Integración Social, la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del estado de Jalisco, la Fundación Hospitales Civiles de Guadalajara “Fray Antonio Alcalde” y la Universidad de Guadalajara, han realizado una serie de estudios para poder determinar las causas del incremento exponencial que se tiene de casos de insuficiencia renal, actualmente se tienen detectados más de 600 casos de insuficiencia renal en su mayoría con daño avanzado.

En la investigación del Dr. Felipe Lozano Kasten se encontró que las personas de la comunidad en mención, están orinando, plomo, mercurio y tungsteno entre otros. E informó que, en los resultados, obtenidos hasta diciembre del 2017, sugieren que por lo menos 270 de los 950 habitantes de Agua Caliente

padecen algún grado de daño renal; la mayoría son niños de cinco a nueve años de edad.

No existe una causa única sobre el aumento de los casos de este padecimiento como se había adjudicado a la calidad del agua. el estudio revela que el origen de la enfermedad es multifactorial, es decir, influyen el consumo de agua, el aire que se respira, los alimentos que consumen y la vivienda insalubre que carecen de drenajes. Todo ello como consecuencia del abandono e indolencia de las autoridades federales, estatales y municipales quienes son los encargados de respetar y garantizar los derechos humanos de la población.

A continuación, se hace un breve resumen de los derechos humanos violentados a esta población.

### 5.1 Derecho a un medio ambiente sano

Toda persona tiene derecho a gozar de un medio ambiente sano y ecológicamente equilibrado para su desarrollo y bienestar; corresponde al Estado garantizar este derecho.

La población de Agua Caliente se provee del vital líquido a través del agua de pozo o directamente del lago de Chapala. Los estudios realizados por la Universidad de Guadalajara encontraron manganeso, azufre, cloro libre, coliformes fecales, bacterias y otros metales en diferentes cantidades, por lo que los habitantes tienen la creencia que su agua de consumo es la que los está enfermando y matando lentamente. En el informe 531/14 realizado por CEA, con fecha del 9 de julio de 2014, se reporta que los parámetros de sulfuro en el pozo número dos se encuentran en 0.92 miligramos por litro, cuando el máximo permitido es de 0.002.

Muchas han sido las recomendaciones de diferentes sectores de la sociedad de brindar una urgente atención a los habitantes de Agua Caliente, ya que este mismo problema de salud se está replicando en todas las comunidades ubicadas en la rivera de Chapala.

### 5.2 Derecho al agua y saneamiento

Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y fácil de obtener. Esta disposición no se cumple en la comunidad de Agua Caliente.

Se entiende al saneamiento como el conjunto de disposiciones legales y técnicas encaminadas a mejorar la calidad de la vida humana. En el caso que nos ocupa, esto refiere a la construcción de instalaciones adecuadas para la elimina-



ción de excretas, aguas residuales y otros desechos que puedan tener contacto con seres humanos, animales e insectos.

La población de Agua Caliente debe su situación de emergencia en materia de salud a la violación de estos derechos. Al ser una zona en pobreza extrema, los habitantes carecen de los servicios básicos de agua potable y alcantarillado. Al no contar con un servicio de drenaje, en el mejor de los casos, las personas usan letrinas para defecar. Además, como ya se mencionó, el agua de consumo se extrae de pozos contaminados por diversos minerales. Esto provoca la contaminación de sus suelos y del agua que consumen y, por tanto, que ocasiona numerosas enfermedades.

### 5.3 El derecho a la salud

Toda persona tiene derecho a la protección de la salud. Si los individuos hacen uso de los servicios de salud, tienen el derecho de obtener prestaciones oportunas, profesionales, idóneas y responsables.

Estudios realizados por la Fundación Hospital Civiles de Guadalajara revelan que la incidencia de menores de edad con insuficiencia renal en Agua Caliente es diez veces mayor que en el resto de los municipios de Jalisco, incluyendo la ZMG, y cuatro veces mayor en adultos. Así, en su población se tienen detectados más de 600 casos de insuficiencia renal, en su mayoría con daño avanzado. Esta situación obliga a los afectados a viajar a Guadalajara para recibir atención médica y para que les realicen sus diálisis, ya que no cuentan con un hospital de segundo o tercer nivel en su localidad. Lo anterior implica un menoscabo económico para las familias ya por demás empobrecidas.

El Estado deberá otorgar servicios de salud a través de la Federación, Estados y/o el municipio, de acuerdo a lo establecido en la ley.

### 5.4 El derecho a la alimentación

El derecho a la alimentación declara que toda persona debe alimentarse de una manera nutritiva, suficiente y de calidad.

El 85.5% de la población de Agua Caliente tiene una dieta insuficiente en calorías, y el 89.5% no consume suficientes proteínas, ya que sólo se alimentan de pescado que se extrae de la laguna de Chapala, frijol, maíz y chayotes que se siembran en la comunidad. La desnutrición los hace más vulnerables a contraer diversas enfermedades.

En los resultados preliminares, los investigadores de la Universidad de Guadalajara analizaron y relacionaron estadísticamente la desnutrición con insuficiencia renal, metales pesados y sus efectos en la salud de los pobladores de

Agua Caliente. Los niños, además del daño renal, presentan desnutrición. De 450 estudiantes, el 7.1% tiene desnutrición aguda y el 33.9% sufre desnutrición crónica. La media nacional es de 2.8% y 13.6%, respectivamente.

## 5.5 El derecho al trabajo

El derecho humano al trabajo permite a las personas gozar de una vida digna y un desarrollo pleno, gracias a un salario suficiente y justo para satisfacer sus necesidades como son la alimentación, educación, salud y vivienda.

Para ayudarse económicamente por falta de oportunidades de trabajo, los pobladores de Agua Caliente cultivan chayotes que les son comprados a precios por debajo del mercado. Sólo el 25.1% de la población mayor de 12 años está ocupado laboralmente (el 38.84% de los hombres y el 10.91% de las mujeres), situación que los obliga a viajar a los Estados Unidos a trabajar de manera ilegal. Por ello, el Gobierno tiene una deuda enorme al no abrir, para la población de edad productiva, fuentes de empleo suficientes cercanas a su comunidad.

## 5.6 Derecho a la educación

Según el artículo tercero constitucional, toda persona tiene el derecho a recibir educación en México. El nivel preescolar, primaria, secundaria y media superior son gratuitos. Sin embargo, en Agua Caliente hay 74 personas mayores de 15 años que no saben leer ni escribir. Catorce de los jóvenes entre seis y 14 años no asisten a la escuela. De la población a partir de los 15 años, 62 no tienen ninguna escolaridad, 404 tienen una escolaridad incompleta, 116 tienen una escolaridad básica y 33 cuentan con una educación posbásica. Un total de 34 de la generación de jóvenes entre 15 y 24 años de edad han asistido a la escuela. La escolaridad media entre la población es de cinco años.

Con toda esta problemática, se infiere que las personas de esa población están más preocupadas por resolver sus problemas urgentes, como son salud y alimentación, que en pensar en estudiar.

## 5.7 Derecho a una vivienda digna

Según datos obtenidos de la página del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi), en la población de Agua Caliente hay un total de 237 hogares. De éstos, 32 tienen piso de tierra y unos 14 constan de una sola habitación donde se duerme y cocina. Doscientos seis tienen acceso a la luz eléctrica. La estructura económica permite a sólo seis viviendas tener una computadora, a 132 tener una lavadora y a 200 una televisión. Como ya se mencionó, en los hogares no se

cuenta con el servicio de drenaje y agua potable, lo que contribuye al alto grado de contaminación de la zona.

### 5.8 Derecho a la seguridad social

Este derecho implica que el Estado debe realizar las acciones pertinentes para proporcionar servicios médicos, protección económica por enfermedad, maternidad, accidente de trabajo, desempleo, invalidez o vejez. Por ejemplo, cuando una persona sufre un accidente en el trabajo o es despedido de éste, debe recibir un apoyo económico que le permita solventar sus necesidades, o cuando se es adulto mayor, recibir la protección del Estado a través de lo que comúnmente se denomina “pensión”. El derecho laboral está íntimamente ligado al de la seguridad social. Como se ha apuntado, en Agua Caliente las fuentes de empleo son insuficientes, por lo que el acceso a la seguridad social es prácticamente nulo. Su atención médica se limita al centro de salud más cercano o al Hospital Civil de Guadalajara, sin que puedan aspirar a las otras prestaciones que un trabajo formal ofrece.

### 5.9 Derecho a la reparación del daño integral

A diferencia de los tratados internacionales clásicos que sólo producen derechos y obligaciones entre los Estados que los suscriben, aquellos en materia de derechos humanos tienen la característica de que generan derechos a los particulares. De esta manera, cualquier persona puede exigir directamente del Estado la protección y garantía de éstos, al igual que lo haría con cualquier derecho contemplado por una norma nacional. Y como todo derecho, su contenido lleva aparejadas obligaciones tanto positivas (de hacer) como negativas (de no hacer), de forma que el cumplimiento de un derecho, por ejemplo, a la vida, reconocido por la Convención Americana de los Derechos Humanos, conlleva, por un lado, la afirmación frente al Estado de su respeto irrestricto, y por otro, la prohibición explícita de ser privado de este derecho de forma arbitraria. ¿Qué sucede, entonces, cuando el Estado contraviene el contenido formal de alguno de estos tratados? La respuesta es sencilla: el Estado incurre en irresponsabilidad, de ahí que, de cara a la comunidad internacional, éste deba responder por la acción o por la conducta omisa de sus agentes que afectaron o vulneraron los derechos de una persona o colectivo, y reparar el daño porque, además de todo, esta condición se funda en la declaración de un órgano cuya competencia es contenciosa.

Muchas han sido las muertes por la violación de los derechos humanos de la población de Agua Caliente al no contar con un medio ambiente sano como

lo declara nuestra Constitución. Por ello, el Estado mexicano está en deuda al no reparar de manera integral, adecuada, diferenciada, transformadora y efectiva el daño o menoscabo que estas personas han sufrido por violaciones a sus derechos humanos.

## 6. Resultados

La población de Agua Caliente del municipio de Poncitlán, Jalisco, sigue careciendo de servicios básicos indispensables. La cámara de diputados de la LXIII Legislatura, a través de la Comisión de Salud, emitió un dictamen de punto de acuerdo en el que se reconoce toda la problemática planteada en el presente capítulo, y un resolutivo único en el que se exhorta a la Comisión Nacional del Agua a llevar a cabo los estudios químicos que permitan dictaminar la potabilidad del agua de dicha comunidad. También se autorizó la perforación de un pozo que permita abastecer del vital líquido a esta población, situación que ya fue atendida. Además, se exhortó a las secretarías de Salud del Gobierno federal y del Estado de Jalisco para que coordinadamente proporcionen asistencia médica a quienes padecen de esta enfermedad, a través de campañas preventivas que permitan abatir la insuficiencia renal en la población del estado, privilegiando al sector infantil.

## 7. Consideraciones finales

Con el propósito de que los tres órdenes de gobierno respeten y garanticen los derechos humanos de los habitantes de Agua Caliente, municipio de Poncitlán, Jalisco, se recomienda se brinde:

- Acceso a los servicios de salud a través de instituciones públicas, de seguridad social, privadas y sociales.
- Atención médica de tipo preventivo, curativo y de rehabilitación, de manera oportuna y de buena calidad.
- Atención profesional y éticamente responsable.
- Un trato respetuoso y digno de parte de todo el personal que labore en las instituciones de salud.
- Derecho a la información y derecho de consentir informadamente. Se deberá proporcionar a los pacientes o a sus familiares la información completa sobre el estudio, diagnóstico, pronóstico y tratamiento de su problema de salud, así como del procedimiento que se propone hacer, de manera clara y con lenguaje sencillo.

- Derecho a conocer la verdad. La población necesita información veraz para participar de manera activa en la resolución de su problema de salud y tomar sus decisiones libremente sobre su atención.
- Un expediente clínico.
- Derecho al secreto profesional.
- Atención médica en caso de urgencia.
- Atención cuando se inconforme por la atención médica recibida.
- Vigilancia sanitaria y medidas de seguridad, así como sanciones en caso de incumplimiento de las normas correspondientes, por parte de la Secretaría de Salud y los gobiernos municipales.
- Persecución de los delitos relacionados con el manejo de desechos tóxicos y de contaminación de aguas.
- Un servicio de drenaje y alcantarillado para las aguas residuales de la comunidad.
- Revisión y, en su caso, modificación de las siguientes normatividades:
  - a) NOM-001-Semarnat-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas o bienes nacionales.
  - b) NOM-117-SSAI-1994. Establece los métodos de prueba para determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada. Se deberán incluir nuevos elementos encontrados en el agua.
  - c) NOM-127-SSAI-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Se deberán incluir nuevos elementos encontrados en el agua.
  - d) NOM-181-SSAI-1998. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Requisitos sanitarios que deben cumplir las sustancias germicidas para tratamiento de agua de tipo doméstico.
- La implementación de acciones que permitan mejorar las viviendas de la comunidad.
- Fuentes de empleos suficientes y cercanas, además de bien remuneradas, para que la población obtenga los recursos idóneos para atender sus necesidades alimenticias.

## Referencias

- ALBURQUERQUE, C. (2012). *Derechos hacia el final: Buenas prácticas en la realización de los derechos al agua y al saneamiento*. Disponible: [https://www.ohchr.org/Documents/Issues/Water/BookonGoodPractices\\_sp.pdf](https://www.ohchr.org/Documents/Issues/Water/BookonGoodPractices_sp.pdf)
- CENSO DE POBLACIÓN Y VIVIENDA. (2010). <http://inegi.gob.mx>
- CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS. DOF. (2017). disponible: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf\\_mov/Constitucion\\_Politica.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf_mov/Constitucion_Politica.pdf)
- DE LA TORRE, J. (2006). *Derecho a la Salud*. Centro de Estudios Jurídicos y Sociales “padre Enrique Gutiérrez”. Consejo Ciudadano para el Desarrollo Cultural del Municipio de Aguascalientes; Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente.
- DICTAMEN DEL CONGRESO DEL ESTADO DE JALISCO, CÁMARA DE DIPUTADOS LXIII LEGISLATURA, COMISIÓN DE SALUD. (2016, diciembre). *Dictamen*. En <http://gaceta.diputados.gob.mx/PDF/63/2016/dic/20161215-III-D113.pdf>.
- LOMELÍ, C. (2017). *Punto de Acuerdo*. [http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2017/09/asun\\_3573170\\_20170914\\_1505401082.pdf](http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2017/09/asun_3573170_20170914_1505401082.pdf).
- LOZANO, F. (2017). *Encuentran metales pesados en orina de habitantes de Poncitlán*. <http://www.udg.mx/es/noticia/encuentran-metales-pesados-en-orina-de-habitantes-de-poncitlan>
- MEXICO.PUEBLOSAMERICA.COM. (2017). *Pueblos de México en Internet*. <http://mexico.pueblosamerica.com>
- PACTO INTERNACIONAL DE LOS DERECHOS ECONÓMICOS SOCIALES Y CULTURALES Y SU PROTOCOLO. (2012). [https://www.cndh.org.mx/sites/all/doc/cartillas/7\\_Cartilla\\_PIDESCyPE.pdf#:~:text=El%20Pacto%20Internacional%20de%20Derechos%20Econ%C3%B3micos%2C%20.%20Sociales,de%20los%20derechos%20econ%C3%B3micos%2C%20sociales%20y%20culturales%20%28DESC%29](https://www.cndh.org.mx/sites/all/doc/cartillas/7_Cartilla_PIDESCyPE.pdf#:~:text=El%20Pacto%20Internacional%20de%20Derechos%20Econ%C3%B3micos%2C%20.%20Sociales,de%20los%20derechos%20econ%C3%B3micos%2C%20sociales%20y%20culturales%20%28DESC%29)
- PACTO INTERNACIONAL DE DERECHOS CIVILES Y POLÍTICOS. (1976). Recuperado de <https://www.ohchr.org/SP/ProfessionalInterest/Pages/CCPR.aspx>
- PADILLA, J. (2017). *Construyen pozo en agua Caliente, municipio de Poncitlán*. <http://decisiones.com.mx/noticias/concluyen-construccion-de-pozo-en-agua-caliente-municipio-de-poncitlan/mexico>.
- PELAYO MOLLER, C. (2010). La reparación del daño y la efectiva protección de los derechos humanos. *Revista defensor*, 12, 12-15.
- TORRES, R. (2017). Metales pesados causan insuficiencia renal. *El universal*. <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/estados/2017/01/31/metales-pesados-causan-insuficiencia-renal-en-comunidad-del-lago-de>



## Capítulo 5

# Determinación de áreas susceptibles a inundación en cuencas urbanas: el microsistema Garabatos, México

- Miriam Ascencio Ibarra <sup>6</sup>
- Mario Guadalupe González Pérez <sup>7</sup>
- José Andelfo Lizcano Caro <sup>8</sup>
- Edith Xio Mara García <sup>9</sup>

## 1. Introducción

A nivel mundial, y a lo largo del tiempo, los medios de comunicación nos han informado sobre la destrucción y pérdidas humanas que han causado los desastres naturales, algunos de ellos relacionados con las inundaciones. En las ciudades de más de un millón de habitantes de América Latina y Caribe, América del Norte y Asia, la mitad o dos terceras partes de la población se encuentra situada en zonas expuestas a un riesgo elevado de sufrir al menos un tipo de catástrofe natural (ONU, 2012, 2014).

---

6 Licenciada en Geografía. Maestra en Sistemas de Información Geográfica. Estudiante de la maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. [miriam2014@gmail.com](mailto:miriam2014@gmail.com)

7 Ingeniero Civil. Maestro en Ingeniería. Doctor en Ciudad, Territorio y Sustentabilidad. Profesor investigador en el Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. [mario.gonzalez.direccion@gmail.com](mailto:mario.gonzalez.direccion@gmail.com)

8 Magister en Planeación Urbana y Regional. Docente investigador. Director del grupo de investigación SERVIPÚBLICOS. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. Colo. [jlizcano26@hotmail.com](mailto:jlizcano26@hotmail.com)

9 Doctora en Geología. Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. [xio.garcia@academicos.udg.mx](mailto:xio.garcia@academicos.udg.mx)



**Figura 1.** Invasión de cauces



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En México, los fenómenos hidrometeorológicos que impactan áreas urbanas comúnmente repercuten en inundaciones que afectan a la población, debido principalmente a la naturaleza de las ciudades que suelen estar asentadas sobre cuencas hidrográficas que poco a poco van perdiendo territorio natural. Esto está claramente representado en la microcuenca Garabatos, donde en los últimos 25 años ha habido un incremento poblacional y expansión del suelo urbano de manera desordenada (Inegi, 1990, 2015) que ha repercutido en cambios de uso de suelo, asentamientos irregulares, invasión de cauces, disminución de áreas permeables y aumento de la exposición y vulnerabilidad de los agentes afectables.

La microcuenca Garabatos abarca 69 colonias distribuidas en los municipios de Zapopan, San Pedro Tlaquepaque y Tlajomulco de Zúñiga, en Jalisco (Inegi, 2015). En la actualidad, la cuenca está densamente urbanizada en sus partes baja y media, aunque en su parte alta aún prevalece bosque de pino y encino. En esta cuenca la mayoría de las colonias tiene problemas recurrentes de inundaciones producto de una mala planeación urbana y deficiencias en infraestructura. Aunque hay otras colonias localizadas en áreas susceptibles de inundación (si sólo consideramos los factores físicos de la cuenca como la altitud, pendiente, cober-

tura de suelo, red de drenaje), éstas no sufren problemas de inundación porque cuenta con infraestructura hidráulica y pluvial adecuadas. Por otro lado, hacia al norte, en la parte media alta, hay colonias con alto poder adquisitivo que, a causa de esto y su altitud, tampoco tienen problemas de inundaciones.

Para el presente trabajo se recabó información cartográfica con la cual se hicieron mapas temáticos para el análisis de la cuenca. A la cartografía se le aplicaron técnicas de análisis espacial y de álgebra que garantizaron la adecuada preparación de la información temática requerida para la obtención de los mapas multitemporales de susceptibilidad a inundaciones y el cálculo de parámetros morfométricos con el fin de conocer el comportamiento de la cuenca ante lluvias de gran intensidad o de larga duración. Para esto último, además de los datos del análisis de las altitudes y pendientes, se emplearon fórmulas ya establecidas por los autores Tomás Ochoa y Ven Te Chow.

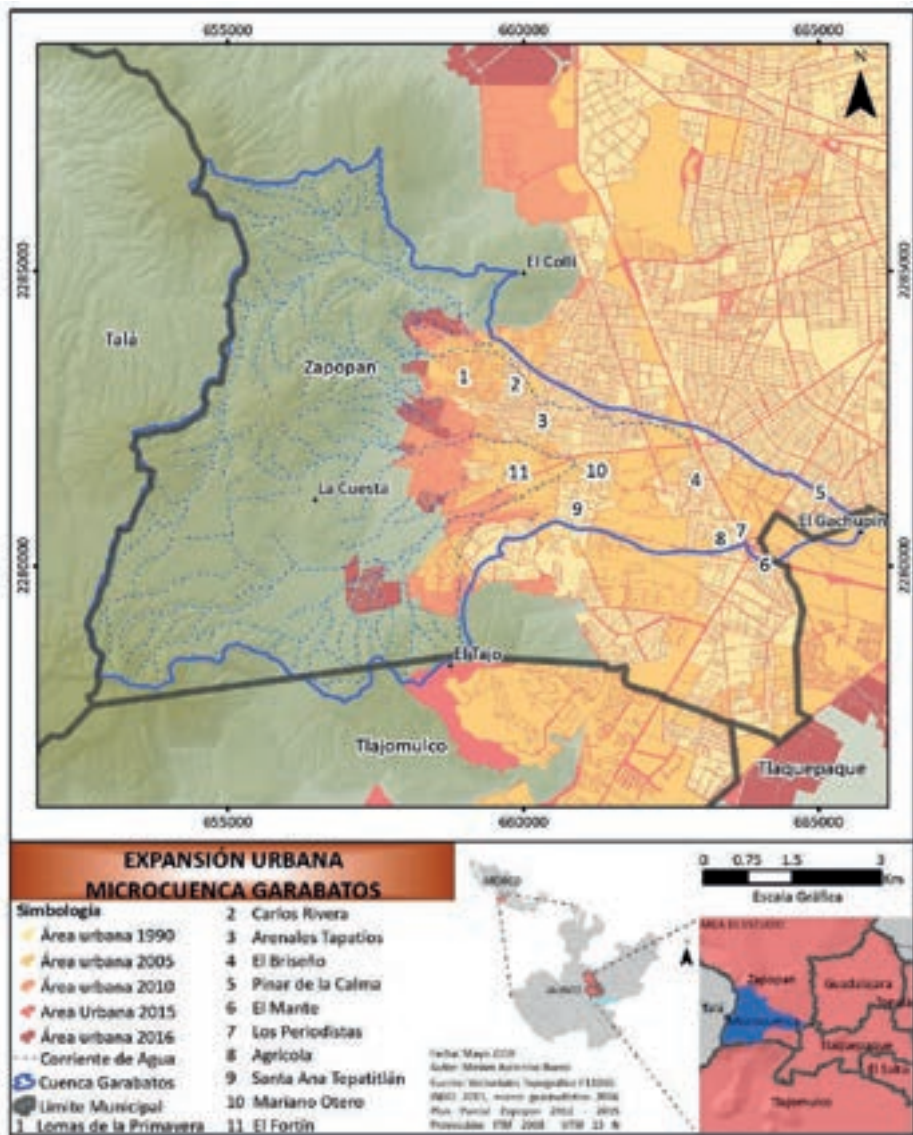
La metodología propuesta nos dio una visión de las características geomorfológicas e hidrográficas de la cuenca y de las áreas propensas a inundación tras el dinamismo urbano. Asimismo, nos impulsó a seguir para formular propuestas de prevención y/o mitigación de los efectos de las lluvias en cuencas urbanizadas, pues la falta de información cartográfica local propicia incertidumbre en los datos y limita las soluciones.

En las siguientes secciones se exponen los aspectos teóricos de cuencas urbanizadas y la entropía del microsistema. De igual manera, se hace énfasis en la metodología para el diagnóstico del área de estudio utilizando los sistemas de información geográfica por su capacidad de integración de datos. Después, se describen los resultados de los parámetros morfológicos y mapas de susceptibilidad. El último apartado recoge las conclusiones del análisis y se dan recomendaciones para investigaciones posteriores.

## 2. Marco teórico

La cuenca hidrográfica es, en sí, un sistema dinámico complejo donde convergen entradas y salidas cuantificables. El principal ingreso de agua se da por precipitación, aunque también se pierde o sale de la cuenca una cantidad por diversas causas: a través de un río principal hacia una derivación con otra cuenca, hacia la salida de la cuenca, evapotranspiración, evaporación, infiltraciones profundas o por el uso que adquiere. Dentro de la cuenca se producen interacciones con los elementos y los subsistemas biológico, físico, económico y social que la integran, y otros sistemas con los que se interrelacionan. En este entendido el suelo, la geología, el clima y la topografía integran el subsistema físico, donde viven y conviven los seres humanos.

Figura 2. Expansión urbana y colonias afectadas por inundaciones



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la cuenca hidrográfica son más visibles acciones humanas, tanto positivas como negativas, dentro del sistema por a la naturaleza superficial de las cuencas, de allí que sean las que tienden hacer urbanizadas. Por lo regular, en México la urbanización no es planeada ni ordenada. Esto supone un tema al momento de hablar de cuencas urbanizadas, pues es posible tener dificultades relacionadas con excedentes y déficit de aguas.

En un sistema tan complejo como lo es una cuenca, más aun urbanizada, el concepto de “entropía” es clave, ya que se refiere al grado de desorden del sistema: una medida que puede ir de “nula” a “máxima”, siendo esta última cuando el sistema se acerca al equilibrio.

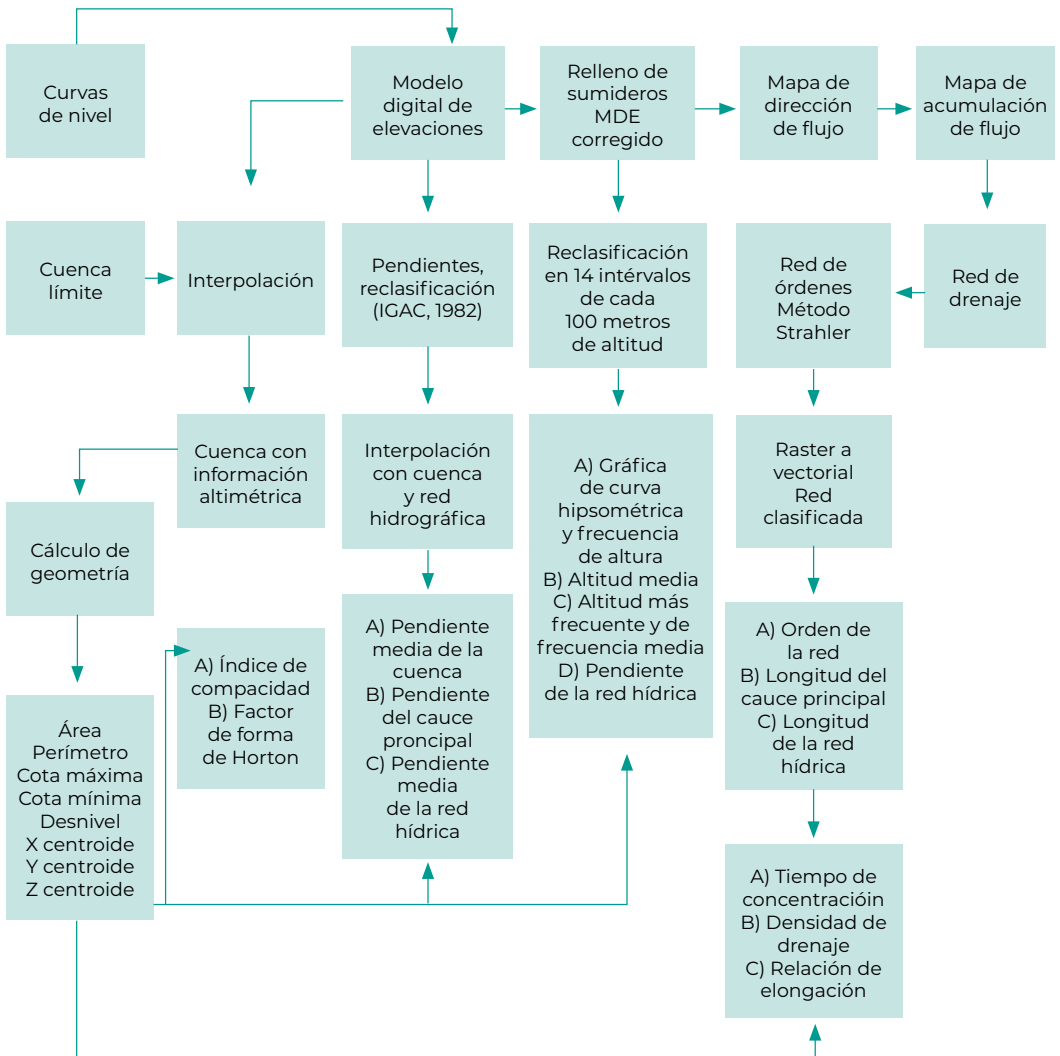
En el entorno físico, sin la presencia del hombre, el agua de lluvia baja de las áreas de mayor altitud por los cauces e inunda las zonas bajas, luego el agua vuelve a su estado inicial. En cuencas urbanizadas este equilibrio es difícil de obtener. Con el asentamiento humano en zonas aledañas a los cuerpos de agua, este ciclo se ve afectado pues, al desbordarse una corriente, hay inundaciones. Además, la degradación del medio ambiente (deforestación) modifica la respuesta hidrológica de las cuencas, lo que incrementa la ocurrencia y magnitud de las inundaciones (Salas y Jiménez, 2007).

En el mundo, este no ha pasado por alto. Prácticamente cualquier superficie del planeta está localizada dentro de una cuenca hidrológica, y el grado de influencia del ser humano podrá ser benéfico (como en la agricultura) o perjudicial (cuando está presente en las áreas urbanas) con consecuencias lamentables e inesperadas. En este sentido, en México el estudio de las inundaciones se ha realizado a través de mapas que describen y catalogan los peligros. Tal es el caso de los atlas de Zapopan, San Pedro Tlaquepaque y Tlajomulco de Zúñiga, aunque éstos tienen una desactualización de mínimo 10 años y no se ve reflejada la influencia que la ocupación urbana tiene en el microsistema, ni la entropía, y ni la susceptibilidad a inundaciones actuales.

### 3. Metodología

En este trabajo se hacen diferentes análisis para identificar el comportamiento de la cuenca ante las lluvias y su susceptibilidad a inundación en dos periodos (1990 y 2015). Para generar resultados, en primer lugar se hizo una caracterización a nivel regional la cual consta de una serie de mapas temáticos que contribuyeron a describir los elementos en la microcuenca, como lo son la edafología, geología, uso de suelo y vegetación, red de drenaje, altitud y pendiente. Estos últimos son de suma importancia para los mapas de susceptibilidad y el cálculo de parámetros morfométricos, pues a partir de ellos se obtienen datos morfológicos

**Figura 3.** Metodología para obtener la morfología de la cuenca



Fuente: Elaboración propia, 2018.

a través de consultas, cálculos de operaciones básicas y de la interpolación de la información, todos necesarios para el cálculo de parámetros más complejos por medio de fórmulas ya establecidas por diversos autores.

Los parámetros se clasificaron en “de forma”, “de relieve” y “relativos a la red de drenaje”. Los más importantes de forma fueron el coeficiente de Gravelius ( $C_g$ ), relación de elongación ( $R_e$ ) y densidad de drenaje ( $D$ ). Además de los parámetros geomorfológicos, se determinaron algunos datos generales o parámetros básicos necesarios para el cálculo de las demás cuantificaciones, entre ellos el área de la cuenca, perímetro cota máxima y mínima, centroide en  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , en cuyo caso en su mayoría sólo se requirió hacer una consulta en un *software* de SIG y aplicar la fórmula correspondiente.

En cuanto a los parámetros de relieve, la curva hipsométrica es la más importante, pues representa gráficamente las cotas del terreno en función de las superficies correspondientes (Ochoa Rubio, 2011), utilizando como datos de partida la altitud y la superficie de la cuenca e interpolándolas. En este mismo gráfico se plasmó la curva de frecuencias altimétricas una vez realizados los cálculos en porcentaje del área entre curvas de nivel en rangos. Otras cuantificaciones fueron la altura media, la altitud más frecuente, altitud de frecuencia media, la pendiente media de la cuenca y el coeficiente de masividad de F. Fournier.

Por último, la red hidrográfica superficial se analizó a través de una serie de clasificaciones y mediciones. Las principales cuantificaciones fueron la longitud del cauce principal o longitud al punto más alejado, la longitud de la cuenca, longitud de la red hídrica, orden de la red hídrica, pendiente del cauce principal. Con éstas se generaron otros parámetros, como la densidad de drenaje ( $D_D$ ), su inverso, la constante de estabilidad de un río ( $C$ ) y el tiempo de concentración ( $T_c$ ). Para los anteriores, se aplicaron expresiones algebraicas con datos generales calculados previamente.

Con la información generada se conocieron las características morfológicas de la cuenca y se obtuvieron datos necesarios para identificar su proceder ante lluvias. El tiempo de concentración es un dato importante, pues equivale al tiempo que tarda una gota de lluvia desde el punto más alejado de la cuenca hasta su salida (Aparicio Mijares, 2007). Pese a todo, el cálculo no toma en cuenta los factores que pueden modificar ese tiempo.

El proceso por el que se transforma la precipitación en escurrimiento es el más complejo del ciclo hidrológico, ya que existen factores que influyen como las variaciones en la intensidad y magnitud de la precipitación, la topografía, la geología, tipos de suelo, la vegetación y los usos de suelo. Por otra parte, el proceso de urbanización es el que más pesa, pues modifica la cantidad de agua que

se puede filtrar o retener por la vegetación y, al aumentar la cantidad de suelo permeable, incrementa las velocidades con que se mueve el agua en la cuenca.

En zonas urbanas esta relación presenta características muy peculiares y se torna más complejo cuando se trata de cuencas mixtas como la microcuenca Garabatos. De allí que en zonas urbanas el proceso de lluvia-escurrimiento comienza cuando parte de la lluvia es interceptada por la vegetación antes de llegar al suelo, después poca se infiltra por el aumento de suelo impermeable a causa del desarrollo urbano y otra parte comienza a mojar la superficie hasta llenar huecos. Cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad de infiltración del terreno, el agua comienza a escurrir superficialmente. Aquella que llegue a las cunetas fluirá hasta las coladeras libremente e ingresará al sistema de drenaje; cuando este último no tenga la capacidad suficiente, el agua escurrirá a presión y se derramará.

Es importante tener presente el proceso de relación lluvia-escurrimiento en esta cuenca, pues muestra un proceso de urbanización dinamizado con zonas carentes de planeación, infraestructura y problemas recurrentes de inundación, entendiéndose que esta última sucede cuando una superficie seca es cubierta por agua producto de eventos meteorológicos o humanos y que presenta una elevación y movimiento determinado (PDC, 2009).

Los resultados de la morfología de la cuenca son un compendio para constatar si el mapa de susceptibilidad a inundación expresa la realidad de la cuenca ante la urbanización. Para la obtención de los mapas de susceptibilidad 1990-2015, sólo se consideró la caracterización física de la cuenca a través de la cartografía temática descrita con anterioridad, asignándole valores peso en función de la altitud, pendiente, permeabilidad y área de influencia dependiendo del mapa temático, sin tomar en cuenta la infraestructura hidráulica ni el nivel socioeconómico de la población.

Como el mapa muestra que valores cuantitativos altos representan valores cualitativos de muy alta susceptibilidad y, caso contrario, números bajos indican muy baja susceptibilidad, se optó por aplicar un método simple para la obtención de información a través de los SIG, utilizando una herramienta de análisis espacial que permite hacer algebra de mapas, es decir, que ejecuta expresiones matemáticas a las series de capas que se quieren analizar. Para este caso se sumaron seis mapas temáticos en cada fecha.

El primer paso fue preparar la cartografía, en particular la base de datos, pues de cada mapa sólo se requiere un tipo de dato, el cual se sumará. A la base de datos de los mapas de uso de suelo y vegetación, edafología y geología se agregó una columna a la que denominamos “peso”. En este campo se agregaron valores

**Tabla 1.** Diferentes fórmulas para calcular parámetros de morfología de cuencas

Parámetro	Fórmula	Parámetro	Fórmula
Desnivel altitudinal (DA)	$DA = c \max - c \min$	Coeficiente de masividad (tg $\alpha$ )	$\tan \alpha = \frac{\bar{h}_c}{L}$
Ancho de la cuenca (w)	$w = \frac{AC}{L}$	Pendiente media de la cuenca $S_c$	$S_c = 100 \frac{L_i \cdot E_c}{AC}$
Índice de compacidad de Gravelius (Cg)	$C_g = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot AC}}$	Tiempo de concentración Kirpich	$T_c = 4 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.77}$
Factor de forma de Horton (Rf)	$R_f = \frac{AC}{L^2}$	Tiempo de concentración Témez	$T_c = 9 \cdot \left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.75}$
Relación de elongación (Re)	$R_e = 1.128 \frac{\sqrt{AC}}{L}$	Tiempo de concentración California Culverts	$T_c = 60 \cdot \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$
Relación de circularidad (Rc)	$R_c = \frac{4A\pi}{p^2}$	Tiempo de concentración Chow	$T_c = 7.38 \cdot L^{0.64} \cdot S^{-0.32}$
Densidad de drenaje (DD)	$D_D = \frac{L_T}{AC}$	Variables: C max: Cota máxima C min: Cota mínima AC: Área de la cuenca L: Longitud de la cuenca P: Perímetro LT: Longitud total de cauces a: Área entre contornos	Li: Longitud de curvas de nivel EC: Equidistancia entre curvas de nivel e: Elevación media entre dos contornos $\delta$ : Coeficiente Adimensional = 0.694 Vc: Volumen de la cuenca
Altitud media de la cuenca $\bar{h}_c$	$\bar{h}_c$		
Altitud de frecuencia media (Em)	$E_m = \frac{\sum ae}{AC}$		
Constantes de estabilidad del río (C)	$C = \frac{AC}{L_T}$		
Densidad de corriente (DC)	$DC = \delta D_D^2$		

Fuente: Elaboración propia, 2018, con base en Ochoa Rubio, 2011.



del 1 al 4, dependiendo de la permeabilidad, con base en la capacidad de infiltración. Los números bajos indican que son coberturas, rocas o suelos permeables, y los valores altos, impermeables, pues estos últimos no retendrán el agua, escurrirán y provocarán una mayor susceptibilidad a inundación. Como ejemplos generales tenemos que una cobertura de bosque se considera permeable y tendrá un valor de peso de 0.5; caso contrario, una zona urbana es impermeable y se le asignará un valor de peso de 3.

Para los mapas de altitudes y pendientes también se comenzó por preparar la información. Para ello se reclasificaron en cuatro rangos, de manera que a las áreas más propensas a inundarse se les otorgo un valor mayor. En este sentido, a las altitudes bajas (de 1 608 a 1 618 msnm) se les dio un peso de 4; a las de entre 1 619 y 1 630 msnm se les dio el valor de 3; a las altitudes medias, un valor de 2, y a las superiores a 1 680 msnm, un valor de 1. En cuanto a la pendiente, también se asignaron valores basados en clasificaciones: “muy baja” (4°), con valor de 4; “baja” (4 a 8°), con valor de 3; “moderadas” (8 a 16°), con valor de 2, y “fuerte” y “muy fuerte” (mayores a 16°), con valor de 1. Lo anterior, con base en la clasificación de Van Zuidma (1986) y valoración del parámetro de la pendiente (Mora *et al.*, 2002).

La información de la red de drenaje también se tuvo que preprocesar. Considerando que es una red grande y definida (de sexto orden, según la jerarquización de Strahler) cuyo cauce principal cruza por el área urbana, así como algunas ramificaciones de órdenes inferiores, fue indispensable hacer un área de influencia de 20 m al cauce principal, 10 m más que el límite de zona federal, con el fin de dejar un área de amortiguamiento. Para los cauces de primer orden, la medida fue de 1 m. Una vez que se tuvieron estas áreas de influencia, se agregó en la base de datos una columna de “peso”, a la cual se asignaron valores de 1 a 4, dependiendo del peligro en relación al tamaño del cauce: a los de primer orden se les dio valor de 1, y al cauce principal de sexto orden, valor de 4, pues en éste hay más probabilidad de desbordamiento en caso de lluvia intensa o de larga duración.

Una vez preparada la base de datos de los seis mapas temáticos, las columna “peso” toman un papel primordial, pues sus datos se suman en el segundo paso con la herramienta de álgebra de mapas. Por último, en el tercer paso, el resultado cuantitativo de esta suma para cada fecha se reclasificó en valores cualitativos de muy baja, baja, media, alta y muy alta susceptibilidad. Cabe agregar que el objetivo de tener mapas de dos fechas es realizar un análisis temporal de la susceptibilidad a inundación antes y después del proceso de urbanización. Por ello,

tras la obtención de cada mapa, se hizo un recuento de aumento o disminución de estas áreas.

#### 4. Resultados y discusiones

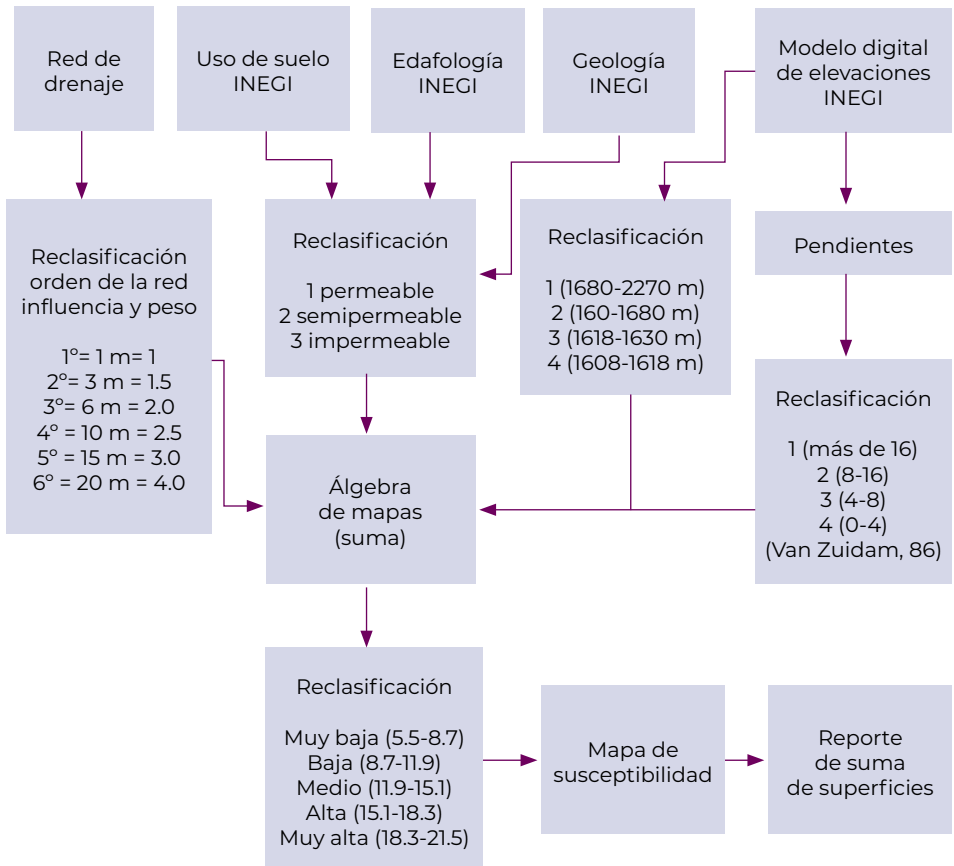
A partir del cálculo de los parámetros, pudimos conocer de manera generalizada el comportamiento de la escorrentía en la cuenca Garabatos en caso de alguna lluvia de gran intensidad o de larga duración. Dentro de los parámetros básicos, tenemos que la superficie de la cuenca es de 54.85 km<sup>2</sup>, de acuerdo con el Centro Nacional de Desastre en México (Cenapred), lo que se considera una cuenca mediana y, por tanto, su estudio de manera local se dificulta. Asimismo, se tiene un desnivel altitudinal (DA) de 668.97 m, pues su cota máxima es de 2 270 msnm y su cota mínima, de 1 608.03 msnm, por lo cual se considera como bajo. Para tal situación, se determina una baja variedad climática y ecológica pues no presenta variaciones importantes en su precipitación y temperatura por la poca diferencia de la altura.

Los parámetros de forma nos indican que la cuenca es de oval oblonga a rectangular oblonga, según el resultado del coeficiente de Gravelius, e implicaría menores tiempos de respuesta ante una lluvia por su simetría. No obstante, es un parámetro adimensional poco preciso, pues la mayoría de las cuencas tienen forma de pera. La relación de elongación también nos indica que la cuenca no es ni alargada ni ensanchada, coincidiendo con la interpretación del coeficiente de Gravelius. Por tanto, se considera que la cuenca tiene una media susceptibilidad a generar crecidas, ya que en cuencas alargadas el viaje del agua es más largo y en cuencas ensanchadas se tiene una mayor rapidez en la concentración de la escorrentía superficial y una mayor violencia en sus crecidas.

La densidad de drenaje es un parámetro que se considera tanto de la forma como relativo a la red de drenaje. Su cálculo es una relación entre longitud total de los cauces de la red de drenaje y la superficie de la cuenca. Nuestro resultado nos indica una densidad alta que se traduce en que ante una lluvia se tendrá una respuesta rápida y, por tanto, poca probabilidad de que la escorrentía superficial se infiltre y pueda generar un bajo nivel de recarga de acuíferos. Además, una densidad alta de drenaje se asocia con materiales impermeables a nivel superficial, vegetación dispersa y relieves montañosos (Strahler y Strahler, 1994). No obstante, se debe considerar que parte de la red hidrológica superficial no es visible a causa de la urbanización.

Los parámetros del relieve son importantes. Éste influye en el tiempo de concentración de la escorrentía superficial. En este estudio se hizo la curva hipsométrica a cada 50 m de altitud y, en el mismo gráfico, se representó la curva

**Figura 4.** Metodología del mapa de susceptibilidad



Fuente: Elaboración propia, 2017.

de frecuencia de altitudes. Ahí observamos que hasta la altitud media se tiene el 40% del área acumulada de la cuenca y, según su forma, se concluye que es un río maduro. En cuanto a la altitud, la más frecuente es la que se encuentra entre los 1900-1950 msnm, con un total del 13.92%, y la menos frecuente está en el rango de 2251-2300 msnm, con 0.07%.

Otro parámetro de relieve es la altitud media de la cuenca, cuyo valor se encuentra en el rango más frecuente de la curva. La altitud más frecuente y media más frecuente tienen valores similares de 1 875 msnm. En cuanto a la pendiente media de la cuenca, el resultado de 15.71% lo sitúa dentro del rango fuertemente accidentado, lo que representaría una mayor velocidad del caudal y de arrastre de sedimentos en caso de tormentas. No obstante, la pendiente del cauce principal es baja, por lo que la escorrentía pudiera ser suavizada, es decir, más lenta.

En los parámetros relativos a la red, tenemos que la longitud del cauce principal o al punto más alejado de la cuenca es de 20.06 km, la cual es diferente a la longitud de la cuenca pues esta última medición es una línea recta que va paralelamente al cauce principal y cuyo resultado es de 11.39 km. La longitud de la red hídrica es de 450.98 km y es la suma de todos los escurrimientos en la cuenca sin importar su número de orden según la clasificación de Strahler; caso contrario es la longitud del cauce de mayor orden, que sólo considera un orden.

El sexto orden de la red hídrica nos indica que es una red grande con una estructura definida, con mayores posibilidades de erosión y con tendencia a ser una cuenca vieja. La constante de estabilidad del río es el inverso a la densidad de drenaje. El resultado es de 0.12 y muestra que la cuenca tiene una alta densidad de drenaje y baja capacidad de infiltración del suelo, lo cual corresponde con el resultado obtenido anteriormente. El coeficiente de torrencionalidad es alto y está relacionado con la densidad de drenaje, es decir que valores altos de densidad de drenaje son reflejo de una alta torrencionalidad y, por tanto, propicia mayores avenidas de agua.

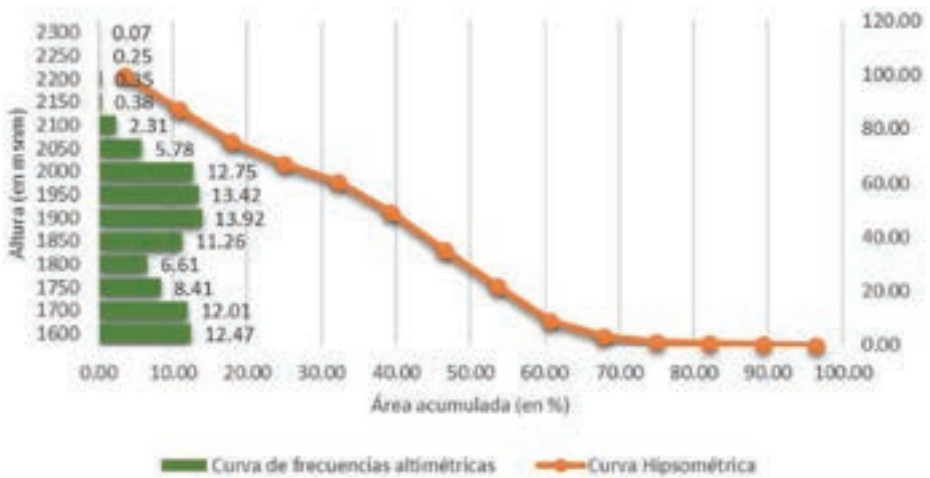
La estimación del tiempo de concentración de Kirpich dio como resultado 149.12 minutos, y la de Témez, 174.34 minutos. Según la clasificación de valores de ambas metodologías, los tiempos de concentración son lentos, al igual que el cálculo con la fórmula *California Culverts Practice* y de Chow. Sin embargo, en una cuenca mixta con las anteriores características de alta densidad de drenaje, pendiente, forma y, sobre todo, un alto dinamismo urbano, las lluvias intensas con duración de dos a tres horas podrían provocar avenidas que afectarían sobre todo en la parte media y baja de la cuenca. Esto daría pie a inundaciones, pues la mayor parte del agua escurriría sin dar tiempo a que el suelo infiltre y percole

**Tabla 2.** Parámetros de forma

Parámetro	Unidad	Valor
Ancho de la cuenca (w)	km	4.8179
Índice de compacidad de Gravelius (Cg)	und	1.7134
Factor de forma de Horton (Rf)	und	0.4231
Relación de elongación (Re)	und	0.7338
Relación de circularidad (Rc)	und	0.3356
Densidad de drenaje (DD)	km/km <sup>2</sup>	8.2208

Fuente: Elaboración propia, 2018.

**Figura 5.** Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes



Fuente: Elaboración propia, (2018), con base en continuo de elevación mexicano.

**Tabla 3.** Parámetros de relieve

Parámetro	Unidad	Valor
Altitud media de la cuenca $\bar{h}_c$	msnm	1 925.1400
Altitud más frecuente	msnm	1 875.5000
Altitud de frecuencia media (Em)	msnm	1 875.3435
Coeficiente de masividad (tg $\alpha$ )	km	35.0928
Pendiente media de la cuenca Sc	%	15.7141

Fuente: Elaboración propia, 2018.

a nivel subterráneo, lo cual también ocasionaría una deficiencia en la recarga de acuíferos.

Por último, en lo que respecta al cálculo de susceptibilidad a través de análisis espacial, obtuvimos valores cuantitativos de 5.5 a 21.5. Éstos se reclasificaron en cinco categorías de igual valor para asignar clases cualitativas de muy baja, baja, media, alta y muy alta susceptibilidad de inundación. Al analizar ambas fechas se pueden apreciar cambios en los cuales áreas de media susceptibilidad pasan a alta, y áreas de baja a media; es decir, de 1990 a 2015 hay aumento de zonas propensas a inundaciones. Coincidentemente, estos cambios se observan en las áreas hacia donde ha crecido la urbanización. En ambos mapas se visualiza que las zonas de muy alta susceptibilidad van siguiendo el curso de los cauces de orden superior, entre ellos el cauce principal.

En los mapas se aprecia que la parte baja en ambos periodos es altamente susceptible. No obstante, hay una pequeña superficie que en que no sucede así debido a que en ella la altitud es mayor y, por ende, sus escurrimientos alimentan el cauce principal. También se observa que en 2015 los valores medios comienzan a subir hacia las partes altas, posiblemente a consecuencia del aumento de áreas impermeables.

Si analizamos detenidamente, tenemos que en 1990 la zona con alta susceptibilidad es menor que la de 2015, a razón de que este sitio no estaba totalmente urbanizado y el uso de suelo urbano tiene un mayor peso que un área agrícola. El resultado muestra que esta zona es la más propensa a inundarse, ya que es también la que presenta menor altitud y pendiente. Esto es satisfactorio desde el punto de vista de las características físicas de la cuenca. Sin embargo, es propensa

**Tabla 4.** Parámetros relativos a la red hidrográfica

Parámetro	Unidad	Valor
Longitud del cauce principal (LP)	km	20.0622
Longitud de la cuenca	km	11.3863
Longitud de la red hídrica o total de cauces (LT)	km	450.9819
Longitud del cauce de mayor orden	km	8.8692
Perímetro (P)	Km	45.3241
Pendiente del cauce principal	m/km	33.3449
Pendiente media del cauce principal	%	3.3350
Pendiente media de la red hídrica	%	3.5244
Orden de la red hídrica Strahler	und	6.0000
Constantes de estabilidad del río (C)	und	0.1216
Densidad de corriente (Dc)	und	5.7052
Coefficiente de torrencialidad	und	58.5141
Tiempo de concentración Kirpich $\overline{T_c}$	min	149.1163
Tiempo de concentración Chow $\overline{T_c}$	min	149.3514
Tiempo de concentración Témez $\overline{T_c}$	min	174.3375
Tiempo de concentración California $\overline{T_c}$	min	156.5368

Fuente: Elaboración propia, 2018.

sólo por esa situación física, mas no quiere decir que tenga riesgo de inundación, pues para ello se tendrían que medir la vulnerabilidad, la exposición y el peligro. En este caso, no todas las colonias situadas en este polígono presentan problemas de inundación, ya que la vulnerabilidad es diferente.

En primer lugar, tenemos colonias como Las Fuentes, en la parte oriente del Periférico, diseñadas para mitigar inundaciones por medio de calles empedradas, zonas arboladas y un sistema hidráulico adecuado. Hablamos de aquellas cuyos habitantes tienen alto poder adquisitivo. Caso contrario sucede al oeste del Pe-

riférico. A pesar de tener la misma altitud, pendiente, geología y suelo, colonias como El Briseño, Paseos del Briseño y Agrícola presentan todas las características de un área propensa a esta problemática, una mayor vulnerabilidad a causa de la deficiencia de infraestructura hidráulica y una alta urbanización carente de planeación.

Otro polígono que sufrió un cambio notorio es el localizado a un costado del área de susceptibilidad alta antes mencionada, cerca de Paseos del Briseño. En 1990, ese pequeño rectángulo, por sus campos de fútbol y áreas agrícolas, era considerado de baja susceptibilidad, pero en 2015 el aumento de la urbanización en los alrededores y la disminución de áreas verdes la volvieron de susceptibilidad media.

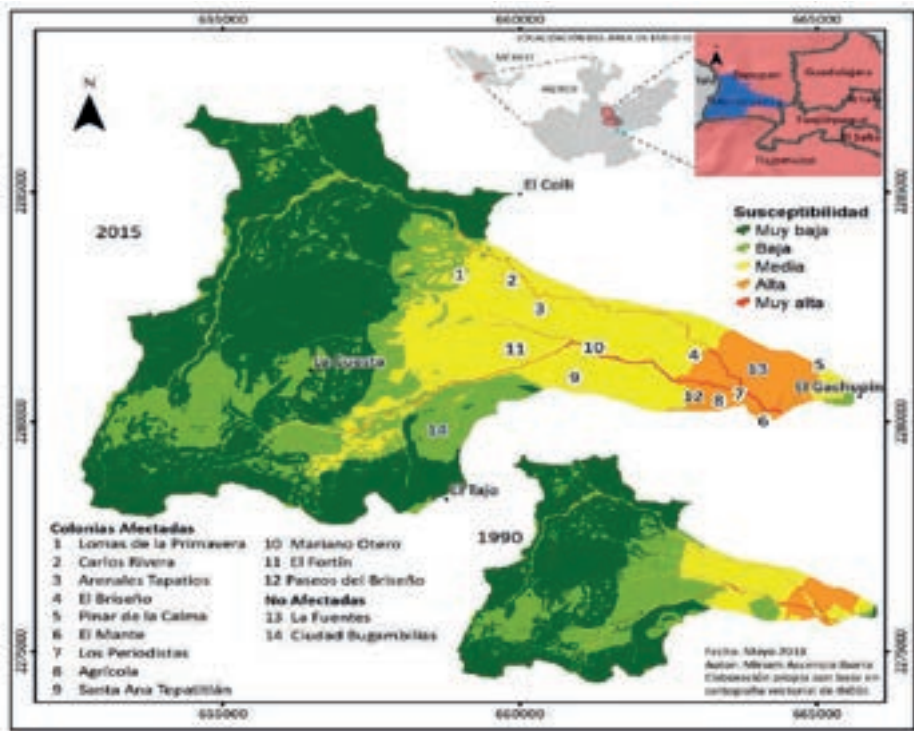
Por otro lado, en ambos mapas sobresale que la parte media de la cuenca tiene una media susceptibilidad y va conforme a la urbanización. Al calcular el riesgo, estas zonas son las que tendrán una mayor vulnerabilidad y exposición y, por ende, un mayor riesgo. En el mapa de 2015, la parte de mediana susceptibilidad se va incrementando a la parte alta de la cuenca, lo que coincide con el crecimiento urbano de la cuenca en los últimos 25 años. Se habla de colonias como Los Robles, Luna Bosque, Foret, La Granja y El Fortín, que no existían y que en el mapa de 1990 estaban catalogados como de baja susceptibilidad.

También se observa que la colonia Bugambilias presenta una susceptibilidad muy baja y baja a pesar de que ya se tenía urbanización en 1990. Esto se debe a que se localiza sobre el cerro del Tajo, a una altitud mayor a los 1 800 msnm. Este factor influye para que el agua no se acumule sino que escurra a las partes bajas y se evite una inundación. Por el contrario, la susceptibilidad en esta zona sería a causa de deslizamientos pero, en teoría, en colonias como ésta, cuya población es de un alto nivel socioeconómico, se cuenta con la infraestructura necesaria para mitigarlos.

Por último, la comparativa de los mapas de susceptibilidad a inundaciones es más precisa si analizamos el área en  $\text{km}^2$  o el porcentaje del grado de susceptibilidad en cada fecha. De 1990 a 2015 hay una disminución de  $4.85 \text{ km}^2$  de superficie de la cobertura que tiene muy baja susceptibilidad. Lo mismo ocurre en el rango de baja, con  $6.63 \text{ km}^2$ . Esto nos indica que áreas que no eran propensas a inundarse en 1990 pasaron en 2015 a ser más vulnerables a crecidas de agua, situación que se refleja al revisar el rango medio, alto y muy alto: en el primer caso, vemos un aumento de  $10.18 \text{ km}^2$ , casi el doble de la superficie catalogada como susceptibilidad media en 1990; en el segundo caso, el incremento es de  $1.5 \text{ km}^2$ , y en el tercero, de  $0.14 \text{ km}^2$ . Quizá este último valor es poco signifi-



**Figura 6.** Mapa comparativo de la susceptibilidad de inundación en 1990 y 2015



Fuente: Elaboración propia (2018) con base información vectorial del Inegi.

cativo, pero debido a que se trata de un área anteriormente no considerada de muy alta susceptibilidad, no se tienen medidas de prevención en caso de lluvia extraordinaria.

Lo anterior implica un aumento de más de 11 km<sup>2</sup> de áreas susceptibles a inundación sumados a los 10 km<sup>2</sup> que ya se tenían. Sería necesario un análisis local para conocer los problemas específicos e implementar alguna obra hidráulica o pluvial que minimice el problema: primero en la parte media de la cuenca, a través de la disminución del caudal, para que en la parte baja sea más fácil el manejo de la escorrentía por medio de alguna obra de drenaje sostenible.

**Tabla 5.** Comparativa de superficies susceptibles a inundación

1990			2015		
Susceptibilidad	Área (km <sup>2</sup> )	%	Susceptibilidad	Área (km <sup>2</sup> )	%
Muy baja	29.22	53.27	Muy baja	26.56	48.42
Baja	15.59	28.42	Baja	11.95	21.79
Media	7.16	13.05	Media	12.74	23.23
Alta	2.71	4.94	Alta	3.34	6.09
Muy alta	0.18	0.32	Muy alta	0.26	0.47
Total	54.86	100	Total	54.86	100

Fuente: Elaboración propia, 2018.

## 5. Consideraciones finales

Durante el desarrollo de este estudio se preparó cartografía temática que sirvió para el cálculo de parámetros morfométricos y para la obtención de mapas de susceptibilidad a inundaciones en dos periodos. En este sentido, los sistemas de información geográfica fueron una herramienta importante pues permitieron integrar la información, facilitaron su manejo y contribuyeron al análisis de los elementos cuantitativos y cualitativos. Asimismo, se realizaron reportes y tablas que explican tanto las cualidades morfológicas de la cuenca, como las superficies que pudieran verse afectadas.

Los resultados de la superposición o combinación de cartografía temática para la generación de los mapas de ambas fechas que presentan las áreas más propensas a inundarse fueron los esperados, pues sólo se consideraron las características físicas de la cuenca en las que tienen mucho peso la altitud, pendiente y urbanización. Por ello, podía pronosticarse que la parte más baja de la cuenca y más densamente poblada fuera la más susceptible. Además, se ve claramente cómo ha influido la expansión urbana en el aumento de las áreas susceptibles a inundación y desequilibrio en el microsistema.

Aunque la cartografía inicial con la que se trabajó, por su uso más regional, no tenía el detalle necesario para efectuar un estudio más preciso, es la información oficial que existe actualmente en México. A pesar de que el resultado no tiene el detalle requerido para un análisis local de las zonas de riesgo a inunda-

ción e implementación de medidas de mitigación, sí fue funcional para nuestro estudio, ya que nos permitió una visión de las características de la cuenca y pudimos identificar el aumento del área urbana, que contribuye a que dichas zonas sean más propensas a inundarse debido al incremento en el número de áreas impermeables y del grado de exposición, además de la combinación de varios factores como la pendiente, altitud, cercanía a los arroyos, tipo de suelo.

Asimismo, los mapas de susceptibilidad, en particular el de 2015, sirven como base para estudios posteriores, pues con ellos se delimitarán las áreas pertinentes para el trabajo de campo y/o un estudio más local con el fin de calcular el riesgo de inundación y proponer medidas de prevención y control sostenible, tanto para la población como para el Gobierno, y así evitar pérdidas sociales o económicas en las colonias ubicadas dentro de esta cuenca.

Los años de estudio seleccionados para los mapas de susceptibilidad fueron los adecuados. En 1990, el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) por primera vez superaba los dos millones de habitantes (Inegi, 1990) y comenzaba un proceso de expansión urbana deficiente de planificación; esto último, coincidente con la urbanización de la cuenca. Por otro lado, el mapa de 2015, último año en que tenemos registros de población, muestra que en 25 años el suelo urbano de la cuenca aumentó más del 200%. Ese hecho hace que tengamos una comparación con un mayor contraste acorde con el crecimiento del AMG y conforme a la realidad de la cuenca.

Por otra parte, los parámetros morfológicos explicaron de manera adecuada la forma de la cuenca, de tal manera que, en la mayoría de los casos, la interpretación del resultado de un parámetro era coincidente con otro que explicaba la misma situación. Las cuantificaciones de altitud también fueron muy similares. Los relativos a la red de drenaje en todas las situaciones nos indican que la cuenca tiende a generar avenidas. Esto queda claro cuando vemos en el tiempo de concentración que, aunque se clasifica lento, va de la mano con los datos de pendiente, densidad de drenaje, coeficiente de torrencialidad, el orden de la red de drenaje y, sobre todo, la urbanización.

A pesar de que el coeficiente de escurrimiento es lento, al descubrir que en la cuenca han habido lluvias de gran intensidad, problemas recurrentes de inundaciones y una alta urbanización, no se debe descartar la posibilidad de desbordamientos de gran magnitud ante un evento extraordinario; no olvidemos que sólo consideramos las variables físicas y no tomamos en cuenta que hay áreas con déficit de infraestructura hidráulica.

Con este estudio se determinó que los sistemas de información geográfica son una herramienta conveniente para el análisis del territorio y que la combi-

nación de las capas de información temática examinadas facilitó una tipificación acertada de las características del área de interés. Aunado a lo anterior, se concluye que si se parte de información más local se podría tener una cartografía más precisa, con mayor apego a la realidad y una menor incertidumbre. De igual forma, se observó de manera general que en la parte oeste de la cuenca prevalecen las altitudes mayores y que esto provoca que la escorrentía viaje hacia la parte media y baja a gran velocidad. Es en esta zona donde existe un alto dinamismo urbano y, por ende, riesgo a inundación.

Se recomienda que las posteriores investigaciones se realicen con información más detallada por medio de trabajo de campo delimitado, sobre todo en las áreas más conflictivas, ya que hacerlo para la totalidad de la cuenca se traduce en altos costos de tiempo y dinero. Deben recogerse datos sobre el nivel que pueden alcanzar la ribera y el agua ante crecidas, con el fin de calibrar los datos arrojados del cálculo de parámetros morfométricos relativos a la red hidrográfica y para hacer simulaciones de riesgo de inundaciones en nuevos estudios.

Según información hemerográfica, las áreas catalogadas en estos mapas como de alta y muy alta susceptibilidad corresponden en gran medida a las zonas que se inundan de manera recurrente, por lo que el trabajo de campo puede contribuir a precisar cuáles son más conflictivas y cuáles tienen deficiencia hidráulica y pluvial. Por otra parte, al pretender estudiar la cuenca a detalle se tendría que hacer algún tipo de simulación, para lo cual hay que ubicar la infraestructura de la red hidráulica y pluvial, además de las áreas que podrían retener agua.

## Referencias

- APARICIO MIJARES, F.J. (2007). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa.
- CAMPOS ARANDA, D. (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Potosina.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1996). *Manual de climatología aplicada*. Síntesis, S A.
- IGAC. (1982). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Recuperado de <https://www.igac.gov.co/>
- INEGI. (1990). *XI Censo General de Población y Vivienda 1990*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2015). *Encuesta Intercensal*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- MACRO E.I.R.L. (2011). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje*. Macro E.I.R.L.
- MORA, R., CHÁVEZ, J. Y VÁSQUEZ, M. (2002). *Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: Resultados obtenidos para la Península de Papagayo mediante la modificación del método Mora & Váhrson*. Memoria del tercer del tercer curso internacional sobre microzonificación y su aplicación en la mitigación de desastres.
- OCHOA RUBIO, T. (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos* (Primera ed.). Ecoe.
- ONU. (2012, 2014). *La situación demográfica en el mundo*. Naciones Unidas.
- PDC. (2009). *Centro de desastres del Pacífico*. <http://pdc.org/web/floodterminology.jsp?subg=1#sectF>
- SALAS SALINAS, M.A. Y JIMÉNEZ ESPINOSA, M. (2007). *Inundaciones*. Cenapred, SERIE Fascículos.
- STRAHLER, A.N. Y STRAHLER, A.H. (1994). *Geografía física* (Tercera ed.). Omega.
- VAN ZUIDMA, R.A. (1986). *Aerial photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. *The Hague*. Smits Publishers.

## Capítulo 6

# Ciudad Región sostenible: la importancia del recurso hídrico para la Sabana de Bogotá

■ Jair Preciado Beltrán<sup>10</sup>

### 1. Introducción

El territorio de la Región Capital constituye un escenario sumamente dinámico compuesto por un conjunto de municipios agrupados alrededor de la ciudad de Bogotá. Los complejos problemas sociales, económicos y ambientales que la región viene experimentando ameritan una intervención urgente desde la perspectiva del planeamiento urbano. Justamente, la ausencia de una política urbana coherente, sólida y con proyecciones en el tiempo ha generado ese cuadro preocupante. La existencia de dos gobiernos paralelos, uno para la ciudad de Bogotá y otro en manos de la Gobernación de Cundinamarca, genera un fenómeno de ingobernabilidad, duplicación de esfuerzos y un histórico abandono de estos municipios por parte de los gobernantes de turno (Cuervo, 2003).

Municipios como Zipaquirá, Facatativá, Chía y Soacha constituyen un verdadero ejemplo de la expansión urbana y de la presión social por servicios públicos y vivienda. Otros, como Funza, Mosquera y Madrid, presentan un fenómeno acelerado de construcción de vivienda, como si presintieran la vecindad con que Bogotá viene traspasando la frontera ecológica del río Bogotá. Paradójicamente, son municipios con una gran dependencia de la gran ciudad en cuanto al abastecimiento de agua potable, energía eléctrica y otros servicios.

---

10 Doctor en Geografía. Docente Investigador. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”.  
jair.preciado@gmail.com

Desde una perspectiva ambiental y ecológica, la estructura biofísica de Bogotá y los municipios de su área de influencia debe absorber el impacto de un proceso descontrolado. La urbanización no planificada, debida a la necesidad de vivienda de grandes grupos familiares, conllevó a la aparición de sectores marginados con sus correspondientes problemas sociales y ambientales. Lo paradójico es que este proceso, a todas luces ilegal, acabó siendo legitimado por el Distrito Capital, particularmente con la provisión de servicios públicos, construcción de redes de alcantarillado, implementación de servicios de salud, transporte, educación y otros equipamientos urbanos.

El presente documento aborda, como objetivo principal, la transformación del territorio conocido como Sabana de Bogotá, especialmente en su primer anillo de influencia. En estos territorios se está llevando a cabo una transformación significativa marcada por la presencia de proyectos de vivienda, industrias, zonas francas, colegios y otros más asociados a la minería y la agroindustria. Los efectos sobre los recursos naturales han traído consigo problemas socioambientales que hasta ahora no han sido dimensionados en su verdadera magnitud, como la contaminación de las aguas del río Bogotá, la de los humedales de la Sabana de Bogotá o la producción de residuos sólidos, por mencionar sólo algunos. Esto debe servir para que los tomadores de decisiones y los grupos de pensamiento actúen en términos de defender las zonas de reserva natural que todavía quedan en la Sabana de Bogotá, y se replanteen los escenarios del desarrollo regional sin sacrificar el patrimonio natural.

## 2. Marco teórico

Como una estrategia para el conocimiento de las áreas metropolitanas, es de vital importancia mirar casos similares significativos a nivel latinoamericano, como el de Brasil, donde la problemática ambiental urbana de las últimas dos décadas muestra preocupaciones paralelas a las de Colombia. La formación de las regiones metropolitanas en Brasil ha sido uno de los principales temas de los investigadores en los últimos años. En sus *Ensayos sobre a urbanização Latino-americana*, Milton Santos (1982) habla de la creación de dos grandes Estados: Brasil y Argentina, así como otros países más pequeños, cuya urbanización gira en torno a una gran ciudad. La organización del espacio en Latinoamérica se caracteriza por el refuerzo de los polos históricos.

Una particularidad de Brasil ha sido la conformación de enclaves industriales mucho antes que otros países latinoamericanos. Uno de los efectos más importantes generados por estos polos de desarrollo industrial es la movilidad de personas buscando empleo en el sector secundario de la economía. La de-

manda de mano de obra implica un proceso de migración que, para las décadas de 1950 y 1960, fue bastante marcado en nuestros países latinoamericanos. El rápido y desordenado proceso de urbanización es otro de los efectos directos de una concentración industrial en los centros urbanos, debido en gran parte a la apropiación de las economías externas de aglomeración, generadas por la metropolización de estas regiones-polo, por parte de las grandes empresas poseedoras de tecnología (Cintra *et al.*, 1978, p. 68)

Uno de los aspectos singulares de estos polos en Brasil es su localización dentro de las ciudades. Como en el caso de Colombia, muchas industrias se fueron asentando en lo que para los años 60 y 70 eran los suburbios. Con la demanda de mano de obra y la expansión urbana, estas industrias quedaron dentro de la estructura central de las ciudades, con lo que se vino una serie de problemas de orden ambiental que en décadas recientes son materia de preocupación por la necesidad de construir una mejor calidad de vida al interior de la ciudad.

El tema de la planificación urbana ha sido abordado por distintos investigadores brasileños. Una de sus aristas es la influencia de capitales internacionales en la conformación de centros industriales y sus efectos sobre los centros urbanos donde se asientan. Autores como Cintra a fines de la década de 1970, evidencian la dificultad para disminuir los desequilibrios regionales cuando se trata de economías abiertas y articuladas al mercado internacional, lo que hoy día conocemos como “empresas multinacionales”. Esto llama la atención sobre el problema del desarrollo regional, la generación de renta y el empleo, lo cual lleva a una competitividad regional por atraer aquellas empresas que aportan beneficios regionales. Ésta es una característica de nuestros países latinoamericanos: gran parte de nuestras economías regionales se han impulsado por la inyección de capitales multinacionales. Si bien es cierto que se debe reconocer a la generación de empleo, el mejoramiento de las condiciones de habitación y los servicios públicos como consecuencia directa del ingreso familiar a una población mayoritariamente empobrecida, también es necesario analizar la marginalidad, la exclusión y la pobreza de otros sectores urbanos que muestran ese desequilibrio cuando la demanda de mano de obra disminuye y aumentan los mecanismos tecnológicos para reducir los costos de producción de estas grandes empresas.

Enrique Rattner (1974), en su texto clásico *Planejamento urbano e regional*, señala otro aspecto de gran importancia en la problemática urbana de Brasil: la atomización de los municipios cercanos a Sao Paulo en la medida en que se convierten en una región metropolitana sumamente compleja en términos de crecimiento urbano, procesos demográficos y calidad de vida. El autor muestra



que la conformación de polos industriales dio origen a un crecimiento intenso y rápido de varios municipios satélites de Sao Paulo y, con él, a la alteración de sus relaciones económicas, sociales, culturales y ambientales. Sin duda, detrás de estos fenómenos se encuentra la ineficiencia del Estado para controlar dichos procesos de expansión urbano-industrial, que reflejan la anarquía, la especulación desenfrenada con los precios del suelo urbano y aquellos conflictos sociales generados al consolidarse un polo industrial en zonas donde hasta hace poco prevalecía un modo de producción rural.

En Colombia existe un retraso considerable en el desarrollo de políticas públicas orientadas a la planificación de las grandes ciudades, particularmente en el caso de Bogotá y su área de influencia. Mientras que en los países industrializados los sectores periféricos han experimentado el impacto de los renovados patrones de comercio internacional y la preeminencia (económica y política) de las empresas transnacionales, en América Latina se ha acentuado la dualidad entre la ciudad modernizada y las periferias con sus conurbaciones donde se encuentran las casas y las unidades económicas relacionadas con la pequeña economía urbana, las actividades de baja productividad y el tejido urbano en gran parte “autoconstruido” y no bien articulado con otros segmentos espaciales.

### 3. Metodología

El desarrollo de esta investigación tuvo como base el diagnóstico socioambiental de 16 municipios de la Sabana de Bogotá: Funza, Mosquera, El Rosal, La Calera, Madrid, Tenjo, Cota, Facatativá, Sibaté, Cajicá, Sopo, Zipaquirá, Tabio, Chía, Tocancipá y Soacha. Estos municipios son sumamente importantes porque sobre ellos existe la presión de expansión urbana de Bogotá y porque en este territorio se lleva a cabo una acelerada transformación con implicaciones ambientales negativas. Esto debe servir como reflexión sobre los escenarios que deben construirse para fortalecer y consolidar el concepto de Ciudad Región garantizando la sostenibilidad social y ambiental del territorio. Cada diagnóstico se dividió en cuatro temáticas: escenario urbano, dimensión ambiental, ordenamiento del territorio y avances en términos de articulación regional.

Metodológicamente, se realizó un recorrido conceptual sobre la problemática de regiones metropolitanas en Latinoamérica y su dinámica de transformación, especialmente en los casos de Sao Paulo y México. De igual forma, se entrevistó a distintos actores sociales e institucionales de la región para tener una visión alternativa de la problemática. Finalmente, se llevó a cabo un ejercicio de identificación de los principales problemas sociales y ambientales del territorio, apoyado en recorridos de campo durante un año. A lo largo de este periodo

se constató el grave deterioro ambiental en la Sabana de Bogotá y la necesidad de un equilibrio migratorio que permita pensar en una sostenibilidad regional. Esto quiere decir que la Ciudad Región no debe llegar a la situación del Distrito Federal, ahora Ciudad de México, o de Sao Paulo, especialmente si tenemos en cuenta que Colombia se enfrenta a un escenario postconflicto que requiere de ideas y propuestas para una población que ha salido de sus lugares de origen buscando una oportunidad de vida en territorios como la Sabana de Bogotá.

## 4. Resultados y discusiones

### 4.1 La transformación de la Sabana de Bogotá

El territorio conocido como la Sabana de Bogotá ha sido históricamente la reserva de bienes y servicios de la ciudad de Bogotá. Sin embargo, desde hace algunas décadas, esta relación ha venido cambiando de forma acelerada. El río Bogotá en su cuenca media ha labrado un paisaje característico de los valles interandinos que, en el caso de la Sabana, se remarca por la oferta de suelos, ríos, humedales y una fauna que poco a poco ha ido desapareciendo.

En los procesos geológicos formativos, el río Bogotá y el paisaje aledaño determinaron el escenario ideal para el asentamiento de comunidades indígenas prehispánicas que desarrollaron sociedades complejas, y cuyo legado poco conocen las nuevas generaciones. El encuentro doloroso para los indígenas con la cultura europea marcó la dinámica poblacional y territorial de la sabana. Entre los siglos XVI y XIX, las comunidades de indígenas se vieron reducidas a territorios que la colonia española denominó “resguardos” para facilitar el aprovechamiento de las valiosas tierras de cultivo. En el siglo XIX, la expansión de las haciendas en este territorio incentivan formas de poder económico y territorial que determinarían otros conflictos.

A lo largo del siglo XIX, la Sabana de Bogotá evidenció una explotación de sus recursos y una transformación derivada de la fragmentación hacendaria que causaron en gran parte la desaparición de sus humedales, fuentes de agua, bosques y suelos, así como el destierro de su fauna. Tal vez una de las características en el manejo del territorio por parte de los españoles, y luego por los colombianos que habitaron la Sabana, sea el poco valor que se le dio a los recursos hídricos, concretamente a la belleza y utilidad de los humedales y cuerpos de agua.

Se calcula que existieron alrededor de 50 mil hectáreas de humedales en la Sabana hasta las primeras décadas del siglo XX (Salas, 2013). Una causa para tal valoración es la intención de transformar el suelo lacustre en suelo para uso

agropecuario. Esto claramente valoriza el suelo, y la herramienta que se empleó, con gran éxito, fue la siembra focalizada de especies como el *Eucaliptus globulus*, originaria de Australia e introducida para secar los humedales y ampliar los potreros para el uso agropecuario (Carnegie, 1990).

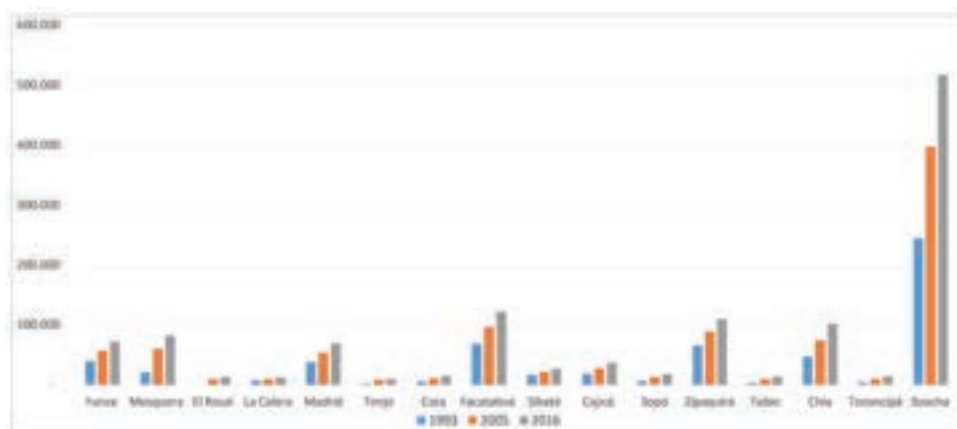
Adicionalmente, hubo interés por la búsqueda de “tesoros” que pertenecieron a los indígenas muisca. La desecación de las lagunas en busca de oro, incluso a finales del siglo XIX, cuando se suponía un ordenamiento jurídico y social avanzado, no deja de ser una actividad sumamente agresiva con los recursos naturales. En el caso de la laguna de Guatavita, a pesar de la expoliación de unas reliquias de la cultura muisca ante la indiferencia de los gobiernos en turno, se creó tardíamente la consciencia de conservar estos reductos de los grandes lagos del pleistoceno. Tal como lo refiere Hettner cuando en 1882 visitó la laguna de Guatavita, al parecer los cuerpos de agua seguían siendo, para muchas personas, un lugar de tesoros más que un valioso recurso hídrico.

Aproximadamente a una jornada de distancia en dirección noreste de Bogotá, o sea en las cercanías de las poblaciones de Guatavita y Guasca, se encuentran varios lagos pequeños incrustados en la montaña circundante a la Sabana. Con su escaso kilómetro de circunferencia, son comparables a los ojos marítimos (*Meeraugen*) de la Tatra (Hungría). La escasa vegetación a su alrededor, unida a un cielo por lo general nublado, les confieren un aspecto más bien triste. Como adoratorios indios que eran estos lagos, el pueblo sigue tomándolos por escondederos de considerables tesoros de orfebrería, creencia que no parece infundada pues ha originado repetidos ensayos para desaguar las lagunas de Guatavita y de Siecha (Hettner, 1882).

Los relatos de viajeros del siglo XIX que pasaron por Bogotá y la Sabana muestran que el bosque natural literalmente desapareció de la altiplanicie y de las zonas montañosas, bien sea por la tala para la utilización de la leña o para el establecimiento de cultivos y ganadería. La flora nativa quedaría reducida a pequeños espacios asociados a los últimos humedales y zonas de microcuencas de la gran cuenca del río Bogotá (Plata, 1984).

A lo largo del siglo XX se aprecia un aumento del número de industrias que se establecieron en los municipios de la Sabana de Bogotá, lo cual conllevó a ampliar el número de habitantes debido a la demanda de mano de obra. Adicionalmente, las industrias asentadas en la ciudad de Bogotá comenzaron a establecerse en los municipios sabaneros, atraídas por exenciones tributarias y otros beneficios, lo cual naturalmente incrementó el número de instalaciones industriales y comerciales. Esto derivó en la transformación del paisaje,

Figura 1. Población área de estudio



Fuente: Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2017.

pues estas industrias y el crecimiento poblacional de los municipios demandó mayor cobertura de servicios públicos.

La expansión urbana de Bogotá entre las décadas de 1970 y 2010 determinó un cambio en el paisaje de la Sabana: de ser la despensa de la ciudad se convirtió en un territorio sin identidad, en el cual se ofertaban cada día proyectos de vivienda sin antes planificar este voraz mercado. Igualmente, se produjo un aumento en la producción de aguas servidas y residuos sólidos, lo que generó, y sigue generando, una problemática socioambiental que no ha sido asumida con la claridad que exige este fenómeno (Preciado, 2015).

#### 4.2 Los conflictos socioambientales en el territorio de la Ciudad Región

Uno de los principales problemas en el territorio metropolitano de Bogotá es el crecimiento poblacional. Dentro de esta variable, el tema del desplazamiento forzado ha sido determinante para transformar el territorio de algunos municipios, como es el caso de Soacha. Existe un flujo de trabajadores de la región que se incorporan a actividades como la industria de las flores, la minería y otras actividades asociadas al tema agroindustrial. La mayor parte de la población vive

en la zona fronteriza de Bogotá, en localidades como Ciudad Bolívar, Bosa y Suba. Esta gente es parte del flujo migratorio diario en la Ciudad Región.

Como se aprecia en la figura anterior, la población en municipios como Soacha revela un crecimiento acelerado en 15 años. En una situación similar se encuentran Chía, Cajicá, Mosquera, Funza y Madrid, que vienen presentando una construcción de vivienda sumamente fuerte en la última década. En contraste, municipios como Tenjo y Tabio se han negado a participar, al menos en un nivel controlado, de esa presión urbanizadora.

La falta vivienda es uno de los principales problemas en la región. De acuerdo con el Ministerio de Medio Ambiente, (2009), el departamento de Cundinamarca reportó un total de 371 079 predios para el año 2005, y se proyecta un déficit de viviendas de 973 498 para 2020. La Sabana de Bogotá tiene un total de 57 mil predios, con un déficit de 207 mil.

Por otra parte, el área metropolitana de Bogotá, y específicamente en los municipios de estudio, refleja la situación del país: una fuerte desigualdad social. Fenómenos como el desplazamiento, la pobreza rural y urbana, el desempleo y el bajo acceso a los servicios como la educación y la salud, representan grandes retos para los alcaldes municipales. Por supuesto, esto no puede ser responsabilidad exclusiva de los alcaldes. Las instituciones del Estado deben hacer un ejercicio de convergencia de acciones para mejorar la situación de los sectores sociales que presentan niveles críticos de exclusión, especialmente en el escenario postconflicto *ad portas*.

En cuanto a la dimensión ambiental del territorio regional, el Instituto Alexander von Humboldt (2008) muestra que la región central (Bogotá-Cundinamarca, Boyacá, Meta y Tolima) conserva solamente un 50% de la cobertura de vegetación original. Adicionalmente, reporta que el departamento de Cundinamarca tiene 483 877 h de ecosistemas naturales, correspondientes a un 20% de su territorio. En relación con las áreas protegidas, se sugiere que la región central del país cuenta con 330 de ellas en una superficie de 2 606 279 h, que representan el 16% del territorio. A su vez, los cuatro departamentos de la región poseen el 15.7% del territorio protegido, y el Distrito Capital, el 0.9%.

A lo largo de esta década se ha demostrado la necesidad de un mecanismo de integración y coordinación entre las instituciones públicas, el sector privado, los municipios y la sociedad civil para un escenario regional sostenible. En este sentido, la dimensión ambiental tiene implicaciones aun mayores, sobre todo porque la planificación urbano-regional en las próximas décadas debe superar su actual visión reduccionista, aislada y fragmentada, y generar estrategias de

**Figura 2.** Panorámica de la Sabana de Bogotá



Fotografía: Preciado, 2018

conservación y recuperación de los ecosistemas estratégicos para la zona metropolitana de Bogotá.

Los recursos naturales de esta región se ciñen al concepto de ecosistemas estratégicos, ya que son indispensables para cubrir las necesidades de su población e industria. En este sentido, las cuencas hidrográficas constituyen, en el ámbito regional, el espacio vital para la provisión de bienes y servicios como, por ejemplo, regulación del agua en los procesos del ciclo hidrológico, conservación del hábitat de especies endémicas de flora y fauna de los ecosistemas alto andino y páramo, suministro de agua potable en centros urbanos y abastecimiento en las cuencas hidrográficas para la generación hidroeléctrica (Preciado, 2015).

En la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) se encuentran distribuidos diferentes ecosistemas estratégicos, páramos, humedales y áreas de reserva forestal. En el área total de 116 municipios que están bajo la administración del CAR, han sido identificados 45 ecosistemas naturales, de los cuales 22 se encuentran en áreas protegidas y en los parques naturales nacionales de Sumapaz y Chingaza (CAR, 2009, pp. 47-49). Estos dos parques son muy importantes para la región.

El primero se caracteriza por una importante riqueza en páramos, con un área aproximada de 178 mil hectáreas, y es reconocido internacionalmente por

sus especies endémicas de flora, como bromelias (*Bromeliaceae*) y frailejones (*Espeletia grandiflora*), y fauna silvestre, como el oso de anteojos (*Tremarctos ornatus*) y el venado (*Cervidae*). El Sumapaz es conocido como la “estrella fluvial” debido a la numerosa red de ríos —como la cuenca del Orinoco— que aporta al sector local, regional, nacional e internacional.

El segundo, el parque Chingaza, está ubicado geográficamente en los departamentos de Cundinamarca y Meta, y tiene una extensión de aproximadamente 76 mil hectáreas. Este territorio no solamente posee un ecosistema de páramo con especies de interés ecológico significativas, sino que también abastece el 80% de la demanda de agua potable de Bogotá.

El concepto de “área protegida” fue concebido 1992 por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), y adoptado por Colombia en la Convención sobre Diversidad Biológica a través de la Ley 165 de 1994, la cual establece que es: “un área definida geográficamente que haya sido designada o regulada y administrada a fin de alcanzar objetivos específicos de conservación”. En Colombia existen 49 áreas declaradas en las categorías de la UICN, las cuales conforman el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) administrado por la Unidad Administrativa Especial de Parques Nacionales. Esta institución es responsable de supervisar la gestión de otras áreas protegidas a nivel regional y local.

En la actualidad, el del río Bogotá es uno de los temas ambientales más importantes para la región central colombiana. Históricamente contaminado tanto por industrias como por la población de los municipios y la ciudad de Bogotá, es ahora objeto de un plan de manejo para su recuperación. En marzo del año 2014, el Consejo de Estado produjo un fallo encaminado a la recuperación del río. Este fallo de la sección primera de la Sala de lo Contencioso Administrativo marca un hecho histórico en la gestión de los recursos naturales del país. Por primera vez, un mecanismo jurídico incorpora a un conjunto de actores sociales e institucionales para que, en un ejercicio de convergencia, se logre paulatinamente la recuperación del río. Resulta pertinente resaltar la importancia de este fallo, que pone en evidencia la falta de interés en la recuperación del río Bogotá, como quiera que la ciudad de Bogotá aporta aproximadamente un 90% de carga orgánica al río, lo que afecta a los municipios ubicados aguas abajo del municipio de Soacha (Semana, 2018).

De acuerdo con un informe elaborado por la revista *Semana* en enero de 2018, en su cuenca media llegan al río Bogotá las descargas de aproximadamente nueve millones de personas, correspondientes a unos 16 mil l/s de aguas residuales, de las cuales solamente se tratan 4 mil l/s en la planta El Salitre. La

situación es aun peor si se tiene en cuenta que el río recibe aproximadamente 800 toneladas de residuos por día, lo que complica la tarea de descontaminación (Semana, 2018).

Teniendo en cuenta el grado de deterioro del río Bogotá, se hace necesario aunar esfuerzos para su descontaminación y recuperación. En este sentido, según una entrevista al ingeniero Aníbal Acosta, director operativo del Fondo para las Inversiones Ambientales de la Cuenca del río Bogotá (FIAB) (El Nuevo Siglo, 2017), los esfuerzos se han visto encaminados en dos aspectos principales. El primero es una adecuación física (hidráulica) para minimizar los riesgos de inundación por efecto de fuertes precipitaciones y, por lo tanto, el aumento del caudal medio. Dicha adecuación se realiza por medio de la ampliación del cauce de tal manera que puedan pasar de 100 m<sup>3</sup>/s a 200 m<sup>3</sup>/s. Con respecto a este proyecto, ya se tienen 68 km adecuados, correspondientes específicamente a la cuenca media del río Bogotá, desde las compuertas del Alicachín en Soacha, hasta el sitio conocido como Virgen en Cota. El segundo frente consiste en la compra de seis millones de metros cuadrados para proporcionar una zona de amortiguación o de inundación controlada. Es necesario y urgente modificar la calidad del agua, lo cual se pretende hacer por medio de dos plantas de tratamiento de aguas residuales. Para el caso de la cuenca media, se hace referencia a la ampliación y optimización de la planta Salitre, con tratamiento secundario y desinfección, con el objetivo tratar todas las aguas provenientes del norte-centro de Bogotá (El Nuevo Siglo, 2017).

## 5. Consideraciones finales

Desde la llegada de los españoles en el siglo XVI, la Sabana de Bogotá experimenta una transformación del territorio en cuanto a las perspectivas ambiental y social. A partir de mediados del siglo XIX, y durante todo el siglo XX, el territorio sabanero sufrió la pérdida de sus ecosistemas, especialmente de los humedales. Los ríos que corren por su territorio han sido objetivo del vertimiento de aguas servidas domésticas e industriales. Éste es el caso del río Bogotá, que durante décadas fue el ecosistema adonde han ido a parar no solamente residuos de aguas contaminadas, sino toda clase de residuos sólidos y prácticas inadecuadas, lo cual ha conllevado a declararse como el río más contaminado de la tierra.

A lo largo de los últimos cincuenta años, la ciudad de Bogotá ha crecido tanto física como demográficamente. La capital de Colombia es una metrópolis importante en el contexto latinoamericano e internacional. Si no se tienen en cuenta los casos de Ciudad de México y Sao Paulo de hace más de cuarenta




años, la situación de Bogotá puede desembocar en un crecimiento desordenado y caótico, absorbiendo municipios y territorios vitales para la sostenibilidad ambiental.

La construcción de la Ciudad Región tiene implicaciones en el ámbito económico, político, administrativo y, en especial, el ambiental, pues “los problemas ambientales son regionales”. La contaminación hídrica no reconoce fronteras municipales o administrativas. La contaminación atmosférica afecta territorios que no son generadores de estos desajustes. La pérdida de humedales afecta al territorio y lo hará con mayor fuerza en las próximas décadas. La pérdida de agua subterránea perjudicará a los municipios sabaneros en los siguientes años. Estos problemas son críticos porque hasta ahora se han visto como elementos aislados o de competencia de un determinado municipio o de la ciudad de Bogotá.


## Referencias

- AGUILAR, M. (2018, 27 de febrero). Humedales en peligro. *Semana*. <https://www.semana.com/opinion/articulo/humedales-en-peligro-opinion-ambiente-y-sociedad/39608/>
- CARNEGIE, R. (1990). *Un año en los Andes o aventuras de una lady en Bogotá*. Ed. Tercer Mundo.
- CINTRA, A. Y HADDAD, P. (1978). *Dilemas do planejamento urbano e regional no Brasil*. Zahar.
- COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. (1994). Ley 165 de 1994 (9 de noviembre).
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. (2009). Acuerdo 29 de 2009 (28 de octubre de 2009). Plan de Acción 2007-2011.
- CUERVO GONZÁLEZ, L.M. (2003). Globalización y dinámica metropolitana: el caso de Bogotá en los años 1990. En *El desafío de las áreas metropolitanas en un mundo globalizado: una mirada a Europa y América Latina*, pp. 315-345. Instituto Catalán de Cooperación Iberoamericana/I'Institut d'Estudis Territorials.
- HETTNER, A. (1976). *Viajes por los andes colombianos (1882-1884)*. Banco de la República. Bogotá.
- INSTITUTO ALEXANDER VON HUMBOLDT. (2008). *Propuesta de estructura ecológica regional para la región central*. Gobernación de Cundinamarca.
- MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES. (2017). *Población de Cundinamarca*. <https://www.datos.gov.co/Mapas-Nacionales/Poblaci-n-Cundinamarca-2017/ggy4-gvse/data?pane=manage>
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO. (2009). Crisis en la vivienda social: retos y alternativas. En *Avances y retos para reactivar la construcción de la vivienda. Perspectiva regional Bogotá-Sabana*. Foro. Agosto 19 de 2009. [http://www.bogotacmovamos.org/datos/AA\\_88\\_Ministerio\\_Ambiente.pdf](http://www.bogotacmovamos.org/datos/AA_88_Ministerio_Ambiente.pdf).
- PLATA E. et al. (1984). *Flora de los Andes: cien especies del altiplano Cundi-Boyacence*. Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Bogotá, Ubaté y Suárez.
- PRECIADO J. (2015). *Desarrollo regional y medio ambiente: desafíos para la construcción de la región metropolitana de Bogotá*. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”.
- PRECIADO BELTRÁN, J. (2018). *Territorio, desarrollo regional y medio ambiente en la Sabana de Bogotá: una visión desde los actores*. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. Proyecto en fase de finalización.
- RATTNER, H. (1974). *Planejamento urbano e regional*. Companhia Editora Nacional.
- REDACCIÓN NACIONAL. (2017, 16 de julio). ¿Cómo va la descontaminación del río Bogotá?. *El Nuevo Siglo*. Recuperado de: <https://www.elnuevosiglo.com.co/articulos/07-2017-como-va-la-descontaminacion-del-rio-bogota>
- SANTOS M. (1982). *Ensaio sobre a urbanização latino-americana*. Hucitec.





# Gestión del agua para consumo en zonas urbanas





## Capítulo 7

# Avances del proyecto cultural Cátedra del Agua de la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”

- Helmut Espinosa García<sup>11</sup>
- Yolima Del Carmen Agualimpia Dualiby<sup>12</sup>
- Edier Hernán Bustos Velazco<sup>13</sup>

## 1. Introducción

Con frecuencia se identifica la necesidad de evaluar el papel de la academia en la transformación de las realidades territoriales y globales. Cada proceso científico en las disciplinas afines aporta un conjunto de información y métodos a una sociedad como la actual, cuyo contenido y desarrollo, a pesar de la existencia de medios de divulgación tan importantes como los ofertados por la *web*, son presentados a los diferentes actores de interés en marcos convencionales de la educación formal e informal. Como lo indican Buxarrais y Ovide (2011), la construcción de valores para la formación de ciudadanos en el siglo XXI implica entender la dinámica de la información en una sociedad tecnológicamente cada vez más cambiante. A pesar de este importante cúmulo de datos, se requiere de la orientación para sopesar el contenido del mensaje y la confiabilidad de los

---

11 Ingeniero forestal. Doctorante en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad. Director del grupo de investigación PROGASP-GAIA. Universidad Distrital “Francisco José De Caldas”. hespinosa@udistrital.edu.co

12 Ingeniera civil. Doctora en Ciencias Técnicas-Hidráulica. Docente investigadora. Grupo de investigación PROGASP-GAIA. Universidad Distrital “Francisco José De Caldas”.

13 Licenciado en Matemáticas. PHD en Educación. Director Red de Investigación IT/ Universidad Distrital Francisco José De Caldas. edierhernan1@gmail.com.

procesos de información. Es ahí donde las instituciones educativas juegan un papel preponderante.

Al abordar los asuntos globales que traen consigo cambios en las actitudes de los habitantes del mundo como agentes solidarios frente a la problemática ambiental actual, la situación reclama un mayor compromiso en las disciplinas y ciencias, las cuales en un marco de investigación científica deberán proveer alternativas de solución y los medios de divulgación suficientes, así como las redes de conocimiento para poner en marcha las opciones creadas. En el caso del recurso hídrico, la situación global crítica exhorta a ampliar la dinámica de conocimiento y las formas de interacción que faciliten la toma de decisiones en la política pública y la corresponsabilidad civil, lo cual se debe apoyar en sistemas formales y no formales de educación. En el caso de la educación superior universitaria y su papel protagónico como estructuradora de los centros de pensamiento, las diferentes instituciones de formación contribuyen a que las sociedades que las albergan encuentren integralmente caminos de entendimiento y métodos alternos de respuesta a los problemas posmodernos significativos y de desigualdad que predominan en los distintos sistemas de valores sociales.

En un asunto como la educación ambiental en la gestión sostenible del agua, las demandas de información y procesos han aumentado debido a las preocupaciones sectoriales y sociales: el desabastecimiento, la alteración de ecosistemas estratégicos, el impacto de las emergencias, como inundaciones y avalanchas, y las pérdidas de infraestructura de redes. En tal sentido, las instituciones de educación superior, y en particular la universidad pública, constituyen un pilar de la disponibilidad de estructuras ideológicas y científicas con el cual se pueden abordar las necesidades humanas de un territorio determinado. Su accesibilidad social y su compromiso con la búsqueda de respuestas en contexto permiten asumir, como en el caso de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), un rol preponderante.

A este respecto, la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, en la ciudad de Bogotá, promueve acciones de investigación y proyección social que, en el marco de los procesos territoriales de gestión ambiental basados en la GIRH, y considerando la tradición de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, puedan ampliar su dinámica de conocimiento a los diferentes actores de interés en el tema del agua, tomando en cuenta los procesos de investigación apalancados en el trabajo del ROGASP-GAIA y la Red Bacatá-IT, que cuenta con ocho grupos de investigación, seis programas académicos de pregrado y posgrado y la experiencia en el conocimiento ambiental del territorio.

En el año 2016 se llevó a cabo la primera reunión del grupo de investigación y la Red con el fin de formular la estrategia funcional de divulgación de conocimiento: la “Cátedra del Agua. Universidad Distrital Proyecto Cultural para la Gestión Integral del Recurso Hídrico”. Ahí se propuso un modelo integral que, desde el ámbito académico, promoviera el tema del agua y despertara el interés entre los jóvenes de la universidad, con base en estrategias de formación abierta y otras centradas en el vínculo con cuencas hidrográficas cercanas como la del río Bogotá, cuenca prioritaria para la sociedad colombiana por ser el espacio funcional con la mayor población y dinámica socioeconómica.

La Cátedra del Agua es una respuesta a la necesidad de corresponder a la sociedad del distrito capital, y en general, a la población del país, con un espacio de apropiación y divulgación de conocimiento que impacte positivamente a los actores de interés en la GIRH, con una apertura al intercambio y la promoción de opciones de sostenibilidad y construcción cultural de valores del agua, con base en la dinámica de redes que, desde diferentes enfoques en las ciencias, la educación y las artes, constituyan nuevos núcleos de vinculación en el aprendizaje y la enseñanza, así como la experiencia vivencial en el reconocimiento de las prácticas tecnológicas y sociales en el uso del recurso hídrico.

## 2. Contexto del proyecto

Las condiciones de manejo integrado del recurso hídrico se han convertido en una preocupación global. Desde la declaración de la “crisis del agua” a inicios del siglo XXI, los Foros Mundiales del Agua encabezados por la ONU (2000) consideraron las características de una población creciente que demanda agua potable y saneamiento básico, particularmente en las grandes ciudades, donde la concentración demográfica conlleva mayores necesidades del recurso hídrico, con consecuencias en la creación de presiones productivas, sociales y ambientales. En este contexto, la escasez y el desabastecimiento son situaciones frecuentes y con mayor incidencia en los países en desarrollo, y están relacionadas con las desigualdades económicas y la diversidad cultural. De ahí que se requieran políticas y medios de articulación para la sostenibilidad del recurso hídrico en un marco de entendimiento común.

En el presente, la situación tiende a ser distinta en la medida en que en las agendas intergubernamentales exigen cooperación y definiciones de políticas públicas en materia de ampliación de cobertura de los servicios de agua potable y saneamiento básico en las naciones más pobres (ODM, 2015). Sin embargo, la brecha en deficiencia de servicios básicos de agua afecta aproximadamente a más de dos mil millones de personas en todo el mundo. De acuerdo con el



informe de la ONU (2016), al menos 663 millones de personas carecen de abastecimiento directo de agua, y poco más de 1 800 millones se ven afectadas por la calidad del recurso.

Con el crecimiento de la población también se amplían las necesidades alimentarias, por lo que la actividad agrícola toma un papel relevante frente a la gestión del agua al convertirse en el sector que más demanda dicho recurso. A futuro, esto representa un incremento del 11% en el volumen riego y crea una expectativa a 20 años de un déficit hídrico del 40%, con serias repercusiones frente a la sostenibilidad económica, social y ecológica (ONU, 2017).

Las acciones que en materia de GIRH se promueven en el orden suprarregional en América Latina han sido apoyadas por instituciones como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). Tal es el caso de Sudamérica, que cuenta con abundantes recursos hídricos con tres grandes cuencas continentales —los ríos Amazonas, Orinoco y La Plata— que vinculan territorial y funcionalmente a la mayoría de las naciones en esta parte del continente. En los entornos subregionales, se identifican los espacios a nivel de países donde la situación hídrica puede no ser tan favorable, y se establecen áreas deficitarias con índices de escasez moderados a altos en zonas densamente pobladas, como las franjas de las costas peruana y ecuatoriana, el valle central de Chile, el altiplano boliviano, el Gran Chaco y los valles de los ríos Cauca y Magdalena en Colombia (Guzmán y Calvo, 2013).

Un aspecto central en los procesos GIRH a nivel territorial es el trabajo por cuencas hidrográficas. Entidades como el *Global Water Partnership* (GWP) han venido promocionando acciones integrales con apoyo a los gobiernos en temas como fortalecimiento institucional, asesoría técnica de proyectos hídricos transfronterizos, apoyo en formación y capacitación. La gobernanza del agua es un tema de particular interés. Por ello se da apoyo a los actores involucrados en las áreas de cooperación en asistencia técnica, cambios en la educación formal e informal, producción de información técnica aplicada y respeto por diversidad cultural y social de las comunidades (GWP, 2012, 2013).

Es crucial para la GIRH una plataforma de aprendizajes formales y no formales que den paso a una nueva cultura del agua. Las iniciativas con este enfoque han contado con diferentes niveles de apoyo de instituciones de carácter nacional e internacional. En este marco, la formación superior, a través de sus procesos de investigación y proyección social, pueden jugar un papel importante en dar a conocer a la población las discusiones ideológicas, conceptuales, institucionales, metodológicas, tecnológicas y de integración social, con base en el arte y la cultura que las sustentan.

El punto de partida en la formulación de una estructura de carácter académico-divulgativo que apalanque la interacción universidad-sociedad, con base en el enfoque GIRH, se plantea desde los alcances de la Declaración de La Haya. En el punto seis se indica:

El manejo integrado de los recursos hídricos depende de la colaboración y de las asociaciones a todo nivel, desde cada uno de los ciudadanos hasta las organizaciones internacionales. Que debe estar basado en el compromiso político a, y la concientización amplia de la sociedad de la necesidad de seguridad hídrica y al manejo sostenible de los recursos hídricos. Para lograr un manejo integrado de recursos hídricos es necesario tener políticas nacionales coherentes, y si es apropiado, también regionales e internacionales para superar la fragmentación, e instituciones 3 transparentes y responsables a todo nivel. (UNESCO, 2000).

Al expresar que se requiere de un proceso social creciente, la educación en las distintas formas aporta a ese propósito.

El documento *Agua para todos, agua para la vida* (ONU, 2003) establece 11 desafíos en el tema, e identifica el papel de la ciencia y la tecnología para alcanzar un nivel de integración entre prácticas y conocimientos promovidos desde la educación. En este mismo sentido, el número 7 de los objetivos del milenio (ONU, 2000) ha jugado un papel preponderante en cuanto a garantizar la sostenibilidad del medio ambiente en relación a mejores condiciones de acceso al agua potable y saneamiento básico, la transferencia de tecnología y capacitación a las comunidades.

De igual manera, la carta ministerial titulada *Un llamamiento urgente para una acción decisiva sobre el agua* del VIII Foro Mundial del Agua se incorpora a los intereses de desarrollo del espacio institucional al indicar en el punto sexto que:

La contribución de todos los interesados pertinentes, incluidos los gobiernos, la sociedad civil, el mundo académico, los pueblos indígenas y las comunidades locales y el sector privado, al desarrollo y la aplicación de políticas y cooperación positivas y proactivas en materia de agua, así como a soluciones. que se pueda compartir entre los países y las partes interesadas, con la perspectiva de la fuente al mar y utilizando el agua como conector. (UNESCO, 2018).

Al mismo tiempo, el propósito definido en el punto 22 de la misma declaración exhorta a:

Promover el potencial de la generación joven como agente de cambio e innovación en la búsqueda de soluciones para los desafíos del agua y el saneamiento e implementar y compartir políticas de educación sobre el agua y mejores prácticas en agua y saneamiento, beneficiándose de los centros internacionales existentes y de la Unesco experiencia, y red incluido el Programa Hidrológico Internacional. (Unesco, 2018).

Éste es un claro llamado al trabajo que desde las academias puede multiplicar los resultados orientados por los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), en particular en cuanto al objetivo 6 acerca del agua limpia y saneamiento, que indica que para el escenario del 2030 se deben fomentar las prácticas sostenibles para garantizar el acceso universal al agua potable (Cepal, 2016).

Bajo la mirada de los compromisos internacionales, destacan los alcances que desde la Unesco se han orientado a los procesos culturales y formativos a través de las cátedras del agua, donde los actores académicos en las universidades y las instituciones de investigación han fortalecido la incorporación de los diferentes enfoques de la GIRH. Orientados por los principios de acción de la Unesco en relación al recurso hídrico, se han constituido agrupamientos temáticos atendidos por diferentes instituciones de educación superior: gestión de desastres y cambios hidrológicos, aguas subterráneas, escasez y calidad del agua, agua y asentamientos humanos en el futuro, ecohidrología, creación de armonía para un mundo sustentable y educación y cultura del agua, clave de la seguridad hídrica.

Esto último plantea la importancia del trabajo de las instituciones, las organizaciones y los Estados dentro del Programa Hidrológico Internacional (PIH), orientado a la promoción y el fortalecimiento de las enseñanzas y aprendizajes de las ciencias hidrológicas y afines al incorporar como eje transversal el conocimiento de los procesos del agua. Esto, bajo un enfoque multi e interdisciplinar orientado a abordar los comportamientos, actitudes, conceptualizaciones y creencias para establecer lineamientos para un manejo equitativo, sostenible y ético de los recursos hídricos, con respeto a la diversidad cultural y una mirada integradora y holística para llevar a cabo acciones colaborativas e inclusivas en la sostenibilidad del agua y las culturas (Unesco, 2018).

En este sentido, la Universidad Distrital Francisco “José de Caldas”, con el proyecto de Cátedra del Agua en marcha, asume dos de los ejes del PHI como lineamientos inspiradores del modelo formativo: ecohidrología, y educación y cultura. En América Latina se tienen dos importantes instituciones universitarias como referentes para avanzar en el desarrollo de la estrategia educacional:

la Universidad Nacional del Litoral, en Argentina, y la Universidad Católica de Valparaíso, en Chile, ambas avaladas por la Unesco (UNL, 2017).

### 3. Propósitos del proyecto

La Cátedra del Agua de la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” se orienta a la integración de experiencias en formación profesional, educativa y de las artes, con base en los aportes articulados entre la facultades de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciencias y Educación y Artes, con apoyo de la Red Bacatá-IT (Red Temática en Inteligencia Territorial). Aborda los alcances de un proceso académico vinculado en primera instancia con los actores de la GIRH en la ciudad-región para promover cambios en las actitudes y prácticas para con sus sistemas hídricos. Tal es el caso de la cuenca hidrográfica de río Bogotá, que reclama la priorización del aparato de Estado, nacional, regional y local, a fin de atender la problemática con respecto a los impactos ambientales que en ella han tenido lugar.

La apertura de un espacio integrador para la sinergia de los diferentes grupos de investigación y la convocatoria a expertos, así como la atención al conocimiento local y regional de los actores involucrados, pretende aportar a la formulación de soluciones los avances de los métodos, consolidación de la información, representaciones culturales, facilitación de procesos de gestión en la toma de decisiones, apoyo en los procedimientos tecnológicos, prácticas pedagógicas y manifestaciones artísticas que permitan promover un cambio ideológico para afrontar los desafíos de la GIRH.

Así pues, el proyecto de la Cátedra del Agua dirige su atención a la consolidación de un espacio de convergencia de diferentes actores de interés, expertos, instituciones y comunidades en relación al conocimiento y apropiación de prácticas socioambientales sostenibles en el uso del agua, con la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” como facilitadora del diálogo e intercambio de experiencias formativas en tecnología, educación y artes.

### 4. Metodología

Los avances de la Cátedra del Agua de la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” responden a la estructuración de un modelo por fases propuesto desde el año 2016 por parte de la Red Bacatá-IT y el grupo de investigación PROGASP, al establecer cuatro etapas dentro de la hoja de ruta interinstitucional. En la segunda etapa, el proyecto ha dado paso a un conjunto de investigaciones

en contexto que apoyan a la identificación de las tendencias globales en materia de la formación y articulación con las políticas públicas.

La organización de la información responde a marcos de referencia nacionales e internacionales que priorizan las acciones de la GIRH con base en procesos educativos y de divulgación. El núcleo de consulta lo conformaron los documentos de los organismos multilaterales como ONU y Unesco, así como la revisión bibliográfica de programas institucionales que avanzan en la región en el desarrollo de estrategias denominadas Cátedra del Agua.

Este proceso cualitativo constituye el referente de partida para la evaluación de métodos y prácticas institucionales que permitan la validación de los programas con base en experiencias institucionales en el orden nacional y suprarregional, lo cual armoniza la propuesta de gestión académica con las necesidades de investigación a partir de propuestas piloto como las desarrolladas en la primera etapa del proyecto.

## 5. Desarrollo del proyecto

La Cátedra del Agua se concibe como un foro de encuentro para atender las iniciativas que en el orden académico, institucional y social discuten los problemas nacionales, regionales y locales de la gestión sostenible del agua. Así, se propone una agenda temática anual que permita a los investigadores y expertos orientar los ejercicios de conocimiento y divulgación a la comunidad universitaria. Por lo anterior, este proyecto se convierte en un espacio académico de formación para el componente electivo de los estudiantes de la institución y de los de intercambio académico, además de que se articula al proceso de relaciones interinstitucionales para la movilidad de profesores invitados, nacionales e internacionales, expertos en los temas del agua.

Las acciones articulares, en su carácter interdisciplinario, incluyen la formulación de proyectos de investigación que conduzcan a la generación de información y nuevo conocimiento de los problemas integradores del recurso hídrico. Para ello, se ha iniciado un conjunto de procesos de evaluación de las dinámicas de la información sectorial con apoyo en la elaboración de proyectos de grado, pregrado y posgrado, que dentro de una estrategia de investigación formativa han contribuido a la definición de los ejes programáticos de la Cátedra.

De igual manera, en el IV Congreso Internacional del Agua y el Ambiente (CIAVA IV) se expuso la dinámica de contenidos y formas de gestión institucional para la vinculación de aliados, cooperantes y expertos. Esta agenda avanza en términos de la construcción de los convenios en los que, como en el caso del CAEL (Centro de Altos Estudios Legislativos) del Congreso de la República de

Colombia, se han formulado las primeras iniciativas que puedan impactar a comunidades locales en materia de procesos territoriales, con el acompañamiento de grupos interdisciplinarios.

Se convocó a expertos e investigadores de la Universidad para crear un primer Foro de Experiencias de Conocimiento con la participación de los grupos de investigación afines. El foro contribuyó a la construcción de la agenda académica 2019, considerando convenios interinstitucionales con entidades del orden descentralizado nacional como IDEAM, IGAC y CAR Cundinamarca, que tienen responsabilidades funcionales en la GIRH. Lo anterior se dio gracias al apoyo de la RED Bacatá-IT, que vincula a diferentes grupos de investigación en los temas territoriales y sociales.

La Cátedra del Agua cuenta con información sobre el desarrollo de procesos evaluativos con base en los trabajos de grado sobre uso eficiente del agua, huella hídrica, gestión institucional y gobernanza del agua, así como percepciones sociales de la formación en la educación básica en el uso sostenible del recurso hídrico. En la actualidad se trabaja con el apoyo de estudiantes en investigación formativa adscritos a programas académicos de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, como el de Agua y Campo, mediante un convenio con una ONG ambiental vinculada al manejo de la relaciones socioecológicas en la cuenca media del río Bogotá. Esto se desprende de un programa de extensión de prácticas escolares para la adopción de tecnologías de baja complejidad para el manejo y uso sostenible del agua. El programa ya ha vinculado a seis instituciones educativas de las áreas rural y urbana en tres municipios de la provincia de Tequendama.

Bajo la categoría emergente de “cultura del agua”, en el Programa de Difusión Multimedia se realiza un ejercicio de evaluación descriptivo acerca de la producción audiovisual para la enseñanza, sensibilización y divulgación de conocimiento científico e institucional a través de minería de datos, lo que permite buscar trayectorias y trazabilidad a procesos en el orden educativo disponibles en la *web*. De igual manera, se trabaja en la primera parte de los diseños del agenciamiento de las piezas comunicativas para las redes con los tips del programa de difusión “Agua y Terruño. Escuela del Agua”. En el programa académico universitario se adelanta el esquema de gestión para su incorporación como espacio electivo extrínseco de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, y su apertura en 2019 para los niveles de pregrado y posgrado.

Tras la experiencia de la Universidad Nacional del Litoral de la República Argentina, y dados los acercamientos obtenidos en el CIAYA IV, se espera que para 2019 se cuente con el apoyo académico internacional para el desarrollo de

trabajos de acompañamiento en el enfoque de cátedras hermanadas, considerando la importancia de los alcances en las Cátedras Unesco a la que pertenece. Con el proceso CIAYA V se pretende de igual manera que los convenios para la movilidad de los docentes y expertos de la Universidad de Guadalajara permitan a la Cátedra contar con temáticas compartidas sobre la preocupación en la GIRH. Se adelanta un proceso de identificación de condicionantes institucionales universitarias del orden público para constituir una base de la posible Red Local de Apoyo a la Cátedra del Agua, mediante ejercicios de investigación de carácter formativo con estudiantes de posgrado.

## 6. Consideraciones finales

La estructura de un espacio académico abierto como la Cátedra del Agua en la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” busca facilitar la promoción y divulgación de los avances científicos y metodológicos en relación a las prácticas sostenibles en el manejo y uso del agua, constituyéndose en un foro para acercar a expertos, comunidades y tomadores de decisiones.

Una forma de articular los procesos de gestión integral del recurso hídrico es el trabajo por cuencas hidrográficas, en el que las diferentes dimensiones territoriales pueden constituirse en núcleos de investigación. Esto permite que su conocimiento compartido, orientado desde la dinámica de la educación ambiental, pueda fortalecer su aplicabilidad y mejoramiento por parte de los actores de interés.

Los enfoques de trabajo académico propuestos por la Unesco, junto con otras cátedras del agua, permiten un conjunto de ejes de actuación para constituir redes de aprendizaje y fortalecimiento de los procedimientos institucionales en las universidades que asumen el reto de constituir espacios de convergencia científica y social, como en este caso.

Los avances en la estructuración del espacio institucional de la Universidad Distrital han permitido vincular a diferentes grupos de investigación de sus facultades, lo que constituye un nodo de futuras indagaciones en la perspectiva interdisciplinaria de la gestión del agua desde la tecnología, la administración, la ingeniería, la educación y las artes.

## Referencias

- BUXARRAIS ESTRADA, R.R. Y OVIDE, E.V. (2011). El impacto de las nuevas tecnologías en la educación en valores del siglo XXI. *Sinéctica*, (37), 1-14. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-109X2011000200002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-109X2011000200002&lng=es&tlng=es).
- CONSEJO ECONÓMICO PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (CEPAL). (2016). Objetivos de Desarrollo Sostenible. *Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo Sostenible. Una Oportunidad para América Latina y el Caribe*. Cepal.
- FORO II MUNDIAL DEL AGUA. (2000) *Declaración Ministerial sobre Seguridad del Agua de La Haya*. Unesco.
- FORO VIII MUNDIAL DEL AGUA. (2018). *Declaración ministerial. Un llamamiento urgente para la acción decisiva sobre el agua*. Unesco.
- GLOBAL WATER PARTNERSHIP (GWP). (2012). *GWP in action: 2012 Annual Reporting*. GWP.
- GLOBAL WATER PARTNERSHIP (GWP). (2013). *Lighthouse Case Study*. Global Solution Networks.
- GUZMÁN, I. Y CALVO, J. (2013). Planificación del recurso hídrico en América Latina y el Caribe. *Tecnología en Marcha*, 26, 13-18.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS (ONU). (2015). Objetivos de Desarrollo del Milenio. *Informe 2015*. Naciones Unidas.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA EDUCACIÓN, LA CIENCIA Y LA CULTURA (UNESCO). (2003). *Water for People, Water for Life. Executive summary of the world Water Development Report*. Unesco.
- Universidad Nacional del Litoral (UNL). (2017). *Cátedra UNESCO Agua y Educación para el Desarrollo Sostenible. Informe de Actividades Relacionadas al PHI. Periodo octubre 2015-mayo 2017 y acciones futuras*. UNL.
- PROGRAMA MUNDIAL DE EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA NACIONES UNIDAS (WWAP). (2016). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2016: Agua y Empleo*. Unesco.
- UNESCO. (2000). *Declaración Ministerial de La Haya sobre la seguridad del agua en el siglo XXI. Declaración Ministerial de La Haya Sobre La Seguridad Del Agua En El Siglo XXI*, 1-4. <http://www.ecopuerto.com/bicentenario/informes/DeclarMinLaHaya.pdf>.
- UNESCO. (2018). *Ministerial declaration an urgent call for decisive action on water*. World Water Forum-Brasilia Brazil. <http://8.worldwaterforum.org/en/news/ministerial-declaration-seeking-decisive-action-water>.





## Capítulo 8

# Realidades y retos en la gestión integral del recurso hídrico (GIRH) en Colombia y México

- Yefer Asprilla Lara<sup>14</sup>
- Eladio Rey Gutiérrez<sup>15</sup>
- Francisco Jalomo Aguirre<sup>16</sup>

## 1. Introducción

A la presión global sobre los recursos hídricos se suman aspectos sociales y económicos representados por los cerca de 2 100 millones de personas sin acceso a una fuente de agua segura para el consumo y los más de 4 500 millones que carecen de saneamiento gestionado de manera eficaz para evitar los vertimientos directos y contaminación de las fuentes hídricas (Banco Mundial, 2018).

De conformidad con la Unesco (2018):

... hay 3 600 millones de personas, correspondientes a casi la mitad de la población mundial, que viven en áreas con riesgo de sufrir escasez de agua al menos un mes al año, y esta población podría llegar a alcanzar los 4 800 para el año 2050. (p. 2)

---

14 Magister en Ingeniería Civil. Docente investigador. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. yeasla@hotmail.com.

15 Magister en Ciencias Ambientales. Exdecano de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. megas50@yahoo.com.

16 Doctor en Ciudad, Territorio y Sustentabilidad. Docente investigador del Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanas de la Universidad de Guadalajara. jalomo19@hotmail.com

Por ello, al asunto de calidad deben adicionarse otros aspectos que requieren igual atención, como la ascequibilidad, la accesibilidad, la disponibilidad, la obligatoriedad, la adaptabilidad, la continuidad y la discriminación (Jalomo, 2017).

Según el Panel de Alto Nivel sobre el Agua (HLPW, 2018), en las regiones donde hoy existe escasez de agua se produce más del 20% del producto interno bruto (PIB) mundial. Para el año 2030, de llegar a incrementarse tal problema en dichos lugares, la consecuencia sería la migración de aproximadamente 700 millones de personas.

Los desafíos y retos descritos anteriormente, comunes a todos los países miembros de la Organización de Naciones Unidas (ONU), han sido asumidos con la promulgación de los objetivos del desarrollo sostenible (ODS). El objetivo 6, denominado “Agua limpia y saneamiento”, tiene como meta principal atender la cobertura para un acceso universal y equitativo al agua potable, segura y asequible en igualdad de condiciones, bajo la premisa de tratar igual a los iguales y desigual a los desiguales, tal y como se expresa a continuación:

... 6.1. Lograr el acceso universal y equitativo al agua potable segura y asequible para todos. 6.2. Lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y a las personas en situaciones de vulnerabilidad. 6.3. Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando los vertidos y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad del porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial. 6.4. Aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que padecen falta de agua. 6.5. Implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda. 6.6. Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos... (ONU, 2017; Unesco, 2018, p. 127).

Lo anterior requerirá de un esfuerzo económico y financiero importante que según el Banco Mundial (BM, 2018) ascendería a 114 mil millones de dólares por cada año de inversión global.

Hoy muchas urbes alrededor del mundo presentan escasez y problemas de descenso en el suministro de agua potable. Destaca el caso de Ciudad del Cabo,

en África, la cual es la primera ciudad en riesgo de quedarse sin suministro de agua para sus habitantes, situación que no es ajena a otras urbes. Según informes de la ONU, para el 2030 la demanda de agua se incrementará por el crecimiento demográfico, la migración del campo a la ciudad y el cambio climático, lo que pone en riesgo a algunas ciudades como Pekín en China, Bangalore en la India, El Cairo en Egipto, Yakarta en Indonesia, Moscú en Rusia, Estambul en Turquía, Londres en Inglaterra, Tokio en Japón, Miami en EE.UU. y, en América Latina, a ciudades como Sao Paulo en Brasil y Ciudad de México en el país homónimo.

Los casos enunciados ejemplifican la falta de planeación y de aplicación del modelo de gestión integral del recurso hídrico (GIRH), fenómeno al que se suman problemas como la creciente contaminación de las fuentes superficiales y subterráneas, en especial de ríos aledaños a los centros urbanos o asentamientos humanos.

Por lo anterior, este trabajo tiene como objetivo analizar la GIRH en su relación con el acceso al agua potable, el alcantarillado y el saneamiento en dos países, Colombia y México, a la luz de sus respectivas condiciones hídricas, bajo la premisa de cumplir con las metas y ODS acordados por la ONU para el año 2030, en particular el número 6, ya antes referido.

## 2. Metodología

Para el desarrollo del presente capítulo se acudió a diferentes fuentes documentales y bases de datos como Redalyc, Scielo y Latindex, entre otras, en las que se encuentran revistas científicas multidisciplinarias y especializadas en el tema del agua, con lo que se procedió a un ejercicio de análisis de las realidades en la GIRH en dos países de Latinoamérica: Colombia y México. Se comparó el estado de estos recursos en ambos países en relación con la accesibilidad que tiene la población, tanto de la zona urbana como de la rural, en materia de agua potable y saneamiento básico.

## 3. La gestión integral del recurso hídrico (GIRH) como marco teórico

La GIRH ha estado en la agenda de los países miembros de la ONU desde finales del siglo XX. Es así que en la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (CIAMA), celebrada en Dublín, Irlanda, en 1992, se establecieron los primeros principios, considerando que:

1. El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para la vida, el desarrollo y el medio ambiente.

2. El aprovechamiento y la gestión del agua debe inspirarse en la participación de los usuarios, los planificadores y los tomadores de decisiones en todos los niveles.
3. La mujer desempeña un papel fundamental en el abastecimiento, la gestión y la protección del agua.
4. El agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos en competencia a los que se destina, y debería reconocérsele como un bien.

Los anteriores principios fueron reafirmados y ampliados en la reunión del Grupo de Alto Nivel sobre Agua, liderado por la ONU en 2017. En ellos se resalta la importancia del agua, reconociendo que es un recurso finito y el riesgo de la escasez por las múltiples presiones a las que día con día se somete. Aunque para efectos del presente trabajo no se concuerda con el carácter de bien que se le atribuye, los principios planteados en el CIAMA de 1992 sentaron las bases para los respectivos que fundamentan la GIRH. Éstos contemplan que:

1. El agua es un recurso preciado, frágil y peligroso.
2. Los recursos hídricos son finitos y se encuentran bajo la amenaza de múltiples presiones.
3. Una gestión eficaz del agua plantea una oportunidad transformadora para convertir el riesgo en resiliencia, la pobreza en bienestar y los ambientes degradados en sostenibles.
4. Existe una necesidad urgente de tomar medidas a la altura de las circunstancias.
5. Valorar el agua puede contribuir a equilibrar los múltiples usos y servicios que posibilita este recurso.

Fundamentalmente, los principios mencionados han sido la base para que la ONU (2018) declarara el Decenio Internacional para la Acción por el Agua 2018-2028, aprobado el 22 de marzo de 2018 y denominado “Agua para el desarrollo sostenible”, bajo la premisa de que en la siguiente década los problemas relacionados con los recursos hídricos estarán en los primeros lugares de las agendas de los gobiernos. Esto quiere decir que es necesario trazar desde ya políticas públicas que permitan afrontar estos retos en materia de acceso al agua potable, alcantarillado y saneamiento, escasez, la creciente presión sobre el recurso, sequías e inundaciones y cambio climático, entre otros.

Por la tendencia de los cambios en materia de escasez identificados desde 2010 en las diferentes regiones del mundo, se proyecta que para 2050 la de-

manda de agua deberá cubrir las necesidades de alrededor de nueve mil millones de habitantes para su alimentación, y 60% más de lo actual para la producción agrícola. Esto es un claro ejemplo de cómo la tendencia negativa del modelo de desarrollo vigente e imperante llevará a una crisis de escasez con acentuados impactos en África y Asia, donde se concentra más de la mitad de la población mundial, y en algunos países de América, como Colombia, EE. UU. y México.

Las acciones hasta hoy implementadas, como la de “Agua para el desarrollo sostenible”, no son sino intentos por lograr una GIRH que, bajo la directriz de ONU-Agua, considera algunos objetivos esenciales que contribuirán al logro de los ODS:

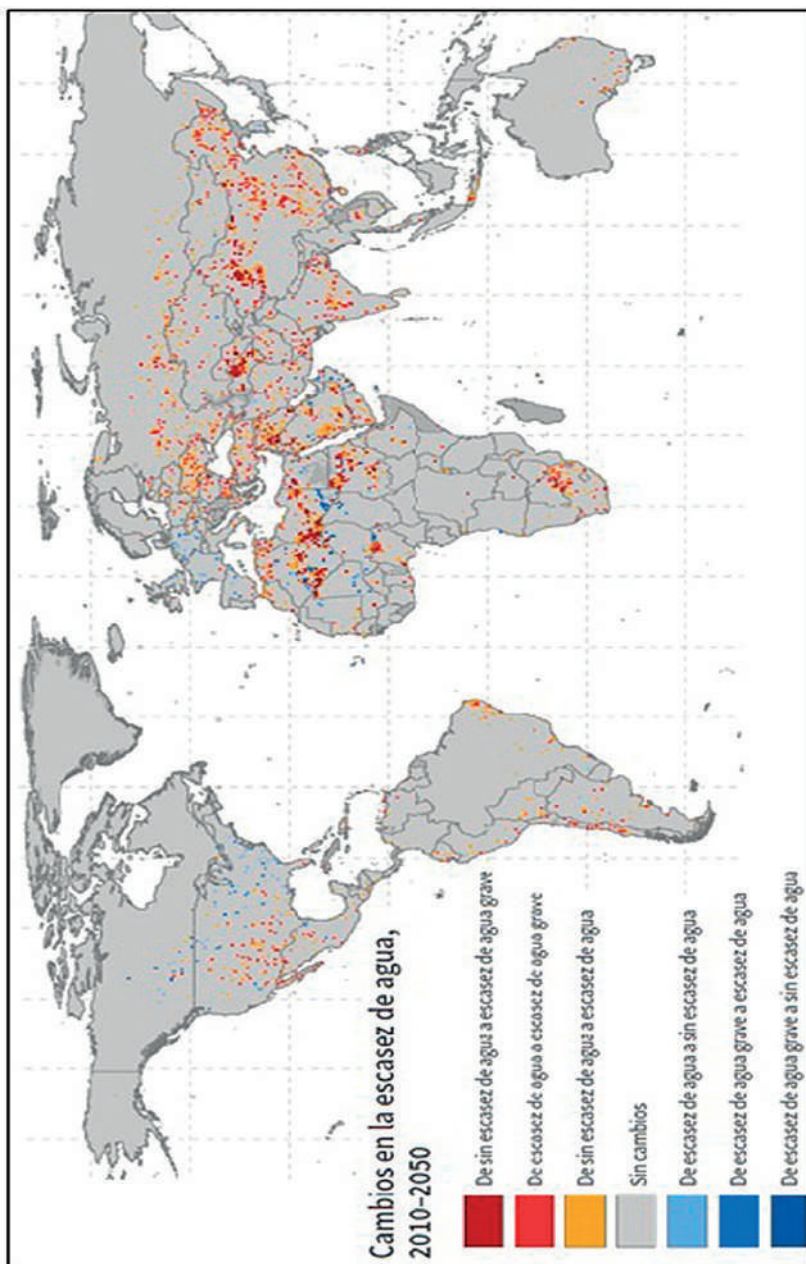
1. La ordenación integrada de las diferentes fuentes de agua.
2. Aumentar la disponibilidad de los recursos hídricos.
3. Mejorar la calidad del agua y reducir los riesgos relacionados con ella.

Estos lineamientos han servido para trazar nuevos enfoques y alternativas que permitan afrontar los retos de cada país entorno a esta compleja situación. En este sentido, surgen opciones como las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) que podrían permitir aprovechar los procesos naturales que regulan diferentes elementos del ciclo del agua para establecer mecanismos de GIRH (Unesco, 2018).

Las SbN son alternativas que pueden ayudar a disminuir la contaminación de las fuentes hídricas, mal llamadas “aguas residuales”. Según el informe mundial de la ONU sobre el desarrollo de los recursos hídricos, publicado por la Unesco (2017), se estima que en el mundo más del 80% de las “aguas residuales” se vierte al medio ambiente sin ningún tratamiento, destacándose la mayoría de los ríos, quebradas, lagos y acuíferos ubicados en las regiones de Asia, África y América Latina. Esta situación cada día se incrementa, empeora y altera las condiciones de las fuentes hídricas de agua dulce, poniendo en riesgo la salud y seguridad alimentaria de las poblaciones, quienes soportan su desarrollo económico y crecimiento urbanístico en la permanencia del caudal proporcionado por las fuentes aledañas.

En este contexto, América Latina y El Caribe, a pesar de ser la región más rica en disponibilidad de recurso hídrico a nivel global, sigue con indicadores de rezago en materia de acceso al agua potable, alcantarillado y saneamiento. Ahí, cerca de 20 millones de personas no tienen acceso a servicios mejorados de agua para el consumo, y 65 millones están sin servicio de alcantarillado y saneamiento (ONU, 2018).

**Figura 1.** Cambios en la escasez de agua 2010-2050



Fuente: Unesco, 2018, p. 14.

Tampoco se puede perder de vista que, para 2050, algunos países de América Latina y El Caribe pueden sufrir problemas de escasez, ya que sus principales ríos, especialmente los que atraviesan los grandes centros urbanos, se han convertido en cloaca o receptores de aguas contaminadas vertidas sin ningún tipo de tratamiento. Colombia y México no son ajenos a esta problemática. No obstante, el nivel de riesgo es mitigable de alguna manera, siempre y cuando se actúe con una visión holística y sistémica de manera coordinada entre todos los involucrados: sociedad civil, autoridades de los diferentes niveles (federal, nacional, estatal, departamental y municipal), el sector industrial y empresarial, academia, centros de investigación y organismos multilaterales, entre otros.

#### 4. La GIRH en Colombia: realidades y retos

Colombia es un país conformado por 32 departamentos que agrupan 1122 municipios con un total de 49 644 759 habitantes, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2018; DNP, 2017). De esta población, el 78.4% vive en centros o zonas urbanas y el 21.6%, en zonas rurales. Existen 47 ciudades que tienen más de 100 mil habitantes, con una superficie total de 1141 748 km<sup>2</sup>.

En cuanto al acceso al agua potable, alcantarillado y saneamiento, según la Financiera del Desarrollo Territorial (Findeter, 2017), el país alcanza una cobertura del 91.4 % en agua y 81.1% en alcantarillado. Sin embargo, se tienen grandes brechas y rezagos entre la zona urbana y rural. En la primera, la cobertura llega al 97% en materia de agua potable, mientras que en la segunda apenas alcanza el 74%. Lo mismo sucede con el alcantarillado: las zonas urbanas cuentan con 85.2% de cobertura, y las zonas rurales, 67.9% .

Las actividades de tipo extractiva, como la minería e hidrocarburos, así como los vertimientos directos industriales y de “aguas residuales” sin ningún tratamiento a las fuentes superficiales, han sido de los mayores responsables de la problemática de los recursos hídricos en el país.

Estudios realizados en Colombia por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2013) muestran que el índice promedio de calidad del agua en fuentes hídricas monitoreadas arrojó que el 17% de las corrientes tiene una calidad aceptable, el 59%, una calidad regular, y el 26% es de mala calidad. Esta contaminación incipiente ha generado costos al tratamiento de agua para consumo doméstico, comercial e industrial, a la salud, productividad y el turismo, que equivale al 0.3 % del PIB nacional.

La figura 2, donde se muestra el río Bogotá, es el ejemplo del nivel de contaminación que muchos ríos de Colombia hoy afrontan, los cuales se han



**Tabla 1.** Acceso al agua potable y alcantarillado en Colombia

Acceso	País	Zona urbana	Zona rural
Agua potable (%)	91.4	97	74
Alcantarillado (%)	81.1	85.2	67.9

Fuente: Elaboración propia con datos de Findeter, 2017.

convertido en receptores de todo tipo de aguas residuales y residuos sólidos. Entre los más contaminados, según un informe del diario *El Tiempo* (2018), están: Bogotá, Chicamocha (Boyacá), Medellín (Antioquia), Cauca (que baña los departamentos de Cauca, Valle del Cauca, Risaralda, Caldas, Quindío y Antioquia), Suárez (Boyacá y Santander), Pasto (Nariño), Chinchiná (Caldas), Otún y Consola (Risaralda), Quindío y la Vieja (Valle del Cauca, Quindío y Risaralda) y el río del Oro, que atraviesa la ciudad de Neiva, capital del departamento de Huila. Como se aprecia, la mayoría de los ríos más contaminados se ubican en la región centro andina del territorio nacional y encuentran a su paso las principales ciudades y asentamientos humanos del país.

En este contexto, la GIRH en Colombia tiene deparados grandes retos, empezando por la coordinación interinstitucional del sector para ejercer acciones conjuntas de control, regulación y vigilancia de las fuentes de agua, minimizar los conflictos entre los diferentes usuarios y mejorar la gestión del recurso a través del Plan Hídrico Nacional (PHN, 2014–2018), que en su segunda fase contempla seis objetivos:

1. La oferta.
2. La demanda.
3. La calidad.
4. El riesgo.
5. El fortalecimiento institucional.
6. La gobernabilidad en torno a los recursos hídricos del país.

Estos objetivos vienen acompañados de diferentes estrategias que se implementan a través de los programas y proyectos gestionados por las autoridades correspondientes (MADS, 2013). La financiación del PHN está acompañada del documento Consejo Nacional de Política Económica y Social-CONPES 3716 de

**Figura 2.** Contaminación del río Bogotá



Fuente: Lizarazo, 2018.

2011, donde se definen sus componentes e instrumentos para regular la oferta y demanda del recurso hídrico de manera que se garanticen su uso sostenible, accesibilidad y saneamiento, al igual que una gestión sectorial y urbana a través de buen gobierno para la gestión ambiental y una buena GIRH.

El PHN ha identificado ocho principales cuencas hídricas a nivel nacional, conformadas por treinta grandes ríos adonde confluyen cerca de 75 mil riachuelos y quebradas, pues es ahí donde se soportan el inventario y riqueza hídrica del país. Por ello, se requiere de un gran esfuerzo para preservar, proteger y mantener libre de intervención de cualquier interés económico a las áreas de nacimientos de las vertientes fluviales enlistadas a continuación:

1. Macizo Colombiano o estrella fluvial de los ríos Cauca, Caquetá, Magdalena y Patía.
2. Cerro de Caramanta: nacimiento de los ríos Atrato y San Juan.
3. Nudo de Santurbán: Algodonal, Margua, Zulia y Tarra.
4. Páramo de Sumapaz: Guayabero, Guaviare, Meta y Sumapaz.
5. Páramo de Guachaneque: Bogotá, Upía y Sogamoso.
6. Sierra Nevada de Santa Marta: Ranchería, Cesar y Fundación.

**Figura 3.** Contaminación de ríos por actividades de extracción minera ilegal, río Quito-Chocó



Fuente: Caracol radio, 2016.

7. Nudo de Paramillo: Sinú y San Jorge.
8. Nudo de Huaca o de los Pastos: Mira y Putumayo.

Actualmente, la mayoría de las vertientes fluviales enfrentan desafíos de contaminación por acciones antrópicas, entre las que destacan las actividades extractivas de la minería legal e ilegal. Dichas problemáticas crecen con la demanda de agua por parte de los asentamientos humanos que también van en aumento exponencial, y por el fenómeno de migración del campo a la ciudad que ha motivado los conflictos militares y paramilitares en todo el territorio nacional.

Sin duda, los retos para Colombia en materia de saneamiento para el tratamiento de sus mal llamadas “aguas residuales” —debieran denominarse “servidas”—, y la limpieza de sus principales fuentes hídricas, son enormes. Para alcanzar la meta de los ODS al 2030, se requiere un tratamiento del 68%, y actualmente apenas se ha logrado el 37.2% (DNP, 2017).

Otro de los desafíos es incorporar las metas de acceso al agua, alcantarillado y saneamiento de los ODS para el 2030, de manera que se dé cobertura a todos los habitantes de las zonas urbanas y rurales. Por tanto, es necesaria una planeación

de la GIRH articulada a los planes de ordenamiento territorial (POT), con una visión de los servicios públicos de agua y saneamiento básico a largo plazo, por lo que es indispensable una base de datos e información sectorial confiable para la toma de decisiones.

También es imprescindible la asistencia técnica por parte de la DNP, MADS y el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, todos organismos del Gobierno Nacional de Colombia, para que las entidades territoriales, los municipios, presenten proyectos de inversión sobre agua, alcantarillado y saneamiento para el sector urbano y rural ante el Sistema General de Regalías, con acciones por parte de las corporaciones autónomas regionales para priorizar la formulación e implementación de los instrumentos de planificación ambiental y de reglamentación en las cuencas hidrográficas y acuíferos, donde se evidencie la afectación de la oferta del recurso. Además, se deben adelantar gestiones que propendan a la reducción de la contaminación hídrica en fuentes de abastecimiento en el sector rural (DNP, 2014).

Incluso se deben diseñar e implementar planes de contingencia que consideren fuentes alternas de suministro ante eventos como inundaciones, sequías, contaminación o desabastecimiento, así como mecanismos que promuevan el control de aguas pluviales urbanas y de escorrentías en áreas de cultivos, a fin de prevenir, reducir y controlar la contaminación generada a los sistemas hídricos de aguas superficiales.

## 5. La GIRH en México: realidades y retos

Para el caso mexicano, la encuesta intercensal del 2015 (Inegi, 2015) estima que la población total de México es de 119 938 473 personas que habitan una extensión territorial de 1 960 mil km<sup>2</sup> unidos en una república federal, representativa y democrática, conformada por 32 estados y 2 457 municipios, llamados “delegaciones” solamente para el caso de la Ciudad de México.

En el país, el 2.1 % de la población vive en 140 mil localidades muy pequeñas menores de 100 habitantes, 27.8 % en 36 localidades muy grandes mayores a 500 mil habitantes y el 70% restante vive en localidades de 100 a 500 mil habitantes (Inegi, 2015).

Según datos de la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2016), la cobertura de agua potable o acueducto a nivel país es del 92.5%, correspondiendo a un 95.7% en zonas urbanas y a un 81.6% en las rurales. En cuanto a alcantarillado, se alcanza una cobertura de 91.4%, que en zonas urbanas representa un 96.6%, mientras que en las rurales, un 74.2%.

**Tabla 2.** Acceso al agua potable y alcantarillado en México

Acceso	País	Zona urbana	Zona rural
Agua potable (%)	92.5	95.7	81.6
Alcantarillado (%)	91.4	96.6	74.2

Fuente: Elaboración propia con datos de Conagua, 2016.

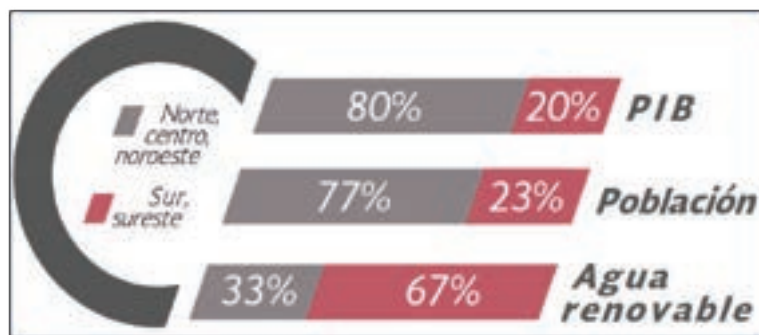
En términos generales, México muestra mejor desempeño de coberturas que Colombia, particularmente en las zonas rurales. Sin embargo, también tiene importantes retos, pues cerca de 35 millones de mexicanos se encuentran en situación de poca disponibilidad de agua en términos de cantidad y calidad, así como de acceso a redes de alcantarillado y saneamiento (Semarnat, 2013). Hasta hace poco, la problemática no era tan evidente, pero con el crecimiento poblacional y el desarrollo urbano y económico, algunas fuentes están sometidas a estrés hídrico.

Según el Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A.C. (2016) en su portal AGUA.org.mx, la red hidrográfica del país tiene aproximadamente una longitud de 633 mil km, conformada a su vez por 51 ríos principales por donde fluye el 87% del escurrimiento superficial. Según Conagua (2016), sus grandes vertientes hidrográficas son: en el interior, el río Nazas–Aguanaval, con una longitud de 1081 km, y el río Lerma, con 708 km; en el Pacífico y Golfo de California, los ríos Culiacán, cuya longitud es de 875 km, y el río Balsas, con 770 km; en el Mar Caribe–Golfo de México, los ríos Grijalva–Usumacinta, los más largos del país, con 1 521 km, y el río Pánuco, con 510 km. Todos éstos también altamente contaminados e intersectados en varios puntos de sus trayectos por los principales asentamientos humanos del país.

La distribución entre población y agua en México presenta disparidades abruptas. Mientras que el 77% de la población se concentra en el centro, norte y noroeste del país, la cual genera el 80% del PIB nacional, dichas regiones sólo cuentan con el 33% de los recursos hídricos disponibles. Caso contrario sucede con la zona sur y sureste, con el 67% de la riqueza hídrica, el 20% del PIB y es el soporte del 23% de la población (Conagua, 2016).

A la distribución inequitativa antes referida, se suma que de los más de 600 acuíferos localizados en México, 101 de ellos se encuentran sobreexplotados (Conagua, 2002), lo que genera problemas no solamente de distribución, sino de

**Figura 4.** Contraste regional en el nexo economía-población y agua en México



Fuente: Conagua, 2016, p. 23.

escasez, y serias pugnas entre los diversos segmentos de usuarios, como el agrícola, el ganadero, el industrial, el comercial y el social.

Al respecto, Gleick (1993) considera que los conflictos por el agua en México se derivan en primera instancia de la escasez, seguida por la contaminación de fuentes hídricas generada por factores como la calidad, cultura del agua, los desastres naturales relacionados con el vital líquido y su distribución geográfica y social. Así, se trata de un tema más de calidad que de cantidad del recurso (Arreguín *et al.*, 2011).

González y Asprilla (2016) consideran que la inadecuada planeación urbana y los permisos para una periurbanización irregular, descontrolada y compleja en las grandes metrópolis, generan problemas recurrentes de accesibilidad a servicios de agua potable y saneamiento, como también la ocurrencia de inundaciones.

Las problemáticas antes mencionadas y otras relacionadas con el agua se han gestionado a través de la Ley de Aguas Nacionales y el Programa Nacional Hídrico (PNH, 2014–2018). Este último, establecido por el Gobierno de la República bajo la responsabilidad de la Conagua y de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, planteaba objetivos, estrategias y líneas de acción que debían permitir la implementación de un modelo de GIRH para dar respuesta a las demandas por el acceso a los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, y así garantizar la seguridad hídrica ante sequías e inundaciones.

Dentro de este contexto, se hizo imperiosa la necesidad de una agenda de desarrollo hídrico vinculada de forma más estrecha al medio ambiente (biodiversidad, ordenamiento territorial, producción de energía, regulación del clima y abasto para la agricultura), que regulara los usos del suelo siempre, por desgracia, bajo una visión de desarrollo económico que no responde necesariamente a los intereses de la sociedad o de la naturaleza (Semarnat, 2013).

Por otro lado, se ha lanzado el Programa de Saneamiento de Aguas Residuales (Prosanear), que tiene como objetivo la asignación de recursos federales, provenientes del pago de derechos por el uso o aprovechamiento de bienes del dominio público de la nación, a los seis grandes ríos o vertientes hidrográficas donde desembocan otros, y que fungen como cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales.

Al día de hoy, el Prosanear no ha logrado abatir los urgentes problemas del bajo nivel de saneamiento de las aguas servidas, por lo que la contaminación va en incremento y cada día se desborda la capacidad institucional para atender dicho asunto. Según datos de la Conagua (2016), de los 212 m<sup>3</sup>/s de aguas servidas municipales colectadas, solamente son tratados 120.9 m<sup>3</sup>/s, lo que corresponde apenas al 57% del total recibidas en las 2 477 plantas de tratamiento del país, muchas de ellas hoy sin funcionamiento por los altos costos de operación y mantenimiento.

La situación es más crítica en el sector industrial. De los 214.6 m<sup>3</sup>/s de aguas generadas en las industrias, sólo se tratan 70.5 m<sup>3</sup>/s, lo que equivale al 32.9% del total. El resto es vertido a las fuentes hídricas sin ningún tipo de tratamiento, lo que acrecienta los problemas ambientales y reduce la disponibilidad y la calidad del agua.

En este sentido, el saneamiento de las aguas servidas y descontaminación de las fuentes hídricas requerirá, según Jalomo, de “la implementación de reformas estructurales, organizacionales e institucionales que propicien el cuidado y uso razonable del agua, así como desincentivar las conductas contaminantes que hasta el presente se siguen poniendo en práctica” (2016, p. 139)

Con el referente anterior, los desafíos y retos que le deparan a México en términos de la GIRH no son menores. Será necesaria una coordinación de los tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal) y de todas las entidades e instituciones vinculadas o relacionadas con los recursos hídricos, con la intención de incrementar las coberturas de agua potable y alcantarillado en zonas urbanas y rurales, privilegiando a la población más vulnerable, para la cual, por su nivel de ingresos, no es fácil adquirir el valioso líquido a través de pipas o embotelladoras de agua.



**Figura 5.** Río Lerma, a la altura de Toluca en el Estado de México



Fuente: Greta Díaz, *Diario Excelsior*, 20 abril de 2016.

Será indispensable, además, fortalecer las acciones de control, vigilancia, inspección y aplicación de sanciones en materia de extracciones de acuíferos y vertimientos de aguas sin tratamiento a fuentes hídricas evitando asentamientos humanos en zonas con riesgo de inundación y reubicando los ya existentes a zonas seguras. Todo ello será imposible si no se incrementa la participación y corresponsabilidad de estados y municipios frente al cambio climático o variabilidad climática.

Además, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos impone al Estado el deber y obligación de suministrar agua de calidad para el uso y consumo humano, de manera que se puedan prevenir padecimientos y desabastecimiento de origen hídrico, por lo que se debe mejorar el funcionamiento de la infraestructura de tratamiento de aguas servidas existente, que permita la reutilización de todas las aguas tratadas en actividades agrícolas, sistemas de riego, limpieza de calles, entre otras actividades.

Finalmente, la GIRH no será posible sin mecanismos que refuercen la cultura del agua en el sistema educativo escolarizado, desde los primeros años de formación académica hasta la universidad, identificando los avances tecnológicos en



el ámbito internacional para implementarlos y adaptarlos a las condiciones del país. De la misma forma, es esencial desarrollar y aplicar tecnologías de información y comunicación para facilitar la participación social en el sector hídrico.

Al igual que en Colombia, la nueva Ley de Aguas Nacionales que sea publicada por la nueva administración de gobierno deberá incorporar las metas de acceso al agua y saneamiento básico de los ODS para el 2030, buscando un equilibrio entre el nexo economía-población-agua-naturaleza y privilegiando el derecho al agua por sobre la visión mercantilista.

## 6. Consideraciones finales

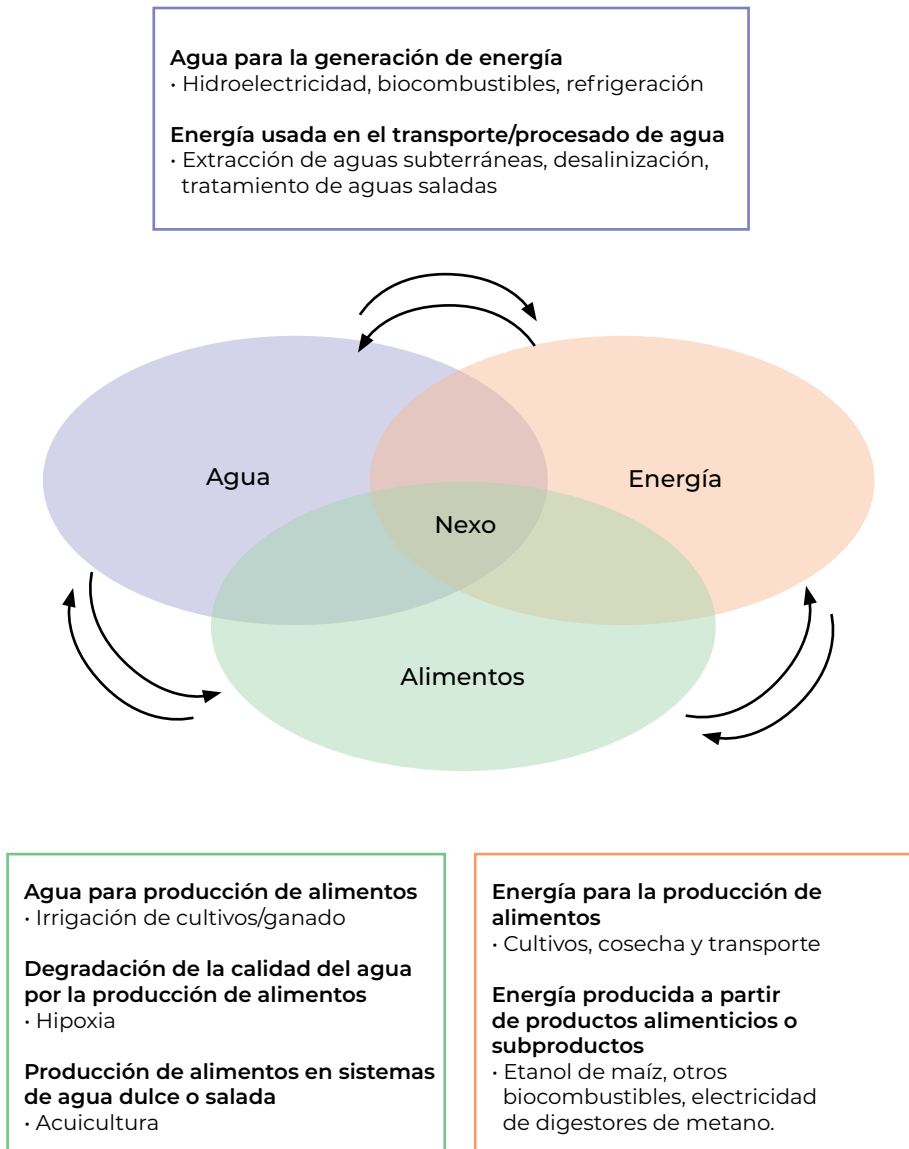
La GIRH es quizá uno de los retos más grandes que hoy tienen todos los países del mundo, en especial los que se encuentran en riesgo de sufrir escasez y dificultad en el acceso a fuentes de agua. Para vencerlo, se requiere de una fuerte institucionalidad, un compromiso de todos los actores involucrados y la gestión de recursos financieros para ejecutar los planes y programas avocados para alcanzar los ODS al 2030.

No debemos perder el foco respecto de lo que establece el Decenio Internacional de Acción por el Agua 2018-2028, “Agua para el desarrollo sostenible”, recientemente aprobado por la ONU. Ésta es la carta de navegación que traza los lineamientos para alcanzar las metas del Objetivo 6 de los ODS, “Agua limpia y saneamiento”, ya que la presión sobre los recursos hídricos y los ecosistemas han provocado un incremento en los riesgos de sequías e inundaciones, lo que limita aun más el acceso al agua potable y el saneamiento. En este contexto, es menester cambiar la visión antropocéntrica en torno al recurso hídrico, entendiendo que éste es requerido para la subsistencia de todas las especies vivas y que es fundamental no sólo garantizarlo a las generaciones presentes sino también a las futuras.

Por ello, los dos países aquí analizados deben incorporar sus metas de acceso al agua y saneamiento básico a los ODS para el 2030, materializando una GIRH que involucre a todos los actores institucionales, organismos multilaterales, ONG, academia, sector privado y sociedad civil, para generar investigaciones con un enfoque sistémico que tenga en cuenta el nexo agua-energía-alimentos.

Estos elementos son la triada fundamental para garantizar la subsistencia de la población creciente en los territorios de ambos países, de la región y del mundo. El agua, como principal fuente de generación de energía, también requiere de ésta para ser transportada, procesada, extraída e incluso tratada. El recurso hídrico es eje fundamental en la generación y obtención de alimentos en la forma de sistemas de irrigación de cultivos agrícolas, producción pecuaria y

**Figura 6.** Nexo agua-energía-alimentos



Fuente: Van Houtven, 2017.

acuícola. Comprender y adoptar el trinomio agua-energía-alimentos, entonces, es indispensable para la estabilidad de una nación y sus habitantes.

Por otra parte, las SbN son oportunidades que permitirán aprovechar los procesos naturales que regulan diferentes elementos del ciclo del agua, lo que generará ahorros económicos en los procesos de tratamiento de aguas potable y “servidas” (Unesco, 2018). Esto implica un cambio de visión y paradigmas, donde se pase de una noción de solamente oferta y demanda a un pensamiento de GIRH.

A pesar de su riqueza y oferta hídrica, Colombia y México afrontan grandes desafíos en cuanto a mejorar las coberturas de accesibilidad al agua potable, alcantarillado y saneamiento en áreas urbanas y rurales, así como a gestionar y coordinar de manera eficaz la demanda del recurso con una visión sistémica y holística que considere el equilibrio agua-energía-alimentos. De igual manera, deben garantizar el saneamiento de las aguas servidas para que éstas puedan ser reutilizadas en diferentes actividades productivas y usos domésticos, y así mitigar los efectos devastadores del cambio climático y demás factores problemáticos.

## Referencias

- ARREGUÍN, F., LÓPEZ PÉREZ, M. Y MARENGO MOGOLLÓN, H. (2011). *Water Resources in Mexico. Scarcity, Degradation, Stress, Conflicts, Management, and Policy. Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace*. Oswald Spring, Úrsula, vol. 7.
- BANCO MUNDIAL. (2018). *Calendario del agua*. <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2018/01/24/de-enero-a-diciembre-sin-agua>
- CARACOL RADIO. (2016). *Defensoría lanzó nueva advertencia por efectos de minería ilegal en Chocó*. [http://caracol.com.co/radio/2016/02/04/regional/1454624446\\_238204.html](http://caracol.com.co/radio/2016/02/04/regional/1454624446_238204.html)
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). (2002). *Compendio básico del agua*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). (2016). *Numeragua México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/publicaciones-estadisticas-y-geograficas-60692>
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE). (2018). *Reloj de población proyectada en Colombia*. <http://www.dane.gov.co/reloj/>
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (DNP). (2014). *Documento CONPES 3810. Política para el suministro de agua potable y saneamiento básico en la zona rural*. <http://www.minvivienda.gov.co/conpesagua/3810%20-%202014.pdf>
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (DNP). (2015). *Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018*. Tomo 1. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/PND/PND%202014-2018%20Tomo%201%20internet.pdf>
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (DNP). (2017). *Economía circular para la gestión de agua potable y saneamiento*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Vivienda%20Agua%20y%20Desarrollo%20Urbano/Seminario%20Econom%C3%ADa%20Circular%20del%20Agua%20y%20Saneamiento/6.%20Gesti%C3%B3n%20de%20Agua%20Potable%20y%20Saneamiento.pdf?>
- DÍAZ, G. (2016). Así se ve el río Lerma tras décadas de contaminación. *Diario Excelsior*. <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/04/20/1087800#imagen-1>
- FINANCIERA DEL DESARROLLO TERRITORIAL (FINDETER). (2017). *Informe sectorial: Agua potable y saneamiento básico*. [file:///C:/Users/yeffe/Downloads/Informe%20de%20agua\\_02octubre2017NMV%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/yeffe/Downloads/Informe%20de%20agua_02octubre2017NMV%20(2).pdf)
- FONDO PARA LA COMUNICACIÓN Y LA EDUCACIÓN AMBIENTAL, A.C. (2016). *Cuerpos de agua de México*. <https://agua.org.mx/cuerpos-de-agua/#rios>
- GLEICK, P. (1993). Water and Conflict: Fresh Water Resources and International Security. *International Security*, 18(3), 79-112.
- GONZÁLEZ, M. Y ASPRILLA, Y. (2016). La habitabilidad del espacio periurbano en el área metropolitana de Guadalajara: Entropías en la provisión de servicios hidrosanitarios.

- Revista Tecnogestión*, 13(1), 92-106. <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tecges/article/view/12130/12697>
- HIGH-LEVEL PANEL ON WATER (HLPW). (2018). *Making Every Drop Count: An Agenda for Water Action*. <http://www.unwater.org/high-level-panel-on-water-outcome-document/>
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI). (2015). *Población en México*. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/estructura/>
- JALOMO, F. (2016). *El acceso equitativo al agua en zonas metropolitanas: Guadalajara, 2006-2012*. Primera edición. Ed. Staudeg.
- LIZARAZO, L. (2018). Mapa: estos son los 10 ríos más contaminados de Colombia. *El Tiempo*. <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/mapa-los-rios-mas-contaminados-en-el-pais-209310>
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2013). *Programas y proyectos del Plan Hídrico Nacional fase II (201-2018)*. <http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/plan-hidrico-nacional/Plan-Hidrico-Nacional-Fase-II.pdf>
- ORGANIZACIÓN DE NACIONES UNIDAS (ONU). (2017). *Objetivos de desarrollo sostenible*. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- ORGANIZACIÓN DE NACIONES UNIDAS (ONU). (2018). *Decenio Internacional para la Acción “Agua para el Desarrollo Sostenible”, 2018-2028*. <http://www.un.org/es/events/waterdecade/>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA EDUCACIÓN, LA CIENCIA Y LA CULTURA (UNESCO). (2018). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. <http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002614/261494s.pdf>
- SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). (2013). *Programa Nacional Hídrico*. <http://files.conagua.gob.mx/transparencia/PNH2014-2018.pdf>
- VAN HOUTVEN, G. (2017). *La gestión integral de recursos hídricos como marco de la economía circular y de análisis hidro-económico*. RTI International.



# Agua y salud pública





## Capítulo 9

# Efecto del cambio climático en la distribución espacial de las condiciones ambientales para la malaria en Colombia

■ Juan Carlos Alarcón-Hincapié<sup>17</sup>

## 1. Introducción

El cambio climático actual impactará de diversa forma, por diferentes vías y en una variedad de aspectos, en todas las regiones del mundo (IPCC, 2013). Modificará las distribuciones espaciales en los componentes fisicobiótico y socioeconómico, lo que perturbará la relación sociedad-naturaleza en la que se basa su desarrollo. En efecto, el cambio climático expresado en modificación de la temperatura media, de la precipitación anual, de la humedad relativa y de la escorrentía, afectará directamente a los ecosistemas, con lo que surgirá una amplia gama de consecuencias para diferentes aspectos de la sociedad, entre ellos, el de la salud humana.

Las repercusiones del cambio climático en la salud humana no se distribuirán uniformemente. Confalonieri (2007) plantea que las poblaciones de los países en desarrollo, en particular los pequeños Estados insulares, las zonas áridas, de alta montaña y costeras densamente pobladas, se consideran las más vulnerables. Las evidencias de que los cambios climáticos del pasado han tenido una incidencia marcada en la salud humana las refieren Hódar *et al.* (2012). El cambio climático en curso no sólo no sería una excepción, sino que afectará considerablemente el funcionamiento y desarrollo de una sociedad estrechamente rela-

---

<sup>17</sup> Doctor en Geografía. Docente investigador. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. [jalarconh@yahoo.es](mailto:jalarconh@yahoo.es)



cionada con el clima. Por lo tanto, sus efectos sobre la salud se podrían sintetizar en un aumento de brotes de enfermedades como la malaria, dengue y elefantiasis transmitidas por proliferación de mosquitos, caracoles y moscas; aumento de brotes de diarreas y enfermedades infecciosas debido a la escasez de agua y a las condiciones de precaria higiene posdesastres; mayor desnutrición en niños y adultos por la falta de alimentos y agua potable por posibles desastres naturales, y muertes de ancianos y mujeres embarazadas por las olas de calor.

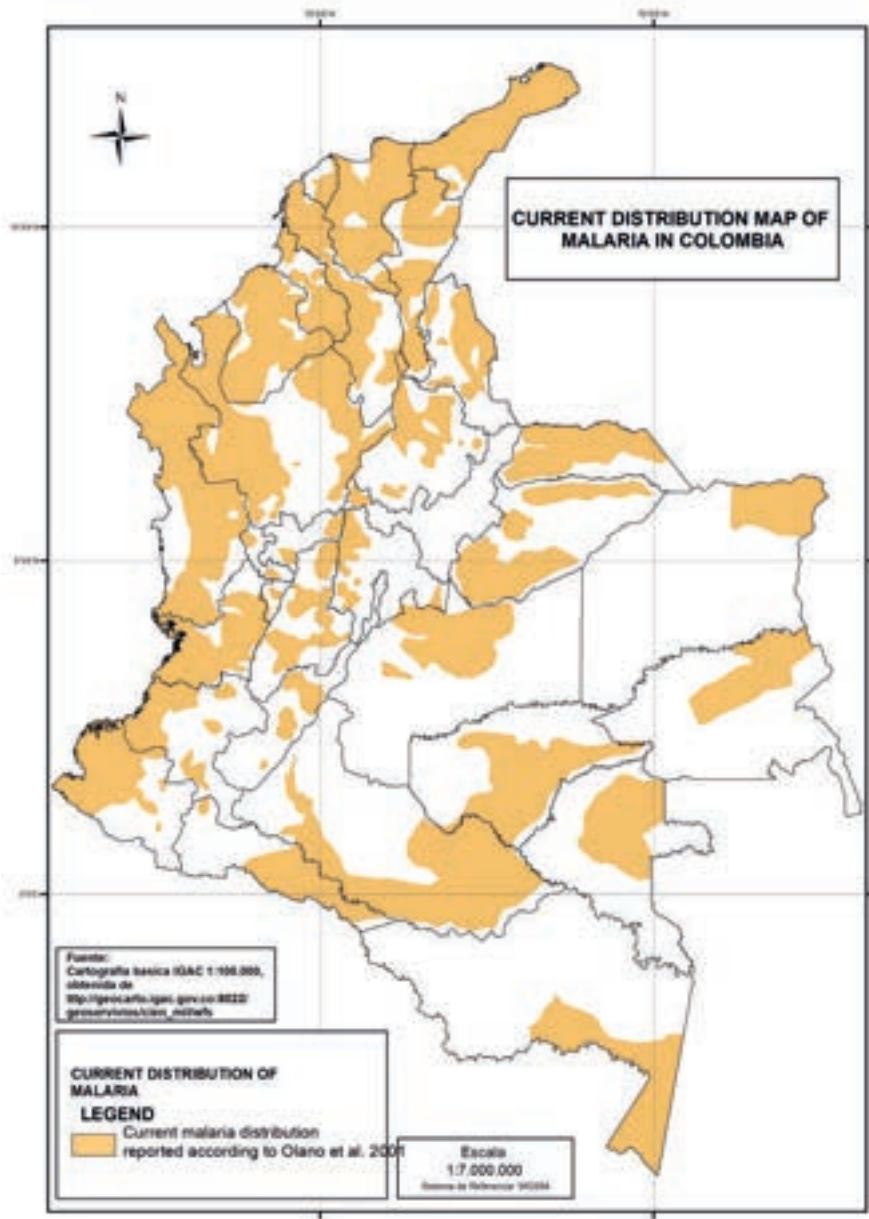
Actualmente, la malaria es uno de los problemas más graves de salud pública en Colombia. Tiene un patrón de transmisión endémica (enfermedad que persiste durante un tiempo determinado en un lugar concreto y que afecta o puede afectar a un número importante de personas) y epidémica causada por una fuente común de infección: el parásito *Plasmodium vivax*. Éste es responsable del 70% de los casos reportados (105 mil anuales), y el resto se le atribuye casi de manera exclusiva al *Pasmodium falciparum* (Padilla *et al.*, 2011).

Las características fisicogeográficas del país favorecen la existencia de regiones con una gran variedad de climas y una gran cantidad de vectores anofelinos. Sumado a esto, existe la migración dinámica de las poblaciones humanas infestadas por todo el país, lo que propicia la proliferación de la enfermedad y la difusión de parásitos de malaria resistentes a los medicamentos (Arango *et al.*, 2008).

La malaria se localiza principalmente en zonas de difícil acceso y con sistemas de salud frágiles (Carter, 2009). A pesar de esto, Colombia presenta una tendencia a la baja en los casos clínicos de malaria, pasando de 144 432 en 2000 a 79 252 en 2009 y a 83 mil en 2016. Colombia está entre los países de América Latina con una reducción del 20–25% en los casos de malaria en la última década, junto con Brasil y Guayana (OMS, 2010). Es importante señalar que, de acuerdo al Sistema de Vigilancia Epidemiológica (Sigivila), se produjo un nuevo aumento de 115 884 casos notificados en 2010. Este aumento se debió principalmente a las variaciones climáticas.

Olano *et al.* (2001) hacen una espacialización horizontal y vertical de los vectores primarios y secundarios de malaria en Colombia. Estos mapas se levantaron con base en publicaciones científicas, los datos de la colección de referencia, las actividades de la Red Nacional de Entomología Médica, las seccionales departamentales y municipales de salud, los documentos internos de investigaciones y los estudios de brotes realizados por el laboratorio de Entomología del Instituto Nacional de Salud. El estudio refleja el panorama actualizado de la distribución de los *Anopheles* encargados de la transmisión de la malaria en Colombia, y sirvió de base para la validación de los resultados de esta investigación.

Figura 1. Mapa de distribución actual de malaria en Colombia



Fuente: Olano et al., 2001

Desde un enfoque entomológico, es probable que los cambios ambientales y climáticos influyan en la dinámica de los criaderos, de los estadios inmaduros de mosquitos y de la longevidad de los vectores, lo que incide en la transmisión de malaria (Poveda *et al.*, 2008). Si se conocen y comprenden las asociaciones entre clima, malaria y vectores, se podrían generar estrategias de prevención de brotes de esta enfermedad y así contribuir al diseño y aplicación de medidas de adaptación efectivas frente al cambio climático.

Por lo anterior, la transmisión de la malaria en un territorio depende de que se presenten condiciones e interacciones a diferentes escalas espaciales y temporales de múltiples variables climáticas, de paisaje y humanas. Todas éstas influyen sobre el comportamiento biológico de los parásitos, los vectores de la enfermedad, las condiciones que favorecen o no el contacto hombre-vector y las que facilitan o limitan la prevención y el control de la enfermedad (Medina *et al.* 2011). En este contexto, el comportamiento de la malaria se considera complejo y espacialmente heterogéneo (Grillet *et al.*, 2009; Hay y Snow, 2006; Real y Biek, 2007; Souza-Santos *et al.*, 2008), por lo que existen dificultades para identificar áreas ambientalmente potenciales para el establecimiento de sus vectores, y más aun si pensamos en los cambios que sufrirán las variables climáticas bajo los diferentes escenarios que se prevén.

Un posible enfoque para evaluar la incidencia del cambio climático sobre la distribución espacio-temporal de la enfermedad es a partir de la modelación de las posibles afectaciones que sufrirá el territorio colombiano en la distribución espacial de las variables climáticas que inciden en el establecimiento y proliferación del vector. Una aproximación similar se ha realizado por Craig *et al.* (1999), quien utilizó un modelo de lógica difusa para la zonificación de la distribución estable de la malaria en África subsahariana, basado en precipitación y temperatura. Dicho modelo mostró ser compatible con datos de campo y mapas históricos a escala continental, pero estima de manera conservadora la distribución de la malaria al no considerar las anomalías territoriales a escalas con mayor resolución espacial que puedan afectar la distribución como, por ejemplo, los ríos en planicies de inundación, áreas de bajas precipitaciones, prácticas agrícolas o deforestación. Es así como Rincón-Romero y Londoño (2009) adaptan este modelo a la resolución espacial y a las condiciones húmedas y heterogéneas propias de Buenaventura en el Valle del Cauca, Colombia. En su modelo incluyen variables geomorfológicas y antrópicas para identificar áreas de riesgo de trasmisión de la malaria.

Por esta razón es urgente analizar las posibles modificaciones espaciales que por el cambio climático sufrirá el territorio colombiano en los decenios veni-

deros frente a la enfermedad. El presente trabajo explora las probables transformaciones espaciales en las condiciones ambientalmente potenciales para la malaria que generarían diferentes escenarios de cambio climático en el transcurso del siglo XXI en el territorio colombiano.

## 2. Metodología

El estudio se realizó en dos grandes fases: 1) la modelación de la distribución espacial actual de las condiciones ambientales óptimas para la malaria en Colombia con una base climática 1981-2010, y 2) la modelación de las posibles distribuciones futuras de las condiciones ambientales óptimas para la malaria considerando los periodos 2011-2040 y 2070-2100, bajo los escenarios de cambio climático A2 y B2 por IPCC (2000).

### 2.1 La modelación de la distribución espacial actual de las condiciones ambientales óptimas para la malaria

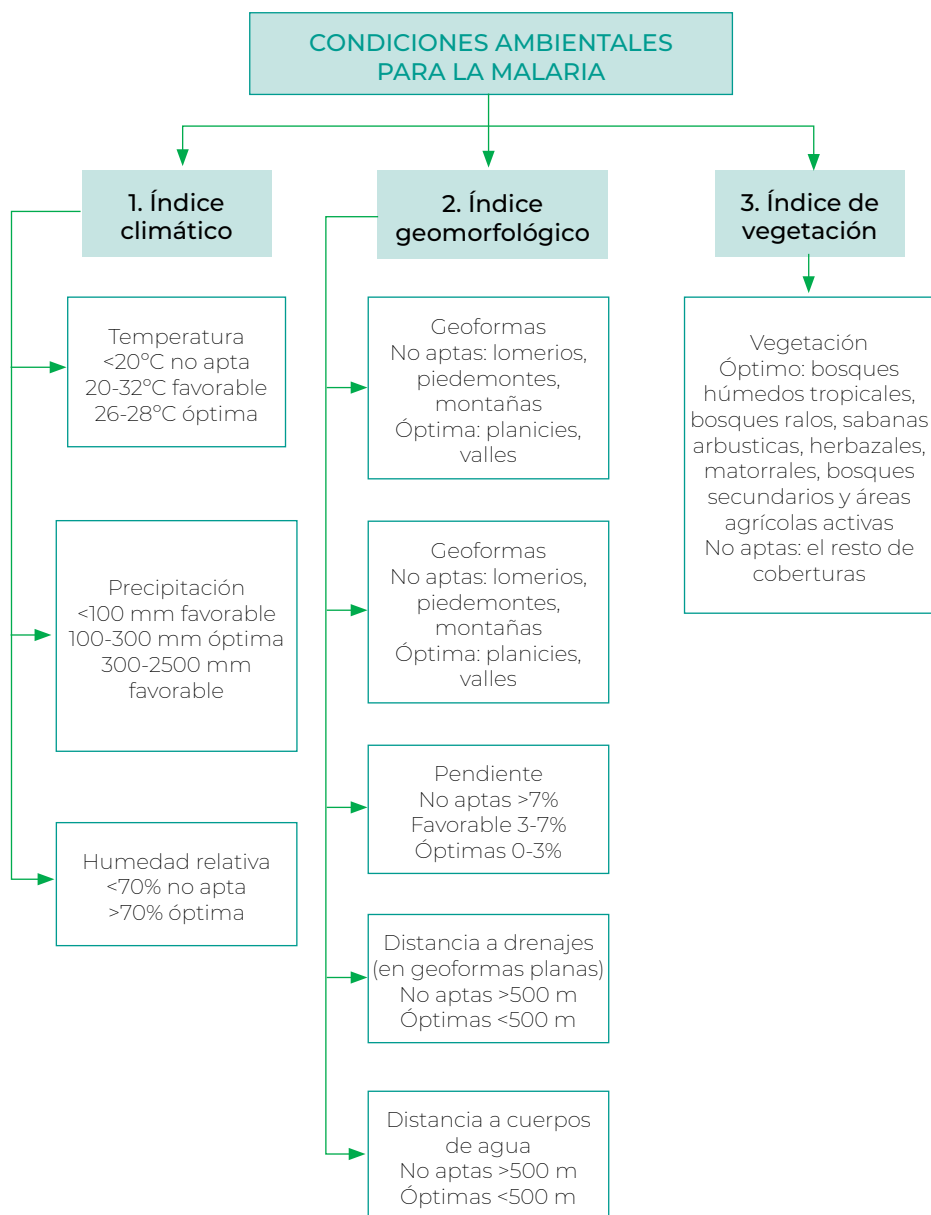
La distribución espacial de las condiciones ambientales para malaria (CAM) para un periodo de referencia (1970-2000) se modeló utilizando una modificación de la metodología de Rincón Romero y Londoño (2009). Las áreas con CAM se determinaron a partir de la combinación de mapas de conveniencia de malaria, producto de una evaluación de múltiples criterios ambientales (climáticos, paisaje y vegetación). El presente estudio, a diferencia del de Rincón Romero y Londoño, no llega a la zonificación de riesgos de malaria por la no inclusión de variables demográficas, socioeconómicas ni de vulnerabilidad.

Para generar el mapa de CAM se combinaron diversas capas de información en formato vector y *aster*, en las cuales se representan criterios de idoneidad o conveniencia para el establecimiento de los parásitos de la malaria. Los criterios y las reglas de decisión se definieron con base en la evaluación de expertos para normalizar las variables espaciales disponibles.

#### Índice climático

Este mapa constituye las condiciones de precipitación media anual, temperatura media anual del aire y humedad relativa favorables para el ciclo de vida de parásitos y vectores de malaria. La temperatura media anual del aire se obtuvo a partir de las mediciones en estaciones climatológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y estimaciones con base en el Modelo Digital de Elevación (DEM), que generaron datos de temperatura media anual para píxeles cada 900 m. Para el cálculo de la temperatura media anual con el DEM se utilizó la relación:

**Figura 2.** Esquema metodológico para la zonificación de áreas ambientalmente potenciales para malaria



Fuente: Elaboración propia.

$$T_x = T_{\text{estación}} - (\Omega_T * (h_{\text{pixel}} - h_{\text{estación}}))$$

$T_x$ : temperatura media para un nuevo pixel;  $T_{\text{estación}}$ : temperatura media anual de la estación meteorológica;  $h_{\text{pixel}}$ : altura sobre el nivel del mar del nuevo pixel;  $h_{\text{estación}}$ : altura sobre el nivel del mar de la estación meteorológica, y  $\Omega_T$ : gradiente de temperatura por región climática, calculado así:

$$\Omega_T = (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}) / (h_{\text{máx}} - h_{\text{mín}})$$

$T_{\text{máx}}$ : temperatura máxima de la región climática en mm;  $T_{\text{mín}}$ : temperatura mínima de la cuenca climática en mm;  $h_{\text{máx}}$ : altura máxima de la estación con temperatura en m;  $h_{\text{mín}}$ : altura mínima de la estación con temperatura en m.

Con IDW (*inverse distance weighted interpolation* o distancia inversa ponderada), se interpolaron los datos de temperatura media anual observados, así como los generados con el DEM para obtener datos para pixeles de 900 m (cerca de 15 millones de puntos para el territorio colombiano). Una vez evaluados los diferentes métodos de interpolación disponibles, el que mejores resultados entregó fue la IDW, debido a que el muestreo fue lo suficientemente denso en relación a la variación que se estaba estudiando (14 millones de puntos aproximadamente).

La precipitación se obtuvo con los datos de estaciones climatológicas suministrados por el IDEAM, complementados a partir de las bases de datos de la *Tropical Rainfall Measurement Mission* (TRMM), con lo que se obtuvo un total de 3.7 millones de puntos con datos de precipitación anual. A partir de estos datos, con IDW se generó información para una cuadrícula de 900x900 m. La humedad relativa del aire se obtuvo de la interpolación espacial de 707 estaciones climatológicas distribuidas por todo el territorio nacional con valores de humedad relativa promedio anual.

La probabilidad de supervivencia del mosquito y su abundancia son elementos críticos en el ciclo de vida de transmisión de enfermedades por vectores, donde factores externos, como la temporalidad de la precipitación y la temperatura, juegan un papel importante (Craig *et al.*, 1999). Según Rubio-Palis y Zimmerman (1997), el rango de distribución de esta especie en Sudamérica incluye parámetros climáticos que van desde 20 a 28°C de temperatura media anual,

**Tabla 1.** Gradiente de temperatura por región climática

Región	Gradiente	Región	Gradiente
	(°c/100 m)		(°c/100 m)
1. Alta Guajira	0.6	13. Sabana de Bogota	0.55
2. Sierra Nevada de Santa Marta y Cuenca del Cesar	0.57	14. Río Sogamoso	0.55
3. Litoral Central	0.57	15. Catatumbo	0.52
4. Bajo Magdalena	0.5	16. Río Arauca y Cuenca Media del Meta	0.58
5. Sinu-San Jorge-Bajo Nechi-Uraba	0.5	17. Piedemonte Llanero	0.53
6. Pacífico Norte y Central	0.49	18. Orinoquia Oriental	0.57
7. Pacífico Sur	0.49	19. Orinoquia Central	0.55
8. Montaña Nariñense	0.57	20. Suroriente Amazónico	0.55
9. Alto Cauca	0.57	21. Amazonia Central	0.53
10. Medio Cauca y Alto Nechi	0.52	22. Piedemonte Amazónico	0.51
11. Alto Magdalena	0.57	23. Alto Patia	0.57
12. Medio Magdalena	0.57	24. San Andrés y Providencia	0.58

Fuente: Elaboración propia.

de 100 a 2 500 mm de precipitación media anual, y humedad relativa superior al 70%. Sin embargo, sus óptimos se dan en temperaturas medias anuales entre 26 a 28°C y precipitaciones entre 100 y 300 mm, mientras que temperaturas por debajo de los 20°C y humedades relativas inferiores al 70% no permiten el desarrollo del *Anopheles*. Para la integración de los mapas, cada uno se calificó en rangos con valores de (1) óptimas, (2) favorables y (3) no aptas. Este índice climático es el resultado del promedio aritmético entre los valores de cada uno de los polígonos de los mapas.

## Índice geomorfológico

Este mapa se refiere a las condiciones de paisaje favorables para los criaderos y hábitats de los anofelinos vectores de malaria. Las variables espaciales utilizadas son:

- a) *Geoformas*. Se refiere a las formas del relieve que propician la acumulación de agua y menor escorrentía superficial. En los lomeríos, piedemontes y montañas se calificó como “no aptas”, y formas como planicies y valles como “óptimas”.
- b) *Pendiente*. Representa los grados de pendiente propicios para la acumulación de agua. En lugares de pendientes bajas el agua tiende a depositarse, mientras que en sitios con pendientes más pronunciadas hay mayor escorrentía superficial. Zonas con pendientes entre 0 y 3% son “óptimas”, entre 3 y 7% “favorables” y mayores al 7% “no aptas”.
- c) *Distancia a drenajes*. A menor distancia de ríos, mayor es la posibilidad de desborde y acumulación de agua en geoformas planas propicia para criaderos de anofelinos vectores. Esta variable está en el modelo Rincón-Romero y Londoño (2009). En paisajes con pendientes menores se esperan desbordes de caudal comparativamente más extensos que en aquellos con pendientes más pronunciadas. En este sentido, la distancia de hasta 500 m es “óptima” y distancias mayores a 500 m son “no aptas”.
- d) *Distancia a cuerpos de agua, buffer a cuerpos de agua*. La población tiende a establecerse en áreas cercanas a cuerpos de agua con fines de consumo y economía. El rango de preferencia es entre 0-500 m (“óptima”), y disminuye con la distancia mayor a 500 m (“no apta”).

## Índice de vegetación

Representa el tipo de cobertura vegetal y el uso del suelo que propician los vectores de la malaria, así como las condiciones de conveniencia para el hábitat de los anofelinos. Este tipo de insectos se reproducen en cuerpos de agua a los márgenes del bosque, con requerimientos específicos de profundidad, temperatura, pH, estabilidad química y con preferencia a lugares con cobertura vegetal que den sombra parcial y exposición directa al sol (Singer y Castro, 2001; Rubio-Palis *et al.*, 2010). De acuerdo a las últimas investigaciones de Hiwat y Bretas (2011), los bosques primarios o poco perturbados raramente prevén condiciones ideales para criaderos de los insectos debido a la acidez de las aguas y la falta de los cuerpos de agua parcialmente sombreados. Adicional a esto, Vittor *et al.* (2009) encontraron para la amazonia peruana que los principales criaderos de mosquitos tienen un promedio de cobertura forestal del 24%. Ello



indica que la estacionalidad, la presencia de algas, el tamaño del cuerpo de agua, la presencia de poblaciones humanas y la cantidad de bosque y vegetación secundaria determinan la presencia o ausencia de los anofelinos. Sin embargo, para el caso colombiano, estas áreas con bosques húmedos tropicales favorecen las condiciones para el desarrollo de la enfermedad. Los autores concluyen que la deforestación, las alteraciones ecológicas de los ecosistemas y toda huella de intervención humana son propicias para la presencia de larvas y, por ende, un incremento en el riesgo de la transmisión de la malaria.

Por lo anterior, las coberturas vegetales se calificaron como “óptimas” para los bosques húmedos tropicales, bosques intervenidos, bosques ralos, sabanas arbustivas, herbazales, matorrales, bosques secundarios centros poblados, vegetación secundaria y áreas agrícolas activas. Por su parte, las “no aptas” fueron las coberturas de bosques naturales primarios, glaciares y nieves, áreas desnudas y vegetación en paramo. Estas coberturas provienen del mapa general de ecosistemas del SINA (2007).

Para generar el mapa de síntesis de condiciones ambientales actuales para la malaria (CAAM), se superpusieron los mapas de índice climático, índice geomorfológico e índice de vegetación. Los resultados se promediaron y se obtuvieron tres categorías : 1. áreas óptimas, 2. áreas favorables y 3. áreas no aptas.

## 2.2 La modelación de la distribución espacial futura de las condiciones ambientales óptimas para la malaria

Las condiciones ambientales futuras óptimas para la malaria se simularon mediante la incorporación de los datos climatológicos de los escenarios propuestos, con base en la aplicación de un modelo climático regional (MCR) por Pabón (2012), para los periodos 2011–2040 y 2070–2100, en los escenarios A2 y B2 de IPCC (2000). La distribución espacial de la temperatura media anual, la precipitación anual y la humedad relativa del aire en esos escenarios se interpoló utilizando IDW para generar información a mayor resolución espacial (900 m), disponer de datos para todo el territorio nacional y estandarizar la información del periodo 1971–2000.

Para generar el mapa de síntesis de condiciones ambientales futuras para la malaria (CAFM), se superpusieron los mapas de índice climático futuro, índice geomorfológico e índice de vegetación. Los resultados se promediaron y se obtuvieron tres categorías: 1. áreas óptimas, 2. áreas favorables y 3. áreas no aptas.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Temperatura, precipitación y humedad relativa actual

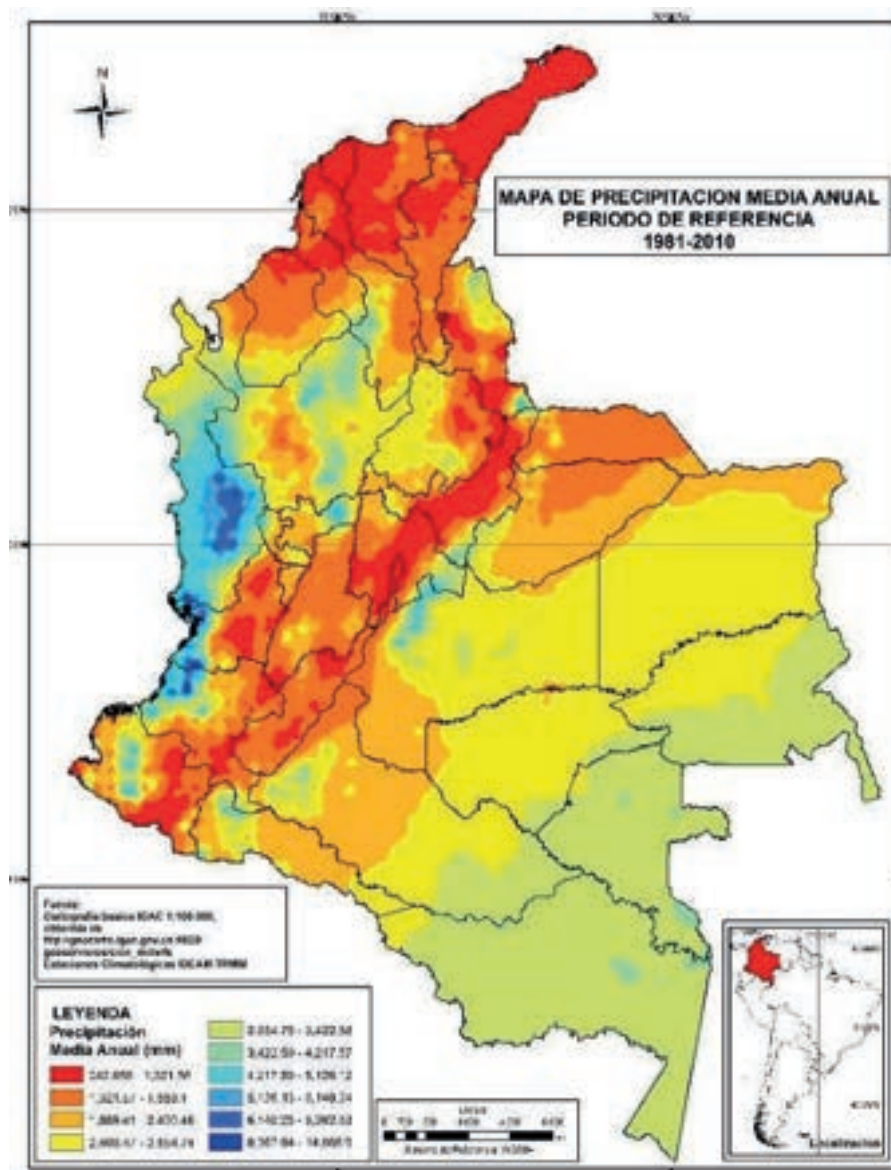
Con base en la información climática básica, se generaron las capas de precipitación para el periodo 1971–2000. Los valores mínimos y máximos reportados en la Guajira y el sector norte del departamento del Cauca fueron 242 mm y 14 665 mm, respectivamente. El mapa de temperatura media anual del aire es el resultado de la unión espacial de cada región climática. El análisis consideró más fielmente la distribución espacial de la temperatura por tener en cuenta factores de tipo geográfico como la altura sobre el nivel de mar, las variaciones locales por efecto, la topografía y por el efecto de barlovento y sotavento.

En cuanto a la humedad relativa, los valores mínimos se dan en los límites de los departamentos de Tolima y Huila y los departamentos de la Guajira y norte de Santander; los valores extremos se presentan en el Pacífico y sur del país entre el 85 y 95%. El resto del país se caracteriza por humedades relativas entre el 75 y el 85%. Los valores más bajos (<70%) se presentaron en los departamentos Huila Norte, Tolima, la Guajira, norte de Santander y algunos núcleos en los departamentos de Santander, Antioquia y Boyacá. Los más altos (>85%) se localizaron en el costado oriental del departamento del Chocó, nororiente del Valle del Cauca, el límite oriental de los departamentos de Cauca y Nariño y la Bota amazónica. El resto del país se caracteriza por una humedad relativa con valores medios entre el 70 y el 85%.

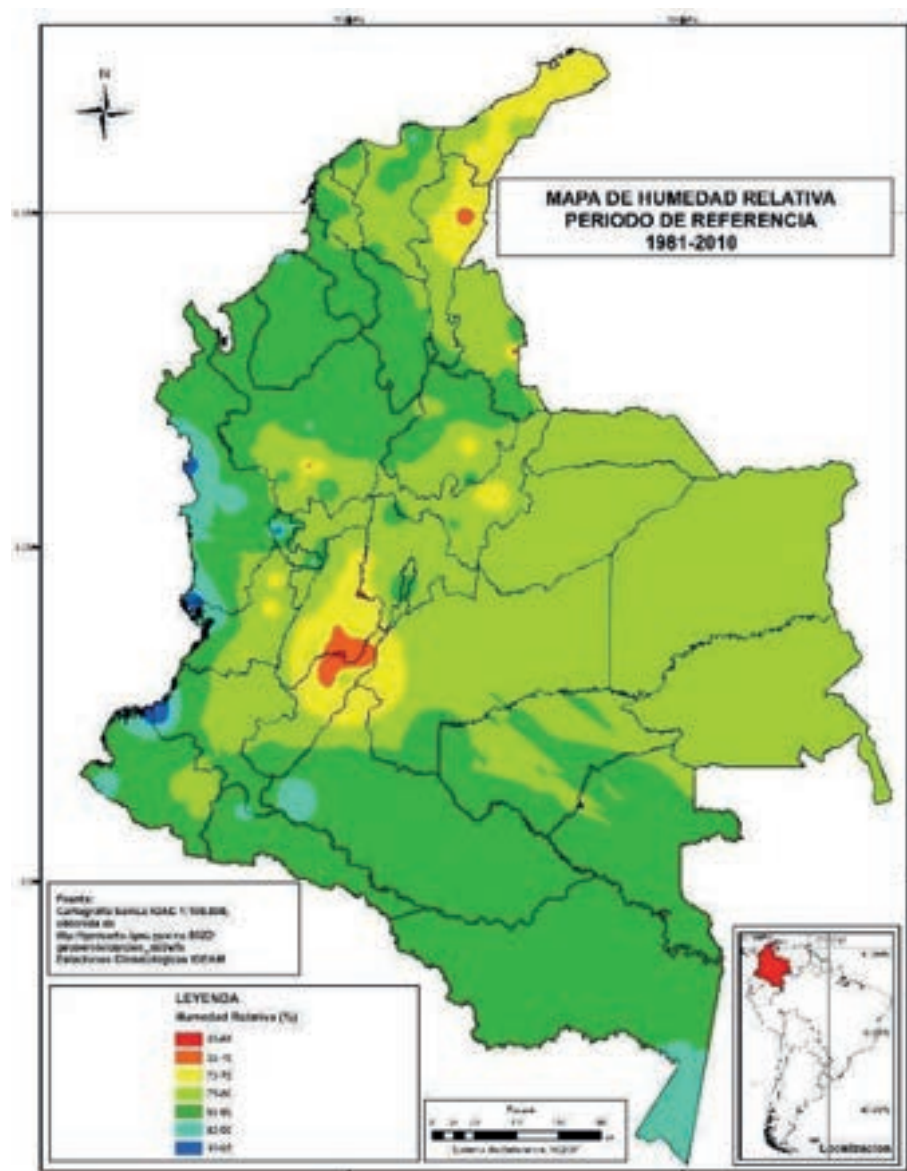
#### 3.2 Condiciones ambientales actuales para malaria

Con base en la superposición espacial de los tres índices (índice climático actual, índice geomorfológico e índice de cobertura vegetal) se obtuvo la distribución espacial de las actuales condiciones ambientales para malaria. Según el modelo, cerca del 60% del territorio tiene condiciones ecológicas capaces de soportar la malaria, y las diversas regiones del país, como la Amazonia, el Caribe, las sabanas de la Orinoquia, el Pacífico y los valles interandinos de los ríos Magdalena y Cauca), presentan condiciones adecuadas para su reproducción y transmisión. Estos resultados muestran que la superficie con condiciones óptimas representa el 12% del territorio nacional, localizándose principalmente en las áreas de sabanas de los departamentos de Arauca, Casanare, Vichada y Meta, parte norte del departamento de Chocó y el Urabá Antioqueño, así como también en las áreas bajas y áreas de agroecosistemas de los departamentos de Córdoba, Sucre, Atlántico, norte del departamento de Bolívar y sur del

**Figura 3.** Mapas de precipitación media anual, temperatura media anual del aire y humedad relativa media anual, periodo de referencia 1981-2010

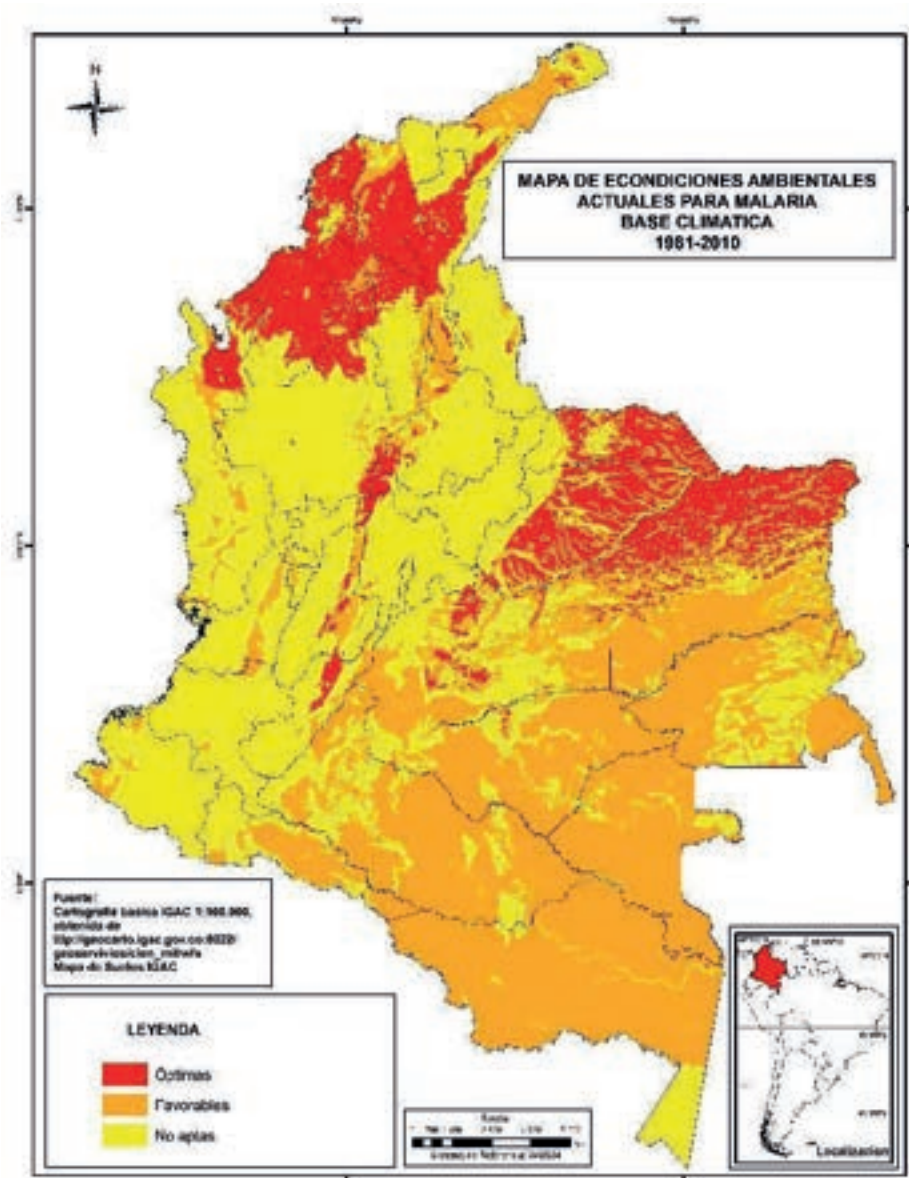








**Figura 4.** Mapa de condiciones ambientales actuales para malaria, periodo de referencia 1981-2010



Magdalena. También se presenta en el valle interandino de del río Grande de la Magdalena, en Huila, Tolima, Caldas, Cundinamarca, Boyacá y suroccidente de Santander. La temperatura ideal de estas áreas oscila entre los 26 y los 28°C en terrenos planos cuyas pendientes no superan el 3%, fácilmente inundables, con coberturas vegetales en su gran mayoría transformadas. Las condiciones favorables para el establecimiento de los mosquitos de malaria cubren un 464% del total nacional. Su distribución geográfica se presenta principalmente en el departamento de Guajira, noroccidente del Magdalena, en el límite de los departamentos de Cesar y Bolívar, el margen occidental de Santander, casi toda la región amazónica con excepción de los afloramientos rocosos de Chiribiquete y la Bota amazónica, así como en las áreas de agroecosistemas de Caquetá y Putumayo. También tienen estas condiciones los departamentos de Choco y Valle del Cauca; aquí la temperatura promedio está entre los 20 y los 32°C, hay terrenos ondulados, pendientes hasta del 7%, coberturas principalmente transformadas y pastos y humedad relativa superior al 70%. Finalmente, los territorios que no ofrecen las condiciones ambientales para el vector de la malaria corresponden al 42% del total nacional, localizándose en zonas con temperaturas inferiores a 20°C y en las áreas andinas del país, relieves ondulados y montañosos, y con excesos de precipitación.

### 3.3 Temperatura, precipitación y humedad relativa futuras

En términos generales, para el periodo 2011-2040 la temperatura del aire aumentaría alrededor de los 2°C por encima de lo observado en el periodo de referencia, con incrementos de hasta 4°C en diferentes regiones al finalizar el periodo. El calentamiento tiende a ser mayor en el Valle del Magdalena, la Orinoquia, un extenso sector de la Amazonia y el sector central del litoral Caribe, así como en el sur de la costa pacífica, principalmente en el departamento de Nariño. En el periodo 2071-2100, bajo el escenario A2, la temperatura media anual del aire presenta aumentos drásticos. Si bien el incremento de la temperatura es del orden general de 2 a 4°C en la mayor parte del territorio, en el Valle del Magdalena, Valle del Cauca, la región Caribe y la Orinoquia colombiana el aumento está entre 4 y 6°C.

En los dos escenarios evaluados (A2 y B2), la precipitación anual durante el periodo 2011-2040 tendría un incremento mayor del 10% comparada con la que se observaba en el periodo de referencia. Estos incrementos se observan principalmente en las regiones de la Orinoquia y de la Amazonia, el piedemonte amazónico y llanero, el Alto y Medio Magdalena, todo el altiplano cundiboyacense y nororiente del Chocó. Por otro lado, se aprecian núcleos con

incrementos mayores principalmente en el piedemonte llanero, parte alta del río Arauca, norte del Chocó y un sector al sureste de la Sierra Nevada de Santa Marta. Reducción de la precipitación anual en el periodo mencionado se observaría en la cuenca del río Cauca, en el Pacífico Sur y en un sector centro-sur del Chocó, así como en una amplia zona en la región Caribe.

En el periodo 2071-2100, en los dos escenarios A2 y B2, las reducciones de precipitación mayores del 30% en relación con los valores anuales de 1971-2000 se observarían en la región interandina y del Caribe. La reducción más fuerte (por encima del 50%) estarían en la parte andina de Nariño y Cauca, en Huila y Tolima, en el altiplano cundiboyacense, Norte de Santander, La Guajira y en sectores del Litoral Caribe Central. Aumento de la precipitación ocurriría en la vertiente del Pacífico y en la Orinoquia y Amazonia. Se destacan los sectores con incrementos mayores de 50% en el centro-norte de la costa Pacífica, en el Magdalena Medio y en algunos pequeños núcleos en el piedemonte amazónico y llanero. En el escenario A2, el aumento de la precipitación en el área del Magdalena Medio es más intenso y cubre mayor área en comparación con lo que ocurriría bajo el escenario B2.

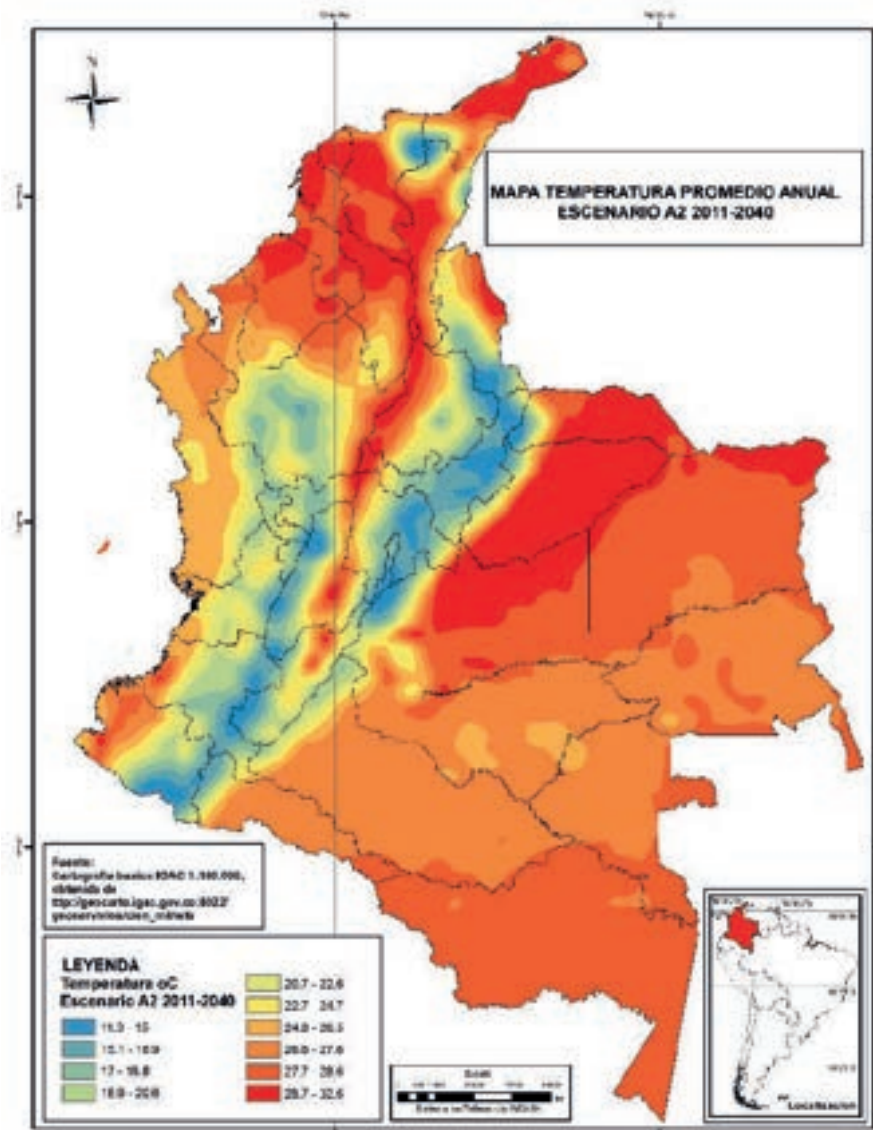
En términos de humedad relativa, los valores más bajos (<70%) se presentarían en los departamentos Huila norte, Tolima al sur, la Guajira y núcleos localizados en los departamentos de Boyacá, Antioquia y Santander. Los valores más altos (mayor al 85%) se localizarían al oriente de los departamentos de Chocó y en la parte central y el sector occidental del departamento de Casanare, tanto en los escenarios A2 y B2 a mediados de siglo. Para finales de siglo, la situación tiende a incrementarse considerablemente, pues las áreas con humedades relativas bajas se incrementan en superficie en los mismos departamentos en los valles interandinos del río Grande de la Magdalena y río Cauca, así como en el sector nororiental del departamento del norte de Santander, siendo la situación más extrema en el escenario A2.

### 3.4 Mapas de condiciones ambientales futuras para malaria

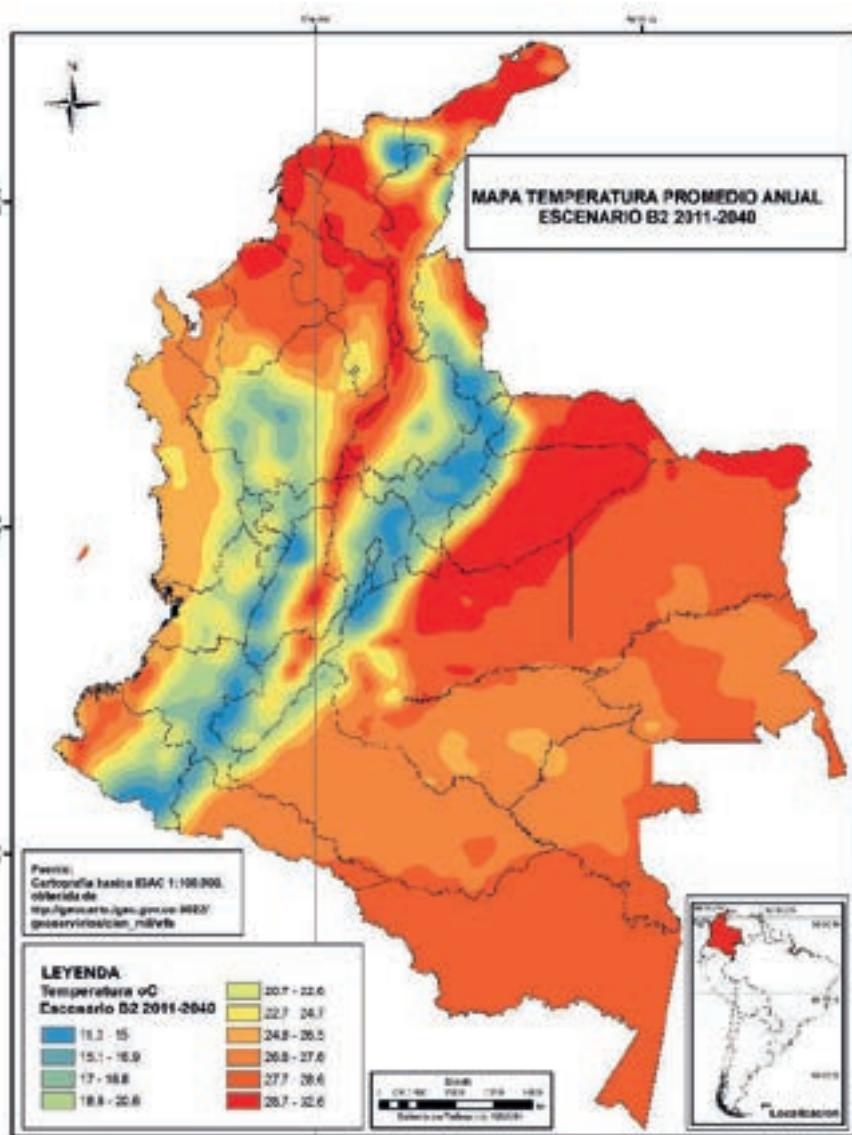
Al correr el modelo para la zonificación de áreas ambientalmente potenciales para malaria, para los escenarios de cambio climático propuestos se generaron cuatro mapas con la distribución espacial y las nuevas zonas para los dos periodos analizados bajo los escenarios de cambio climático A2 y B2.

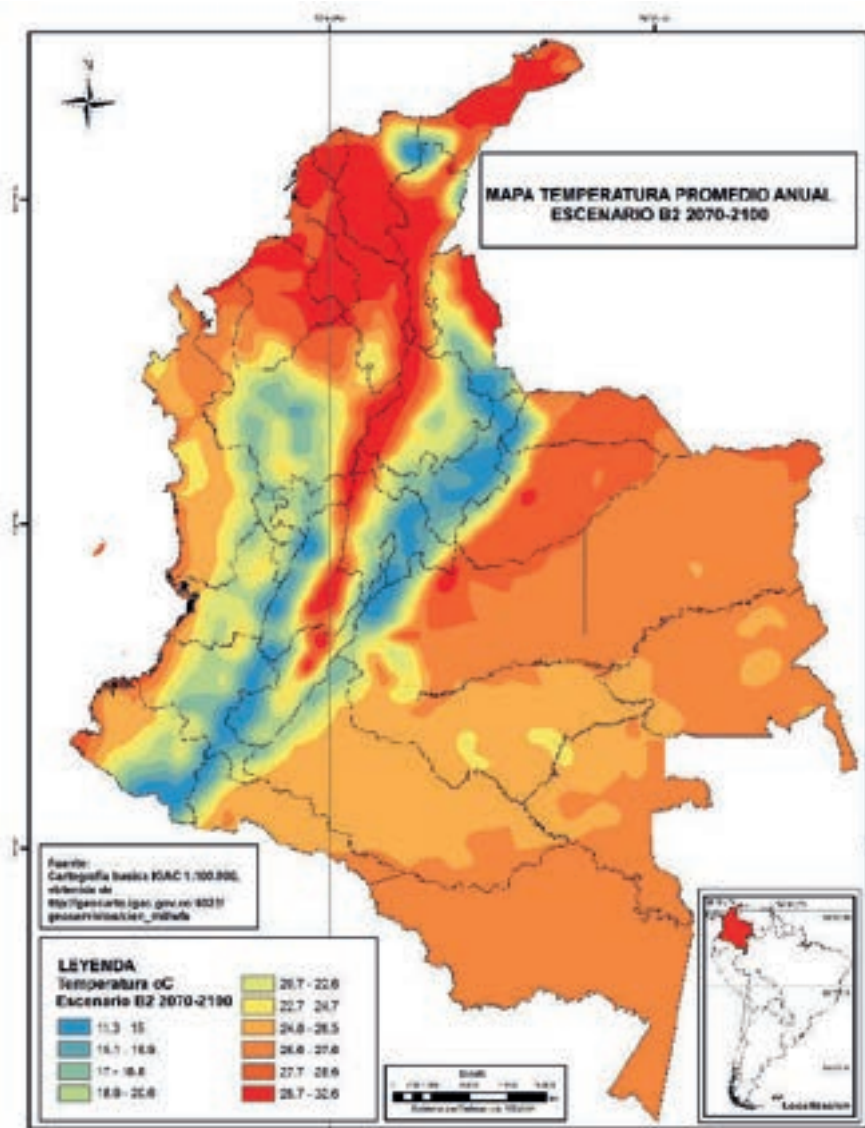


**Figura 5.** Temperatura media anual del aire, precipitación anual y humedad relativa media anual bajo los escenarios A2 y B2, periodos 2011-2040 y 2070-2100



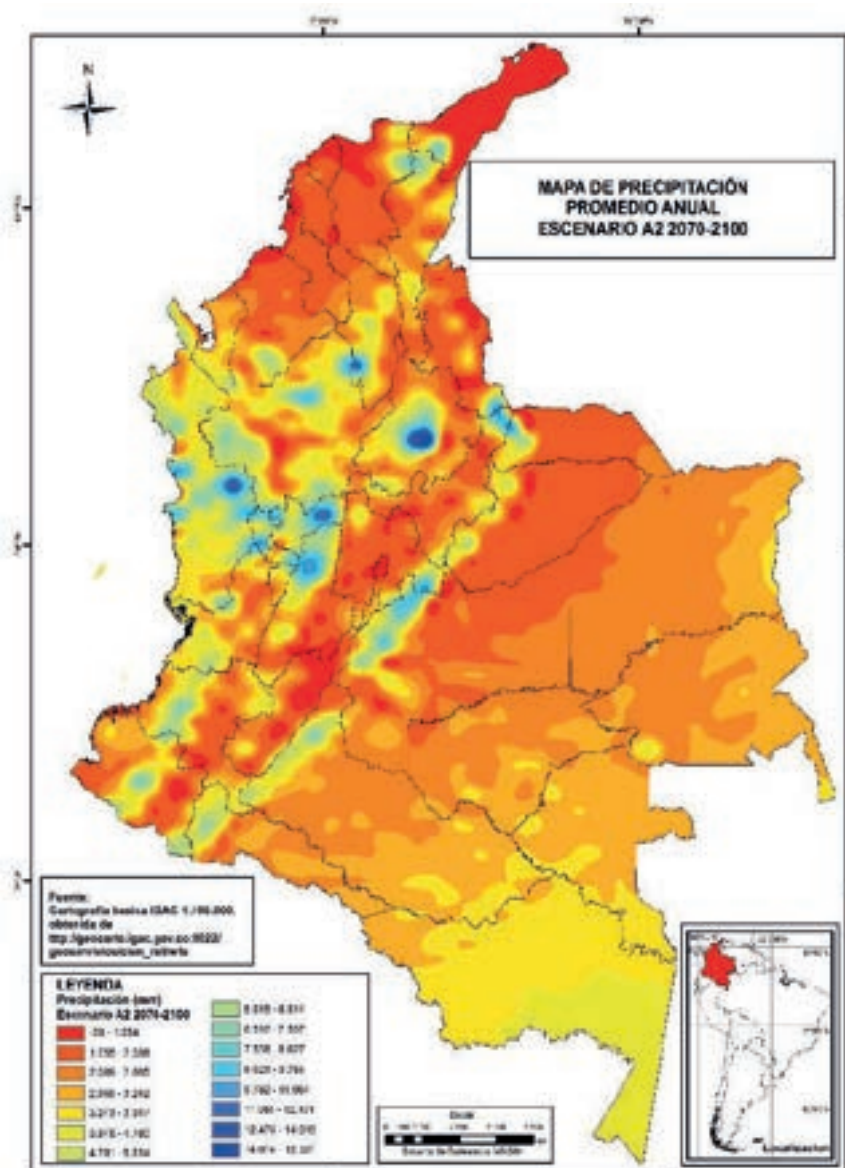


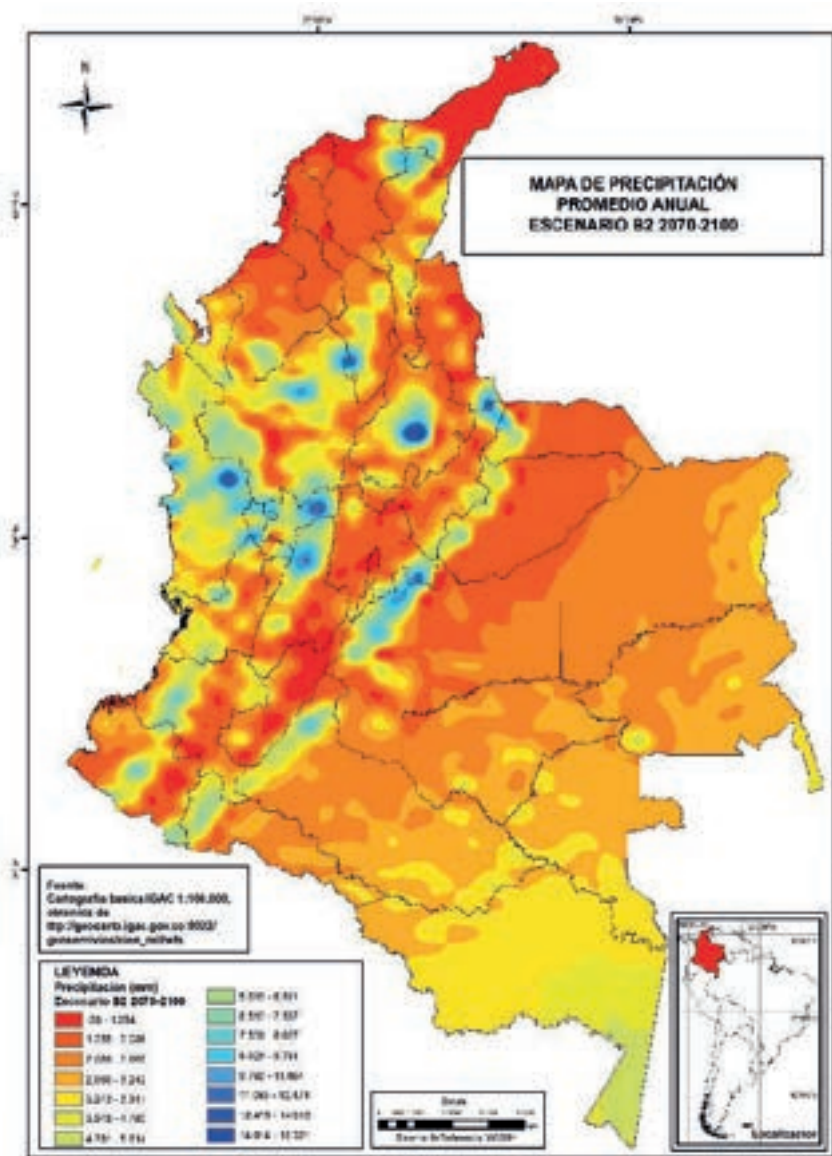


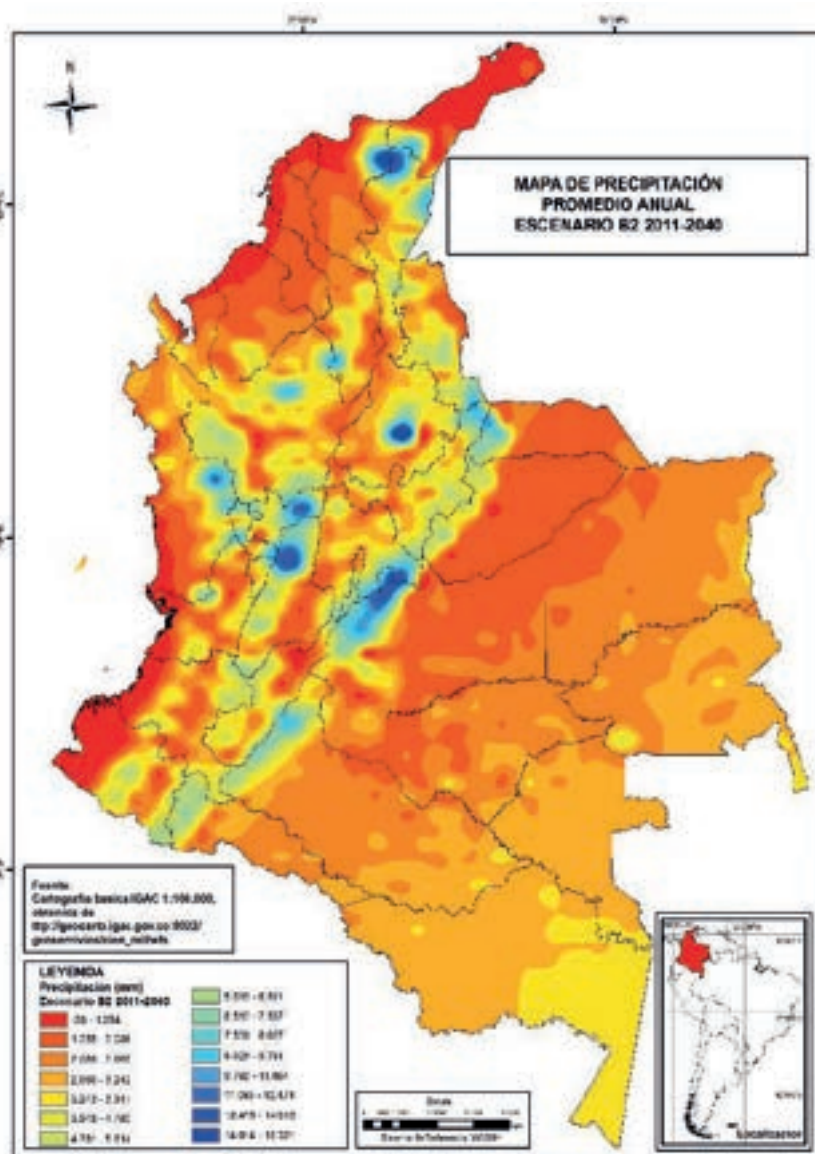






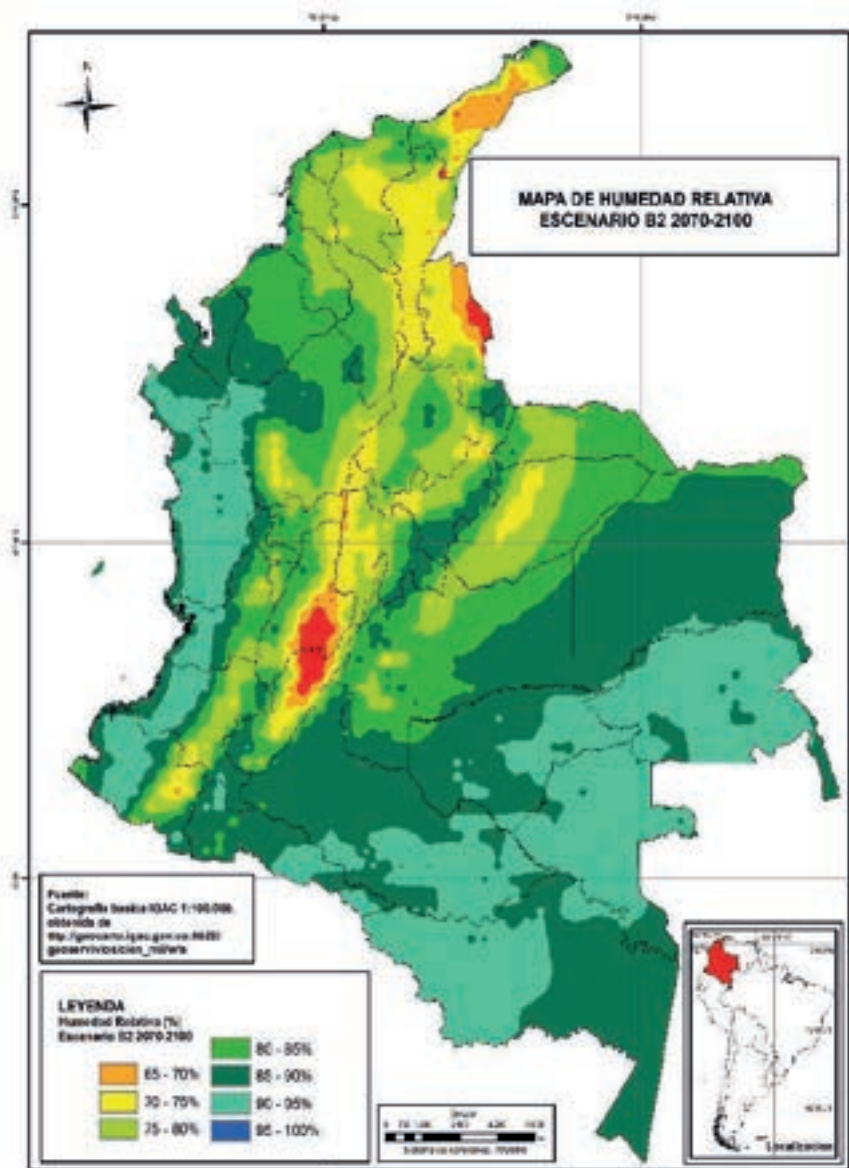


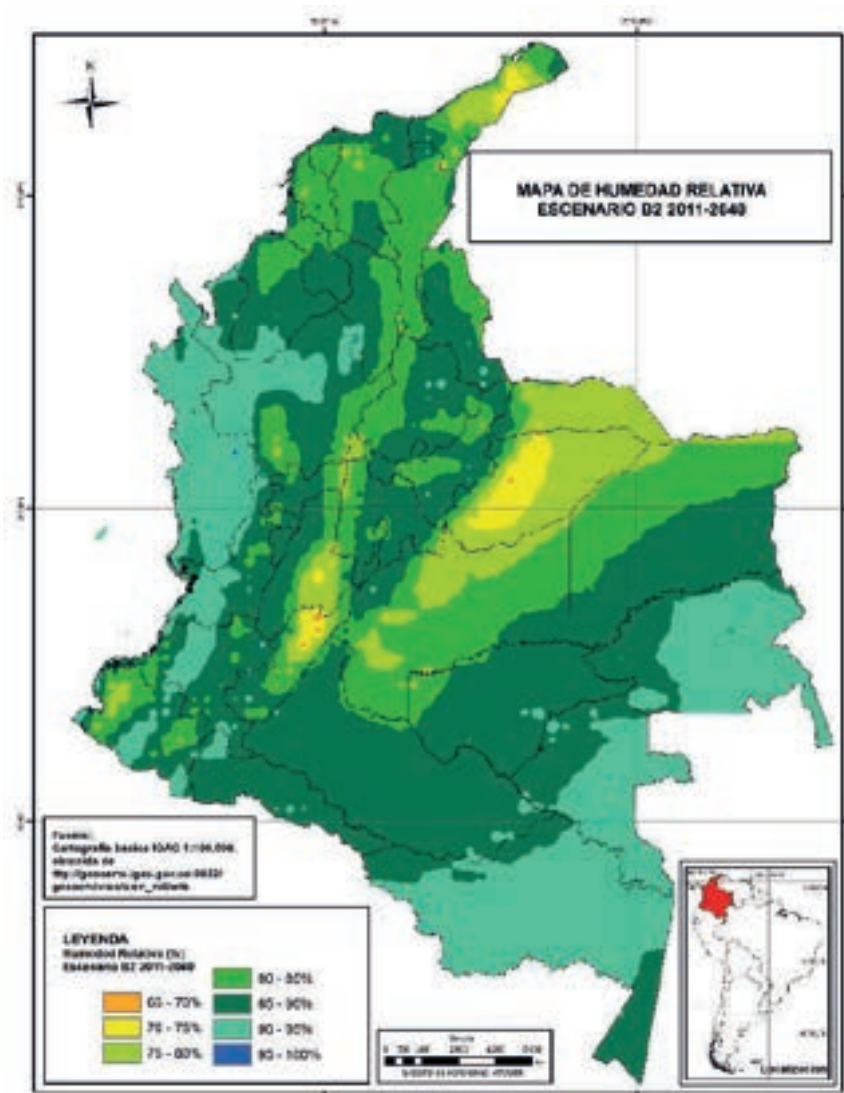


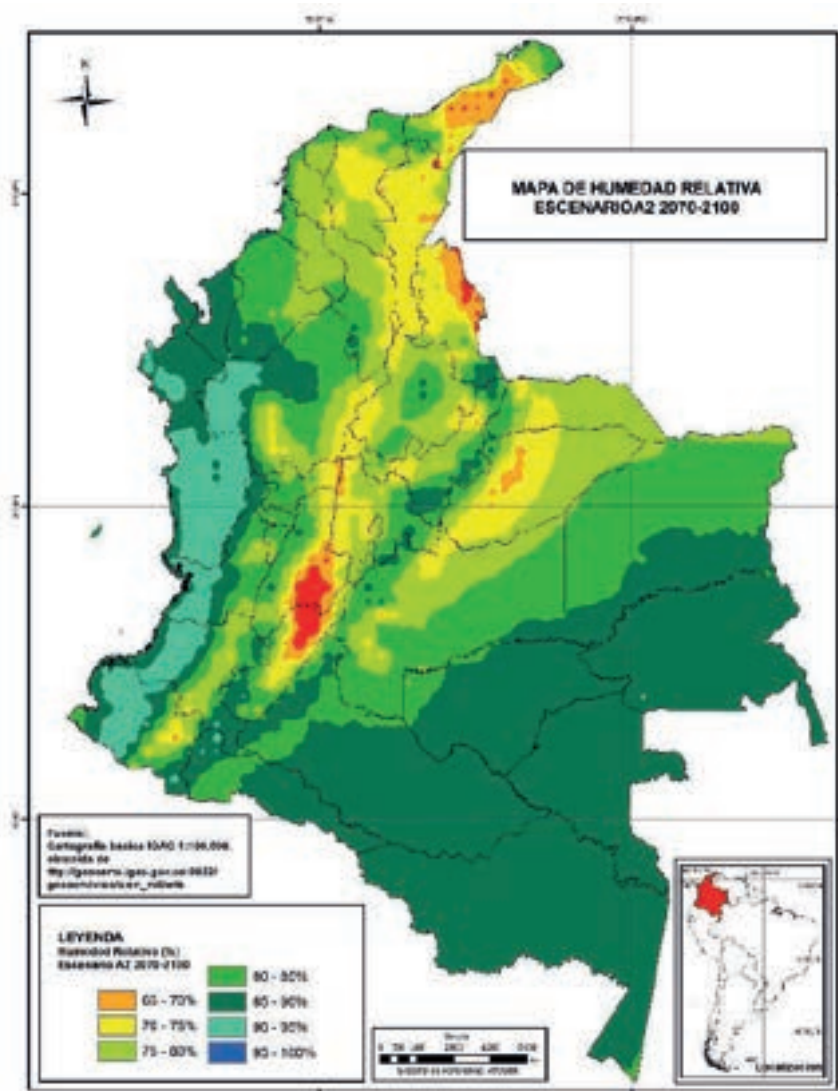




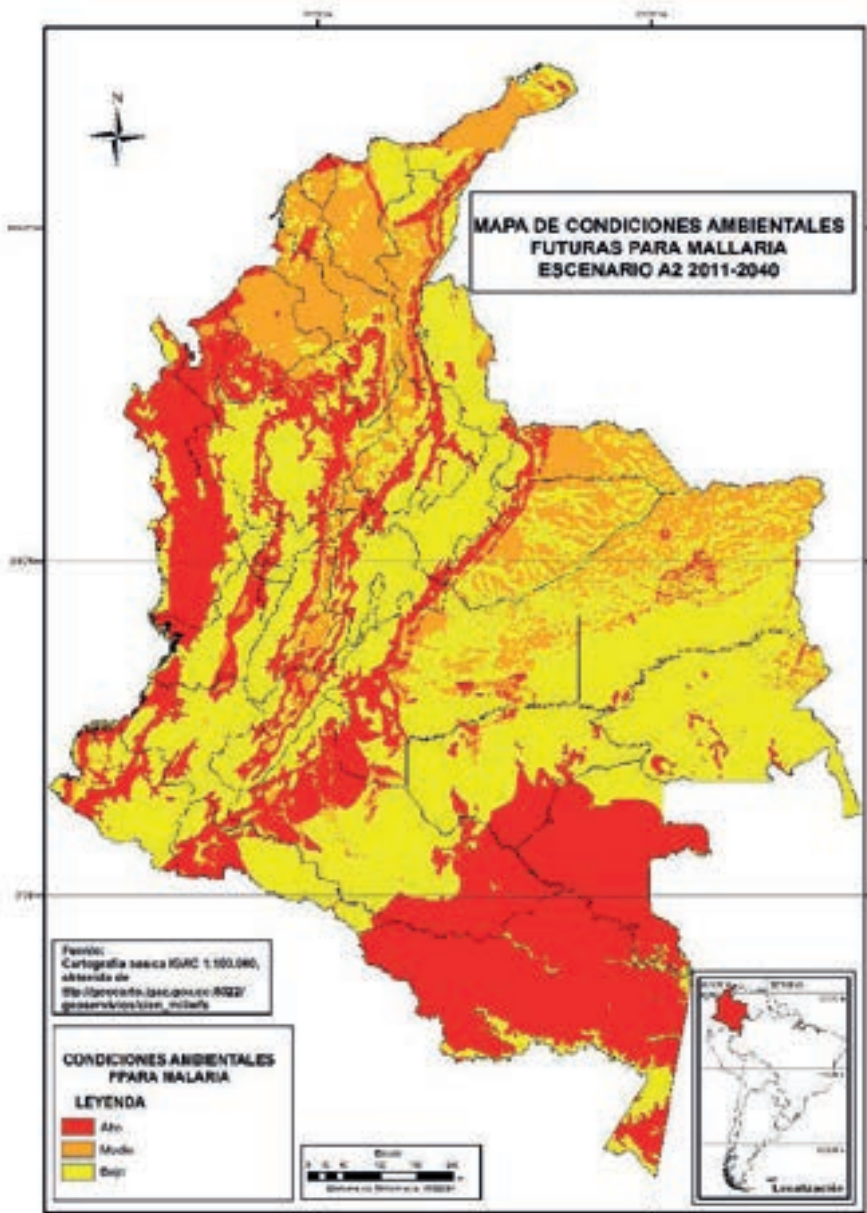




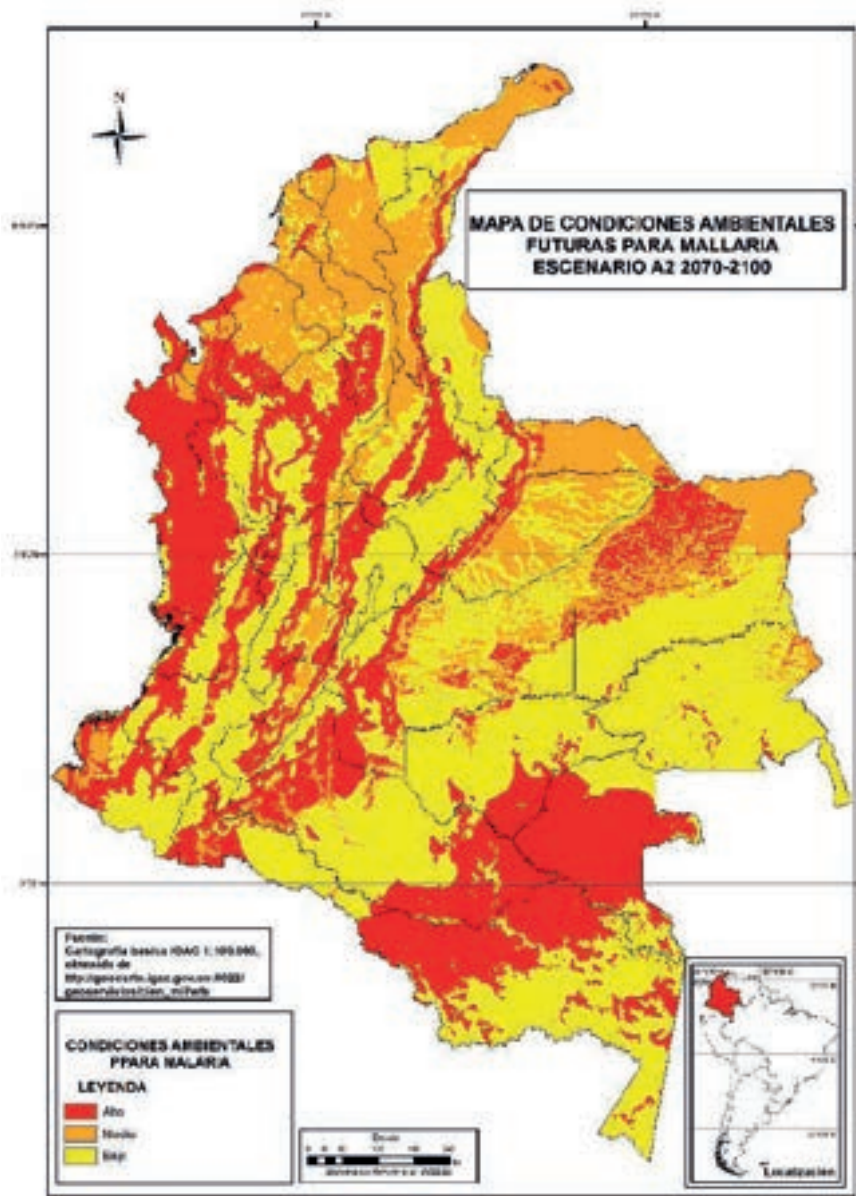




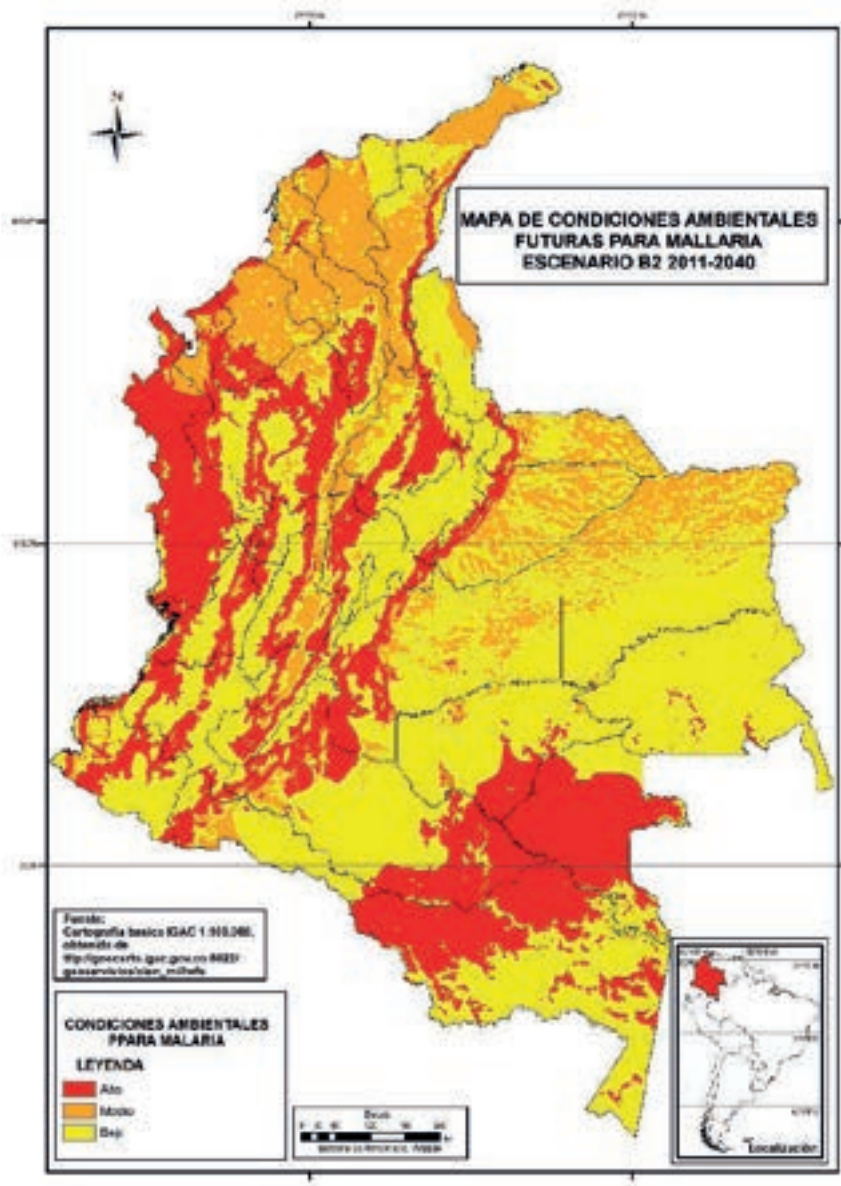
**Figura 6.** Distribución espacial de las condiciones ambientales futuras para malaria bajo el escenario A2, periodos 2011-2040 y 2070-2100

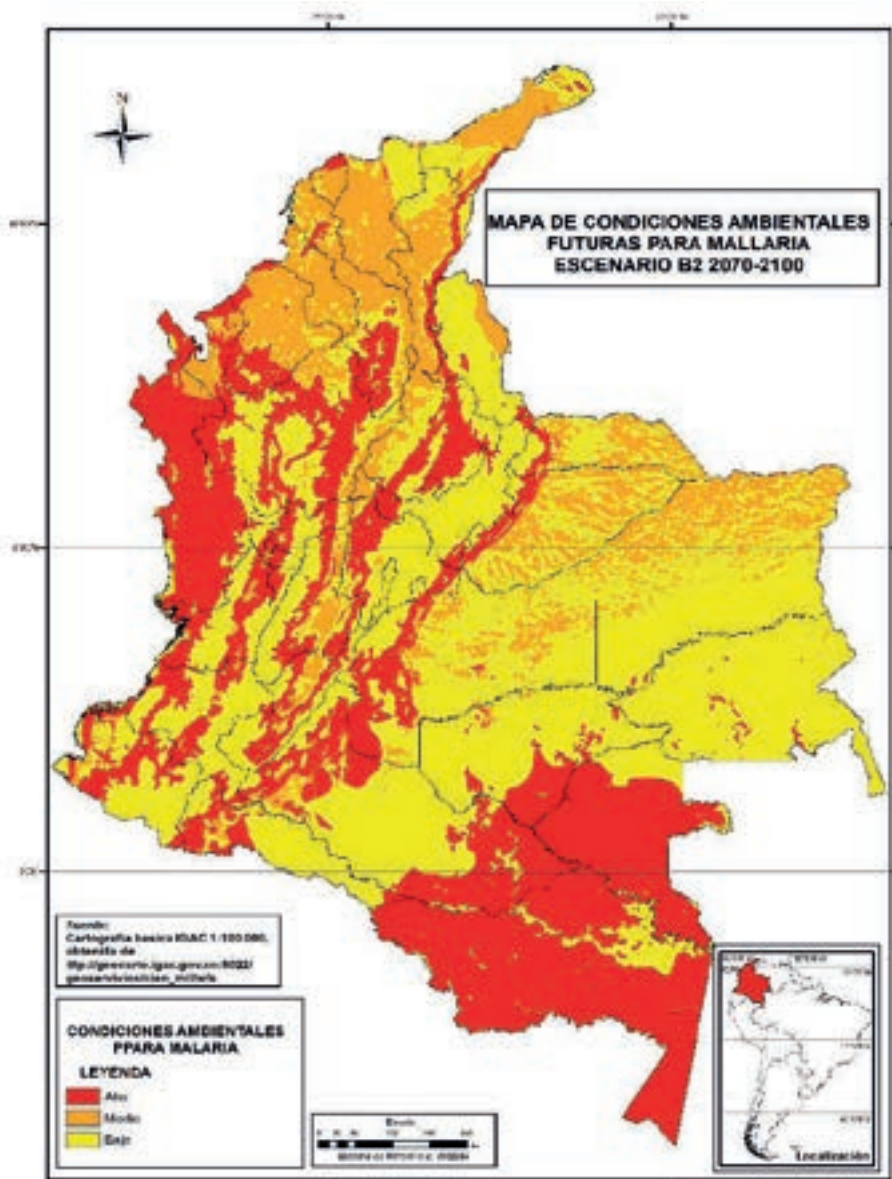






**Figura 7.** Distribución espacial de las condiciones ambientales futuras para la aparición de la malaria bajo el escenario B2, periodos 2011-2040 y 2070-2100







Se observa que el comportamiento de las nuevas áreas varía en función del escenario utilizado. Así, las áreas de ocupación de las nuevas condiciones se pueden resumir en la tabla siguiente.

**Tabla 2.** Porcentaje de ocupación de áreas ambientalmente potenciales para malaria

Unidad	Actual	A2 2011-2040	B2 2011-2040	A2 2070-2100	B2 2070-2100
Óptima	12%	45%	42%	41%	47%
Favorable	46%	23%	24%	28%	22%
No apta	42%	32%	34%	31%	31%
Total general	100%	100%	100%	100%	100%

Las condiciones óptimas se dan sobre todo en el escenario B2, con mayor superficie en este mismo escenario pero a mediados de siglo, localizándose principalmente en los departamentos de Vichada, Amazonas, piedemonte Caqueteño, Meta, occidente de Guainía, Urabá chocoano y antioqueño y los valles interandinos de los ríos Cauca y Magdalena. Las condiciones favorables tienden a reducirse a costa de las condiciones óptimas, presentándose su mayor expresión en el escenario A2 para finales de siglo, especialmente para los departamentos de Arauca, Casanare, Vichada, Sucre, Magdalena y La Guajira. En términos generales, se puede apreciar que las áreas ambientalmente potenciales para el vector están correlacionadas con el comportamiento de la temperatura. Desde el punto de vista del modelo, esta variable juega el papel más determinante en discernir las áreas ambientalmente óptimas al crear las condiciones para la viabilidad del ciclo de vida de los vectores y parásitos de la malaria. Todas estas regiones incluyen bosques húmedos tropicales, vegetación baja, sabanas, llanuras y valles aluviales, colinas bajas boscosas y áreas xerofíticas. Esta diversidad geográfica y ecológica influye fuertemente en la aparición de circunstancias ideales para el *Anopheles*, coincidiendo en gran medida con estructuras sociales, culturales y económicas precarias y propiciando condiciones endémicas y epidémicas para la transmisión de la malaria (Breilh, 1979; Castellanos, 1990).

## 4. Consideraciones finales

La información cartográfica para la construcción del índice geomorfológico y de vegetación se encuentra a escalas muy generales, situación que complica el uso de este tipo de modelos para describir el comportamiento espacial de la enfermedad. Por otro lado, el uso de los datos climatológicos de alta resolución mejora la resolución espacial de las zonas con condiciones ambientales aptas para el establecimiento de la enfermedad malárica, tanto en el presente como en el futuro.

La modelación de la localización geográfica óptima resultado de esta investigación coincide en gran medida con los reportes nacionales que evidencian algunos focos principales de reproducción, a saber:

1. *La región pacífica.* Cuenta con una temperatura promedio de 26°C y un nivel de precipitaciones muy alto (3 mil-10 mil mm); las condiciones ambientales son muy adecuadas para la transmisión de la malaria; es la responsable del 10 al 30% de los casos de malaria en Colombia en los últimos 50 años, con tan sólo una población del 5% del total del país. Según los escenarios, se proyectan dos focos muy importantes para esta región, uno localizado en la zona norte, en el Urabá y planicies inundables del río Atrato, y otra al sur, en el departamento de Nariño; es más intensa la situación para finales de siglo, en el escenario B2. En el 2008, la región pacífica representaba el 24% del total de casos de malaria. Ahora, con la explotación de oro y platino, las condiciones favorecerían la presencia de mosquitos (Carmona, 2004); además, los cultivos de peces característicos de estas zonas son fuente importante de reproducción de *Anopheles* en las periferias de los centros urbanos. Por otra parte, la industria maderera, la agricultura de subsistencia, la proliferación de cultivos ilícitos y los conflictos internos fuerzan desplazamientos de la población, lo que contribuye a la propagación de la malaria y la transmisión endémica de las epidemias en esta región (Padilla y Peña, 2002).
2. *La región Orinoquía.* Es la que presenta más superficie en condición favorable para la malaria. Las condiciones ecológicas (tierras bajas y considerables fuentes hídricas), una marcada degradación del medio ambiente, viviendas inadecuadas y el acceso limitado a servicios públicos y de salud popician los criaderos de los mosquitos. Sumado a esto, es una región que a partir de los años ochenta presentó una proliferación e intensificación de cultivos ilícitos, seguida por la migración de la población asociada a estas actividades.

3. *La región amazónica.* En los diferentes escenarios, esta región presentó un marcado aumento de condiciones favorables a condiciones óptimas para la malaria, siendo el escenario más fuerte el A2 para finales de siglo. Esta región está principalmente cubierta por selva tropical con relieve plano, condiciones climáticas favorables para el vector. Se caracteriza también por la transformación de cobertura natural, especialmente por cultivos ilícitos y minería. Su población se compone principalmente de grupos étnicos y un número limitado de inmigrantes colonos, que son los más afectados por la malaria. Sin embargo, debido a su gran extensión territorial y a la baja densidad poblacional, la magnitud del problema es relativamente menor en lo que respecta a la carga total de la enfermedad en el país: un total de 6 605 casos de malaria —el 5.7% del total— fueron reportados en esta zona (Sigivila, 2011).
4. *Región Caribe.* Según el modelo, ésta es la que mejores condiciones presenta para la enfermedad. Sus características climáticas la hacen una región principalmente favorable. Su vegetación mayormente transformada, relieve plano y depósitos constantes de agua favorecen los criaderos del mosquito. Los resultados más fuertes se dan el escenario A2 a finales de siglo.

## Referencias

- ARANGO, E., CARMONA-FONSECA, J. Y BLAIR, S. (2008). In vitro susceptibility of Colombian *Plasmodium falciparum* isolates to different antimalarial drugs. *Biomedica*, 2, 213-223.
- BREILH, J. (1979). *Epidemiología, economía, medicina y política*. Universidad Central, Quito.
- CARTER, K. (2009). *Report on situation of malaria in the Americas (2008)*. [new.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&task=view&id=2459&Itemid=2049](http://new.paho.org/hq/index.php?option=com_content&task=view&id=2459&Itemid=2049).
- CASTELLANOS, P.L. (1990). Sobre el concepto de salud enfermedad. Descripción y explicación de la situación de salud. *Bol Epidemiol. Ofic. Panam. Sanit*, 10, 1-74.
- CONFALONIERI, U., MENNE, B., AKHTAR, R., et al. (2007). Human health. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. En: M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Patutikof (eds), *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 391-431. Cambridge University Press.
- CRAIG, M.H., SNOW, R.W. Y LE SUEUR, D. (1999). A Climate-based Distribution Model of Malaria Transmission in Sub-Saharan Africa. *Parasitology Today*, 15, 105-111.
- GRILLET, M.E., MARTÍNEZ J.E. Y BARRERA, R. (2009). Focos calientes de transmisión de malaria: Implicaciones para un control orientado y efectivo en Venezuela. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 49, 193-208.
- HAY, S.I. Y SNOW, R.W. (2006). The Malaria Atlas Project: Developing Global Maps of Malaria Risk. *PLoS Med*, 3(12), 2204-2208.
- HIWAT, H. Y BRETAS, G. (2011). Ecology of *Anopheles darlingi* Root with respect to vector importance: a review. *Parasites & Vectors*, 4, 177.
- HÓDAR, J.A., ZAMORA, R. Y CAYUELA, L. (2012). Cambio climático y plagas: algo más que el clima. *Ecosistemas*, 21(3), 73-78.
- MEDINA, D., BEVILACQUA, M., CÁRDENAS, L., MORALES, L.G., RUBIO, Y., MARTÍNEZ, A. Y MAGRIS, M. (2011). Mapa de riesgo de transmisión de malaria en la cuenca del río Caura, Venezuela. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, L1(2), 129-144.
- OLANO, V.A., BROCHERO, H.L., SÁENZ, R., QUIÑONES, M.L. Y MOLINA J.A. (2001). Mapas preliminares de la distribución de especies de *Anopheles* vectores de malaria en Colombia. *Biomédica*, 21(4), 402-408.
- PABÓN, J.D. (2011). Los incendios de la cobertura vegetal en Colombia y su relación con la variabilidad climática y con el cambio climático. En: A.C. Parra Laria (ed), *Incendios de cobertura vegetal en Colombia. Tomo I*, pp. 145-165. Universidad Autónoma de Occidente-Red Colombiana de Formación Ambiental-Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- PABÓN, J.D. (2008). *Escenarios de cambio climático para 24 regiones de Colombia. Informe entregado a IDEAM*. Departamento de Geografía Universidad Nacional de Colombia.

- PADILLA, J. C., ÁLVAREZ, G., MONTOYA, R., CHAPARRO, A. Y HERRERA S. (2011) Epidemiology and control of malaria in Colombia. *Mem. Inst. Oswaldo Cruz*, 106, 114-122.
- PADILLA, J. Y PEÑA, S. (2002). *Situación de la malaria en Colombia en 2002. Informe epidemiológico*. Subdirección de Vigilancia/Instituto Nacional de Salud.
- POVEDA, G., QUIÑONES, M.L., VÉLEZ, I.D., ROJAS, W., RUA, G.L., RUIZ, C.D. Y HERNÁNDEZ O. (2008). *Desarrollo de un sistema de alerta temprana para malaria en Colombia*. Universidad Internacional de Andalucía.
- REAL, L.A. Y BIEK, B. (2007). Spatial dynamics and genetic of infectious diseases on heterogeneous landscapes. *J. R. Soc. Interface*, 4, 935-948.
- RINCÓN-ROMERO, M. Y LONDOÑO, J.E. (2009). Mapping malaria risk using environmental and anthropic variables. *Rev. Bras. Epidemiol*, 12, 338-54.
- RUBIO-PALIS, Y. Y ZIMMERMAN, R.H. (1997). Ecoregional classification of malaria vectors in the neotropics. *J. Med. Entomol*, 34, 499-510.
- SINA. (2007). *Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia*. SINA.
- SINGER, B.H. Y CASTRO, M.C. (2001). Agricultural colonization and malaria on the Amazon Frontier. *Ann. NY Acad. Sci*, 954, 184-222.
- SOUZA-SANTOS, R.V.G., DE OLIVEIRA, M., ESCOBAR, A.L., VENTURA SANTOS, R. Y COIMBRA, J.R.C. (2008). Spatial heterogeneity of malaria in Indian reserves of Southwestern Amazonia, Brazil. *Int. J. Health Geogr*, 7(55), 1-10.
- VITTOR, A.Y., PAN, W., GILMAN, R.H., TIELSCH, J., GLASS, G., SHIELDS, T. *et al.* (2009) Linking deforestation to malaria in the Amazon: characterization of the breeding habitat of the principal malaria vector, *Anopheles darlingi*. *Am. J. Trop. Med. Hyg*, 81, 5-12.

## Capítulo 10

# Adsorción de contaminantes emergentes del agua con nanomateriales

- Hasbleidy Palacios Hinestroza<sup>18</sup>
- José Alfredo García Alonso<sup>19</sup>
- Víctor Hugo Romero Arellano<sup>20</sup>
- Florentina Zurita Martínez<sup>21</sup>
- Jorge del Real<sup>22</sup>
- Belkis Coromoto Sulbarán Rangel<sup>23</sup>

## 1. Introducción

Recientemente, la presencia de sustancias biológicamente activas provenientes de las industrias agrícolas, farmacéuticas y de transporte, entre otras, han afectado el manto acuífero (Mohsen-Abdel y Paleologos, 2018; Martín *et al.*, 2018). Debido a sus características particulares de origen antropogénico, la mayoría de estas sustancias químicas emergentes son altamente solubles en agua y constantemente vertidas de diferentes formas, bien sea vía excreción, vertimiento directo porque se caducan, o en su proceso de fabricación. Lo anterior hace que cada vez el consumo de agua no contaminada sea más escaso para el ser humano y el medio ambiente acuático.

---

18 Maestra en Ciencias de Productos Forestales. Estudiante de doctorado en Agua y Energía. Universidad de Guadalajara. hasblephiz27@gmail.com

19 Ingeniero en Nanotecnología. Universidad de Guadalajara. corpi.metal@hotmail.com

20 Doctor en Ciencias. Profesor investigador. Universidad de Guadalajara. Victor.Romero@cutonala.udg.mx

21 Doctora en Ciencias. Profesor investigador. Universidad de Guadalajara. fzurita2001@yahoo.com

22 Doctor en Ciencias. Profesor investigador. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). jdelreal@ciatej.mx

23 Doctora en Ciencias de Materiales. Profesora investigadora. Universidad de Guadalajara. Belkis.sulbaran@academicos.udg.mx

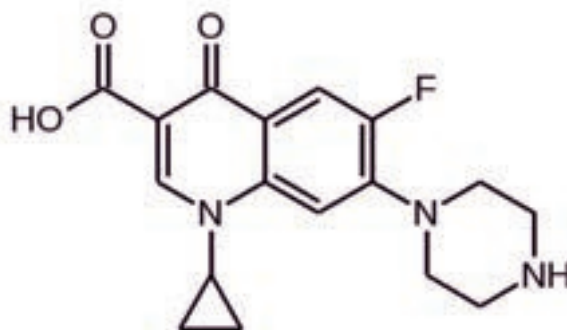
Los contaminantes emergentes se definen como aquellos no regulados procedentes de distintos orígenes y naturalezas químicas (Geissen *et al.*, 2015), los cuales se convierten en una amenaza potencial percibida para el medio ambiente y la salud humana. Entre ellos tenemos surfactantes, sulfonatos, productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal y doméstico, hormonas, aditivos alimenticios, nanomateriales artificiales, productos de veterinaria y drogas ilícitas (Mohsen-Abdel y Paleologos, 2018; Celic *et al.*, 2017; Thomaidis *et al.*, 2012; EPA, 2010). Según la literatura, recientemente muchos de estos contaminantes han sido detectados en diferentes fuentes de abastecimiento de aguas subterráneas e incluso en agua potable (Rivera-Utrilla *et al.*, 2013; Deblonde *et al.*, 2011; Rosal *et al.*, 2010).

Desafortunadamente, los sistemas convencionales de tratamiento de agua potable o residual no son capaces de eliminar estos contaminantes, lo cual hace que la concentración de éstos en los sistemas acuáticos sea cada vez mayor (Martín *et al.*, 2018). Aunado a lo anterior, en la actualidad la regulación sobre el vertimiento de contaminantes emergentes al ambiente es nula o escasa por la falta de investigaciones que reflejen los efectos de esta nueva generación de contaminantes (Gil *et al.*, 2012). Esto complica la predicción de los efectos de los contaminantes emergentes en la salud de los humanos, en los organismos acuáticos y en el ambiente debido a que no se tiene suficiente información de incidencia, contribución de riesgo y datos ecotoxicológicos (Rocha-Gutiérrez y Lee, 2012). Sin embargo, algunos autores aseguran que estos contaminantes son bioacumulables y biomagnificables, lo que significa que llegan a incrementarse en el medio u organismo portador a través del tiempo (Rocha-Gutiérrez *et al.*, 2015).

Entre los contaminantes emergentes reportados, los que generan mayor preocupación son los fármacos, especialmente los antibióticos, ya que, por su composición, estos metabolitos pueden llegar a penetrar las aguas subterráneas, además de quedar retenidos en los suelos (Haibo *et al.*, 2014). La adsorción es un método de bajo costo que permite la separación fisicoquímica de estos contaminantes por su buena selectividad, simplicidad y eficiencia, lo cual la convierte en una alternativa interesante (Martín *et al.*, 2018; Rivera-Utrilla *et al.*, 2013).

La adsorción sobre carbones activados es la más estudiada y conocida (Rigobello *et al.*, 2013). No obstante, recientemente el empleo de materiales de origen nanométrico, por ejemplo nanotubos de carbono, ha ganado interés en la eliminación de diferentes contaminantes presentes en el medio acuático (Haibo *et al.*, 2014). Por esta razón, y con el objetivo de conocer la capacidad de remoción, en esta investigación se realizaron experimentos de adsorción con materiales nanométricos para remover un contaminante emergente tipo anti-

**Figura 1.** Estructura química del contaminante ciprofloxacina



Fuente: Jiang, 2013

biótico (ciprofloxacina), ya que en los últimos años se ha reportado como uno difícil de eliminar por métodos convencionales.

## 2. Metodología

Para determinar el potencial de uso de nanomateriales en un sistema de purificación de agua, se utilizaron dos tipos de ellos: uno a base de nanofibras de celulosa, y otro a base de nanopartículas de óxido de silicio de tierras diatomitas. Se preparó un modelo simplificado de agua sintética con agua destilada (un litro) y un antibiótico comercial llamado “ciprofloxacina” (30 g). La ciprofloxacina es un contaminante emergente que se ha reportado en aguas para consumo. Es, además, un antibiótico del grupo de las fluoroquinolonas con efectos bactericidas.

Utilizando una espectroscopia UV-Vis, se analizó el agua sintética preparada y se realizó una curva de calibración de la solución de ciprofloxacina. La curva de calibrado se construyó midiendo la señal analítica de absorbancia en cada una de las disoluciones de ciprofloxacina, de 1 al 50%. En el eje de ordenadas, se asignó el valor de la señal medida, y en el eje de abscisas, la concentración de la disolución. Los nanomateriales fueron evaluados con la prueba de jarras, ampliamente usada para determinar la cantidad de adsorbente que debe ser adicionado para una floculación de las partículas coloidales contaminantes y, por ende, una sedimentación química de las mismas. Durante la prueba se dieron tres procesos importantes: adsorción, floculación y separación por sedimentación.



Las variables consideradas en el proceso fueron: el tiempo, la concentración, la velocidad de agitación y la cantidad de nanomaterial. Se hicieron medidas de UV-Vis del agua a una, dos, cinco y 12 horas para determinar si el contaminante era adsorbido. En este caso, el porcentaje de adsorción o la eficiencia de eliminación se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

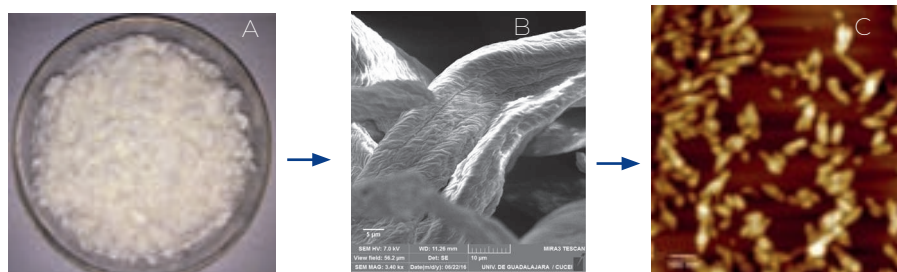
$$\text{Eficiencia de la adsorción} = [(C_i - C_t) / C_i] \times 100$$

Donde  $C_i$  y  $C_t$  son las concentraciones iniciales y en cualquier momento  $t$  (horas), respectivamente, expresadas en mg/l en CIP, empleando una espectroscopia UV-Vis. Todo el experimento se llevó a cabo por triplicado, y los datos que se muestran son promedios con cálculos de desviación estándar usando *Statistics and Machine Learning Toolbox* con MatLab versión 2015.

### 3. Resultados y discusión

En la siguiente se pueden apreciar imágenes de los nanomateriales de celulosa utilizados en el estudio tomadas con microscopio óptico, microscopio electrónico de barrido (SEM) y microscopio de fuerza atómico (AFM). En la micrografía 2A se observan como un material blanco, en la 2B se advierten las microfibrillas de celulosa y en la 2C, las nanofibras de celulosa con tamaños entre 50 y 100 nm de longitud.

**Figura 2.** Material de celulosa a diferentes escalas: A) vista escala macro de la celulosa, B) imágenes SEM de la celulosa escala 5  $\mu\text{m}$  y C) imágenes AFM de la nanocelulosa escala 100 nm

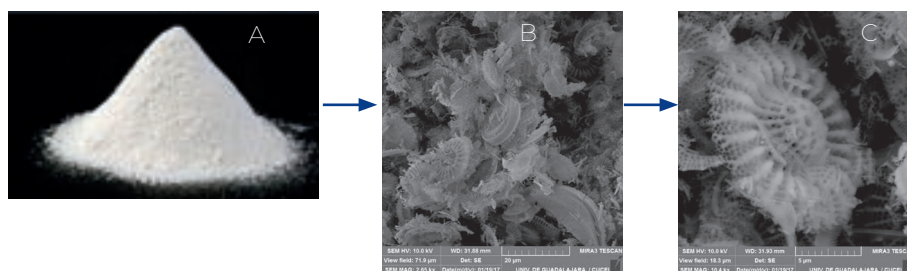


Fuente: elaboración propia.

Las nanopartículas de óxido de silicio son de origen natural y provienen de un yacimiento de tierras diatomitas. En la siguiente figura, a escala macro se observan como un polvo blanquecino. A medida que se disminuye la escala, como formas redondeadas con diámetros entre 15 a 20  $\mu\text{m}$ . Los poros presentes tienen el tamaño en el orden del nanómetro, entre 50 a 300 nm.

**Figura 3.** Material de óxido de silicio a diferentes escalas:

- A) vista escala macro, B) imágenes SEM de la diatomita a escala 20 $\mu\text{m}$  y C) imágenes SEM de la diatomita a escala 2 $\mu\text{m}$



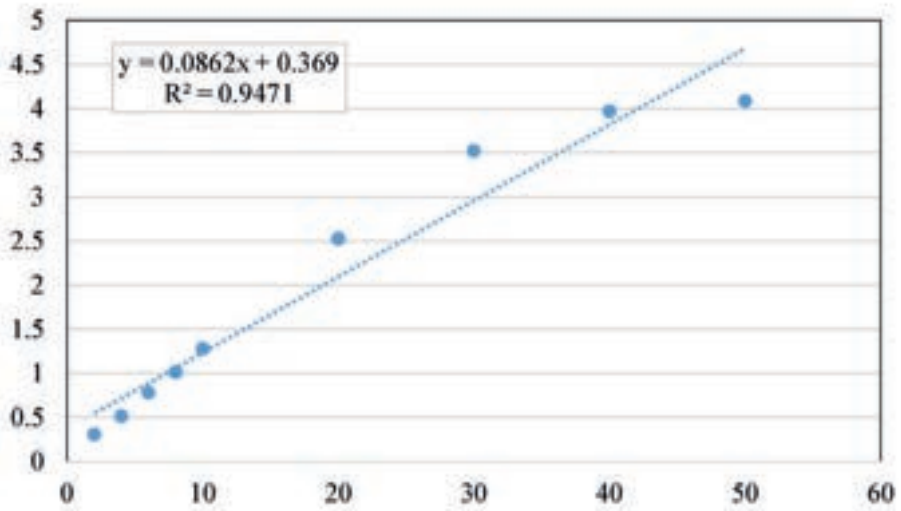
Fuente: elaboración propia.

El desempeño de los nanomateriales en un proceso adsorción de contaminantes emergentes fue posible realizando experimentos con agua sintética preparada con una concentración conocida de ciproflaxacina. Utilizando espectroscopia UV-Vis, se analizó el agua sintética y se realizó una curva de calibración de la solución de ciproflaxacina. La curva de calibrado se construyó midiendo la señal analítica de absorbancia en cada uno de las disoluciones de ciproflaxacina, de 1 al 50%. Tomando en cuenta la ecuación de la recta, se procedió a calcular las concentraciones del contaminante.

Los resultados revelaron una reducción en los niveles de ciproflaxacina en solución acuosa cuando se utilizaron diferentes tipos de nanomateriales como agentes adsorbentes. Las nanofibras de celulosa obtuvieron valores de adsorción de 21.95% a una hora, y 38.5% a 12 h. Fueron mucho menores al compararlos con las nanopartículas de óxido de silicio, que obtuvieron adsorción de 53.16% a una hora, y 72.55% a 12 h.

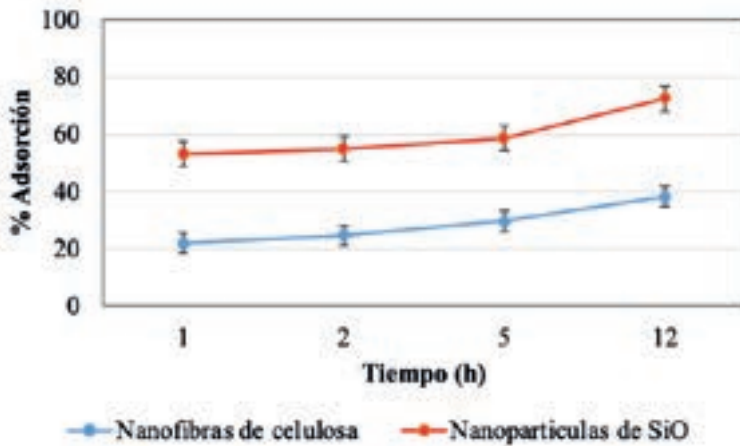
Si bien los nanomateriales fueron capaces de eliminar el fármaco de la solución acuosa, el mecanismo exacto del proceso no está del todo claro. Los autores

**Figura 4.** Curva de calibración de agua sintética preparada con ciprofloxacina



Fuente: elaboración propia.

**Figura 5.** Desempeño de los nanomateriales en la adsorción de ciprofloxacina



Fuente: elaboración propia.

lo atribuyen a la atracción de cargas superficiales. Las nanofibras de celulosa y las nanopartículas de óxido de silicio tienen carga negativa en su superficie, y la ciproflaxacina posee características zwitteriónicas a pH 6.1 y 8.7; es decir que según el pH se modifica su carga superficial. Estos cambios pueden afectar la eficiencia de la adsorción. Las moléculas de ciproflaxacina a pH 6.1 presentan protonación de sus grupos aminos, y a pH 8.6 se vuelve anión y pierde dicha protonación (Jiang, 2013).

Li (2011) y Jiang (2013) estudiaron el mecanismo de adsorción de ciproflaxacina en caolín y birnessita, respectivamente. La birnessita no tiene una estructura nanoporosa y su composición química es muy diferente a las analizadas en este estudio. La composición química del caolín es de SiO<sub>2</sub>; sin embargo, la diferencia con el nanomaterial estudiado es que el caolín no es nanoestructurado. La escala nanométrica de los materiales utilizados puede aumentar el área de contacto con la ciproflaxacina. Por lo tanto, la adsorción del contaminante es mayor en los nanomateriales estudiados que en el caolín y en la birnessita.

Los nanomateriales analizados en esta investigación tienen la ventaja, en comparación con otros materiales utilizados para eliminar contaminantes, de ser de origen biológico y de bajo costo. La mayoría de los métodos de adsorción utilizan materiales a base de carbono para atrapar moléculas contaminantes dentro de su estructura. La producción de carbón activado de alta calidad tiene un impacto ambiental significativo debido al uso de fuentes de energía no renovables, situación que lo coloca en desventaja en comparación con un nanomaterial fácilmente disponible en la naturaleza, como las nanofibras de celulosa o las nanopartículas de óxido de silicio.

#### 4. Consideraciones finales

El uso de nanomateriales como las nanofibras de celulosa y las nanopartículas de óxido de silicio provenientes de tierras diatomitas ofrecen una alternativa económica viable y eficiente para crear sistemas de tratamiento de agua mediante la adsorción de contaminantes farmacéuticos.

Los nanomateriales adsorbieron eficientemente la ciprofloxacina gracias a sus propiedades fisicoquímicas. Esto abre la posibilidad para el desarrollo de nuevas tecnologías, especialmente para su aplicación en la remediación de problemas ambientales. Los resultados mostrados son el comienzo de una línea de investigación que consiste en la mejora de los materiales biológicos nanoestructurales, como las tierras diatomitas y celulosa, para mejorar los procesos de tratamiento del agua.

## Referencias

- DEBLONDE, T., COSSU-LEGUILLE, C. Y HARTEMANN, P. (2011). Emerging pollutants in wastewater: A review of the literature. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 214, 442-448.
- EPA. (2010). *Emerging Contaminants-Nanomaterials*. United States Environmental Protection Agency.
- GIL, M.J., SOTO, A.M., USMA, J.I. Y GUTIÉRREZ, O.D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*, 7(2), 52-73.
- HAIBO, L., ZHANG, D., HAN, X. Y XINNG, B. (2014). Adsorption of antibiotic ciprofloxacin on carbon nanotubes: pH dependence and thermodynamics. *Chemosphere*, 95, 150-155.
- JIANG, W.T., CHANG, P.H., WANG, Y.S., TSAI, Y., JEAN, J.S., LI, Z. Y KRUKOWSKI, K. (2013). Removal of ciprofloxacin from water by birnessite. *Journal of Hazardous Materials*, 250-251(Supplement C), 362-369.
- LI, Z., HONG, H., LIAO, L., ACKLEY, C.J., SCHULZ, L.A., MACDONALD, R.A. Y EMARD, S.M. (2011). A mechanistic study of ciprofloxacin removal by kaolinite. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 88(1), 339-344.
- MARTÍN, J., ORTA, M., MEDINA, S., SANTOS, J., APARICIO I. Y ALONSO, E. (2018). Removal of priority and emerging pollutants from aqueous media by adsorption onto synthetic organo-funtionalized high-charge swelling micas, *Environmental Research*, 164, 488-494.
- MOHSEN-ABDEL, O.M. Y PALEOLOGOS, E. (2018). Emerging Pollutants: Fate, Pathways, and Bioavailability. en *Understanding Soil, Water, and Pollutant Interaction and Transport*, pp. 327-358. Butterworth-Heinemann.
- RIGOBELLO, E.S., DANTAS, A.D.B., DI BERNARDO, L. Y VIEIRA, E.M. (2013). Removal of diclofenac by conventional drinking water treatment processes and granular activated carbon filtration. *Chemosphere*, 92, 184-191.
- RIVERA-UTRILLA, J., SÁNCHEZ-POLO, M., FERRO-GARCÍA, M.Á., PRADOS-JOYA, G. Y OCAMPO-PÉREZ, R. (2013). Pharmaceuticals as emerging contaminants and their removal from water. A review. *Chemosphere*, 93, 1268-1287.
- ROCHA-GUTIÉRREZ, B. Y LEE, W.Y. (2012). Determination and comparison of polybrominated diphenyl ethers in primary, secondary, and tertiary wastewater treatment plants. *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 92, 1518-1531.
- ROCHA-GUTIÉRREZ, B., PERALTA-PÉREZ, M. Y ZAVALA-DÍAZ, F. (2015). Revisión global de los contaminantes emergentes PBDE y el caso particular de México. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 31(3), 311-320.
- ROSAL, R., RODRÍGUEZ, A., PERDIGON-MELON, J.A., PETRE, A., GARCÍA-CALVO, E., GÓMEZ, M.J., AGUERA, A. Y FERNÁNDEZ-ALBA, A.R. (2010). Occurrence of emerging pollutants in

urban wastewater and their removal through biological treatment followed by ozonation. *Water Res*, 44, 578-588.

THOMAIDIS, N.S., ASIMAKOPOULOS, A.G. Y BLETSON, A.A. (2012). Emerging contaminants: a tutorial mini-review. *Global NEST J*, 14(1), 72-79.



## Capítulo 11

# Oxidación química y supercrítica como alternativas puntuales de tratamiento de vertimientos urbanos generados en prácticas veterinarias

- Rosalina González Forero<sup>24</sup>
- Alejandra Guerrero<sup>25</sup>
- Liria Galeano<sup>26</sup>
- Paula Cárdenas<sup>27</sup>
- Andrea Landinez<sup>28</sup>

## 1. Introducción

Los residuos de medicamentos de uso veterinario y de hormonas vertidos en cuerpos de agua son un tema de interés emergente. Los sistemas urbanos de tratamiento convencionales no permiten remover estos residuos por su complejidad química o por los riesgos conllevan, por lo que contaminan los acuíferos, se acumulan en el ecosistema y muy posiblemente en los humanos a través de la cadena trófica (Agudelo, 2011). Dichos compuestos en su mayoría corresponden a materia orgánica asociada a otros elementos tóxicos tales como el cloro, los cuales son difícilmente removibles por métodos tradicionales (Gonzalez, 2015), lo que obliga a utilizar procesos de tratamiento avanzado como la fotooxidación y la oxidación supercrítica. La oxidación química o fotooxidación es un ejemplo de las tecnologías de procesos avanzados de oxidación capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. Glaze y Kang (1988) definen estos procesos como aquellos que involucran la generación y uso de especies oxidantes

---

24 Doctora en Ingeniería Civil, énfasis en Ingeniería Ambiental, Ingeniería Química. Docente investigadora. Universidad de la Salle. [rogonzalez@unisalle.edu.co](mailto:rogonzalez@unisalle.edu.co)

25 Ingeniera Ambiental y Sanitaria. Universidad de la Salle.

26 Ingeniera Ambiental y Sanitaria. Universidad de la Salle.

27 Ingeniera Ambiental y Sanitaria. Universidad de la Salle.

28 Ingeniera Ambiental y Sanitaria. Universidad de la Salle.

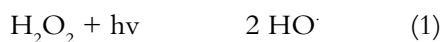


transitorias poderosas, principalmente el radical hidroxilo ( $\text{HO}\bullet$ ), que puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía, y posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica a través de la mineralización (destrucción) de los contaminantes orgánicos y oxidación de compuestos inorgánicos hasta dióxido de carbono e iones (cloruros, nitratos y otros). Entre las características de esta metodología se encuentran: reactividad con la inmensa mayoría de compuestos orgánicos; descomposición de los reactivos utilizados como oxidantes en productos inocuos, por lo que entra en la categoría de tecnología limpia; sistemas de tratamiento modulares, compactos y totalmente automatizables, que posibilitan operar tanto en continuo como en discontinuo; sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración, por ejemplo, partes por billón, y generalmente mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada. En este sentido, Gonzalez (2010) muestra que sustancias altamente tóxicas, como plaguicidas organoclorados y organofosforados, fueron removidas por esta técnica con eficiencias del orden del 94%. También se ha encontrado que cuando el agua alcanza una condición supercrítica de temperatura y presión (218 atm y 374°C), exhibe cualidades favorables para llevar a cabo reacciones de oxidación.

## 2. Procesos de fotooxidación

Los métodos de oxidación química para la degradación de contaminantes del agua más utilizados son los fotooxidativos. Estos proporcionan energía a los compuestos químicos en forma de radiación, que es absorbida por las moléculas para alcanzar estados excitados el tiempo necesario para experimentar reacciones de descomposición. La energía radiante ayuda a formar radicales libres, dando lugar a una serie de reacciones en cadena (Domènech *et al.*, 2004). La eficiencia de la destrucción fotoquímica de un determinado compuesto varía en función del diseño del reactor donde se lleven a cabo las reacciones, tipo de lámpara, geometría e hidrodinámica, entre otros factores.

**Sistema UV/peróxido ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).** El peróxido de hidrógeno es uno de los agentes oxidantes más comúnmente utilizados y, en conjunto con radiación UV, forma radicales hidroxilo, donde el enlace O-O se rompe por la acción de la luz según la siguiente reacción:



Se ha encontrado influencia de la concentración de  $H_2O_2$  en estos tratamientos, pues en casi todos los casos la velocidad de degradación del producto a eliminar aumenta con el incremento de la concentración hasta llegar a un valor óptimo para el cual la degradación del residuo es máxima (Gonzalez y Braun, 1996).

Según Moncada y Cubillos, (2006) las ventajas del sistema UV/ $H_2O_2$  son:

1. Es comercialmente muy accesible.
2. Es térmicamente estable y puede almacenarse en el sitio de trabajo.
3. Posee solubilidad infinita con el agua, no existen problemas de transferencia de masa asociados con gases, como en el caso del  $O_3$ .
4. Es fuente efectiva de  $HO$ .
5. La inversión de capital es mínima y la operación es muy simple.

### 3. Oxidación supercrítica

Cuando el agua alcanza condiciones por encima de su punto crítico (218 atm y  $374^{\circ}C$ ), se convierte en un medio de reacción asociado con la disminución de los puentes de hidrógeno. Teniendo en cuenta que los compuestos orgánicos a estas condiciones son completamente miscibles, es fácil que se lleven a cabo reacciones de oxidación en un medio a alta temperatura sin limitaciones de transferencia de masa interfacial (Sonntan, 2006). La oxidación en agua supercrítica tiene múltiples aplicaciones debido a las altas eficiencias de destrucción de componentes orgánicos difíciles de degradar por su conversión a dióxido de carbono (Doan, 2013 ) y, en el caso de mezclas o aguas residuales, por la desaparición de la DQO o COT (Philip, 2013).

## 4. Materiales y métodos

### 4.1 Reactivos

Se utilizaron los reactivos químicos formaldehído y peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) de grado comercial.

### 4.2 Muestras

En esta investigación se emplearon muestras de prácticas académicas del laboratorio de Histopatología de la Universidad de la Salle. Para ello se tomaron dos muestras de un litro, preservadas por refrigeración. También se preparó una que se denominó “sintética”, la cual se preparó con formol y agua al 3%, con el fin de tener un control en el proceso de oxidación. A ambas se les determinó

**Figura 1.** Toma de muestras en el laboratorio de Histopatología



Fuente: Proyecto de investigación.

la DQO, lo que arrojó valores de  $9\ 200\ \text{mg.L}^{-1}$  para la muestra del laboratorio y  $9100\ \text{mg.L}^{-1}$  para la sintética, con concentraciones de formol del 3%.

### 4.3 Pruebas de oxidación química

Se adaptó un reactor de seis litros de capacidad del laboratorio de Ingeniería Ambiental y, teniendo en cuenta el valor inicial obtenido de la DQO, se realizó una dilución para que este valor se redujera alrededor de  $500\ \text{mgL}^{-1}$  pues, según investigaciones previas, es el más recomendado para este tipo de técnica. Una vez preparada la dilución, se calculó el valor estequiométrico de  $\text{H}_2\text{O}_2$  a utilizar y, tomando un tiempo de reacción constante de dos horas para todos los ensayos, se procedió a encender el sistema hasta finalizar periodo establecido.

Al terminar el primer ensayo, y mediante varias repeticiones, se observó que el peróxido afectaba la lectura de DQO por interferencia química, y fue necesario delimitar la eficiencia del sistema mediante la determinación de formol a través de un método colorimétrico de detección con base en la reacción de éste con el ácido cromotrópico.

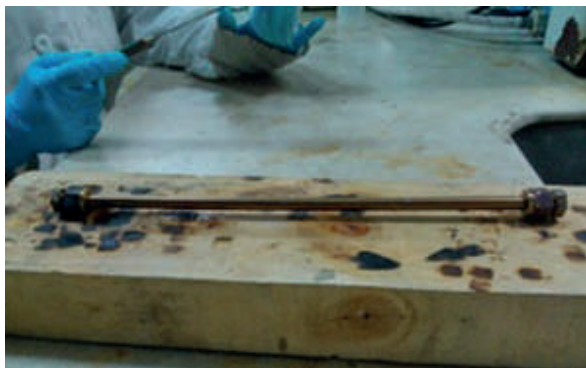
Continuamente, a la misma muestra se le fueron añadiendo volúmenes iguales de peróxido al inicialmente agredado. Con el fin determinar las condiciones

**Figura 2.** Reactor de oxidación química



Fuente: Proyecto de investigación.

**Figura 3.** Reactor de oxidación supercrítica



Fuente: Proyecto de investigación.

**Tabla 1.** Resultados obtenidos en la oxidación química del formol (1)

	Volumen del reactor (ml)	Tiempo de retención	Número de corrida	Dosis de peróxido (ml)
Muestra sintética	6 000	2 horas	Inicial	0
			1	5
			2	7
			3	9
			4	11
			5	13
Muestra real	6 000	2 horas	Inicial	0
			1	5
			2	7
			3	9
			4	11
			5	13
			6	15

Fuente: Proyecto de investigación.

óptimas del sistema, apenas terminaba el tiempo de retención se medía la concentración de formol hasta que éste hubiera desaparecido completamente.

#### 4.4 Pruebas de oxidación supercrítica

Para el desarrollo de estas pruebas, se construyó un reactor para trabajo a presión constante de 250 Ba, con una tubería de alta presión de ¼” marca Swagelok (0.635cm) de acero inoxidable y con un espesor de pared de 0.028” (0.071 cm).

Los ensayos consistieron en determinar tres variables: tiempo de reacción, temperatura y porcentaje en exceso de peróxido. El tiempo de reacción varió entre cinco y 20 minutos, la temperatura, entre 400 y 500°C, y el porcentaje en exceso de peróxido, entre 100 y 300%.

**Tabla 2.** Resultados obtenidos en la oxidación química del formol (2)

	Concentración inicial (mgL-1)	Concentración final (mgL-1)	Eficiencia
<b>Muestra sintética</b>	246.7	209.4	15.1
	209.4	182.4	26.0
	182.5	69.3	71.9
	69.3	66.6	73.0
	66.6	19.6	92.0
	19.6	-0.8	100.0
<b>Muestra real</b>	450.0	336.0	25.3
	336.0	301.0	98.5
	301.0	105.9	99.5
	105.9	39.3	99.8
	39.3	29.3	99.9
	29.3	1.5	100.0
	1.5	-25.0	100.0

Fuente: Proyecto de investigación.

## 5. Resultados y discusión

A continuación, se aprecian los resultados obtenidos por oxidación química.

De la tabla siguiente se puede apreciar que los resultados alcanzados son satisfactorios tanto para la muestra real como para la muestra sintética.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por oxidación supercrítica.

Al igual que la anterior, esta técnica presenta muy buenos resultados, pero con mucha menor cantidad que en oxidación química. Sin embargo, las temperaturas y presiones que se necesitan son muy elevadas y los costos energéticos asociados a las mismas deben cuantificarse para determinar cuál de ellas es la más adecuada.

**Tabla 3.** Resultados obtenidos en la oxidación supercrítica del formol (I)

Corrida		Datos del ensayo		
		Concentración inicial DQO (mg/l)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
A	4	9 200	20	500
B	9	9 200	12	450
C	3	9 200	20	400
D	2	9 200	5	500
E	5	9 200	5	400
F	10	9 200	12	450
G	1	9 200	5	400
H	7	9 200	20	400
I	11	9 200	12	450
J	8	9 200	20	500
K	5	9 200	5	400
L	8	9200	20	500
M	6	9 200	5	500
N	1	9 200	5	400
O	6	9200	5	500
P	12	9200	12	450
Q	4	9 200	20	500
R	3	9 200	20	400
S	2	9 200	5	500
T	7	9 200	20	400

Fuente: Proyecto de investigación.

**Tabla 4.** Resultados obtenidos en la oxidación supercrítica del formol (2)

Corrida		Datos del ensayo			
		Presión (bar)	Dosis de peróxido (%)	Concentración final DQO (mg/l)	Eficiencia
A	4	250	100	107	98.8
B	9		200	230	97.5
C	3		100	52	99.4
D	2		100	40	99.6
E	5		300	76	99.2
F	10		200	340	96.3
G	1		100	168	98.2
H	7		300	No se obtuvo muestra	-
I	11		200	147	98.4
J	8		300	16	99.8
K	5		300	84	99.1
L	8		300	155	98.3
M	6		300	84	99.1
N	1		100	287	96.9
O	6		300	50	99.5
P	12		200	210	97.7
Q	4		100	110	98.8
R	3		100	16	99.8
S	2		100	44	99.5
T	7		300	76	99.2

Fuente: Proyecto de investigación.



## 6. Consideraciones finales

Tanto la técnica de oxidación química como la de oxidación supercrítica pueden utilizarse efectivamente para remover vertimientos asociados a prácticas veterinarias que utilicen el formol en sus procesos de preservación de muestras, arrojando eficiencias que oscilan entre el 100 y el 99.6%.

Pese a que ambas técnicas son altamente efectivas, la de oxidación química implica diluciones de hasta máximo  $500 \text{ mgL}^{-1}$ , volúmenes de reacción del orden de varios litros y la utilización permanente de una lámpara UV, mientras que la oxidación supercrítica utiliza volúmenes muy pequeños sin dilución, aunque su inconveniente es la alta temperatura y presión a la que se debe llevar la muestra para su tratamiento.

La técnica de oxidación química emplea elementos mucho más económicos y menos sofisticados (y, por ende, menos técnicos) que la de oxidación supercrítica, pero la dilución forzosa obliga a unidades más grandes.

## Referencias

- AGUDELO, P. (2011). Caracterización del riesgo de contaminación por actividades pecuarias en el río Molinos, Villamaría (Caldas, Colombia). *Veterinaria y Zootecnia*, 6(2), 56-82.
- BLESA, M. (2001). *Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea en usos de óxidos semiconductores y materiales relacionados para aplicaciones ambientales y ópticas*. Comisión Nacional de Energía Atómica, Unidad de Actividad Química.
- CUBILLOS ALARCÓN, D.R. Y MONCADA FUENTES, J.E. (2006). *Evaluación a nivel de laboratorio de un sistema de remoción fotocatalítico de tensoactivos aniónicos*. (Tesis. Universidad de la Salle).
- GLAZE, W. Y KANG, J.W. (1988). Advance oxidation processes for treating groundwater contaminated with TCE and PCE. *Journal AWWA*, 80(5), 57-63.
- GONZALEZ, R. (2010). *Degradation of organochlorine and organophosphorous pesticides by Photocatalysis: Chlorpyrifos and Endosulfan case study*. Intech. doi: 10.5772/13543
- GONZALEZ, R. (2015). *Operaciones y procesos unitarios: agua para potabilización*. Ediciones Unisalle.
- GONZALEZ, M. Y BRAUN, Y. (1996). Vacuum UV photolysis of aqueous solutions of nitrate. Effect of organic matter II. Methanol. *Journal Photochemical Photobiology*, Vol 95, 67-72.
- DOAN, Z. (2013). Supercritical water oxidation of tannery sludge: stabilization of chromium and destruction of organics. *Chemosphere*, 93(7), 1413-1418.
- DOMÈNECH, X., JARDIM, W. Y LITTER, M. (2004). Procesos avanzados de oxidación para la remoción de contaminantes. En M. A. Blesa y B. Sánchez, B. (Eds), *Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea*. CIEMAT.
- PHILIP, M.A. (2013). Supercritical water oxidation, current status of full-scale, commercial activity for waste destruction. *Journal of supercritical fluids*, 79, 283-288.
- SONNTAN, R. (2006). *Introducción a la termodinámica para ingeniería*. Limusa Wiley.



## Capítulo 12

# Remoción de flúor en agua para consumo humano y su relación con la reducción de enfermedades asociadas

- Aída Lucía Fajardo Montiel<sup>29</sup>
- Rafael González Pérez<sup>30</sup>
- Hermes Ulises Ramírez Sánchez<sup>31</sup>
- Lourdes Graciela Cabrera Chavarría<sup>32</sup>
- Hugo Javier Coss y León Monterde<sup>33</sup>
- Mario Enrique García Guadalupe<sup>34</sup>
- Héctor Hugo Ulloa Godínez<sup>35</sup>

## 1. Introducción

El flúor es un elemento natural que es posible encontrar en la corteza terrestre. Sin embargo, al disolverse en depósitos de agua para consumo humano, puede representar riesgos a la salud si excede los límites máximos recomendados. De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, la concentración máxima permitida es de 1.5 mg/l. El suministro de agua en poblaciones rurales y urbanas dependen en gran medida de la explotación de aguas subterráneas pero, en muchos casos, su contenido de flúor es un problema para las comunidades. La concentración alta de este elemento en el agua potable es la causa más importante de fluorosis en la población humana. Se estima que más de 200 millones de personas en todo el mundo consume agua con alta concentración de flúor. En México, cinco millones de personas (alrededor del 6% de la población

---

29 Doctora en Ingeniería y Tecnología. Universidad de Guadalajara. lucia.fajardo@academicos.udg.mx.

30 Maestro en Ingeniería del Agua y la Energía. Universidad de Guadalajara. iq.rafa@gmail.com

31 Doctor en Ciencias Químicas. Profesor investigador. Universidad de Guadalajara. ramirez@astro.iam.udg.mx.

32 Maestra en Análisis de Sistemas Industriales. Universidad de Guadalajara. lulis.cabrera@gmail.com.

33 Maestro en Ciencias del Agua y la Energía. Universidad de Guadalajara. hjcm\_coss@hotmail.com.

34 Profesor investigador del Instituto de Astronomía y Meteorología. Universidad de Guadalajara.

35 Profesor investigador del Instituto de Astronomía y Meteorología. Universidad de Guadalajara.

total) se ven afectadas por la fluorosis. Los estados que presentan niveles de flúor en agua arriba de lo permitido por la Norma son: Aguascalientes, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Estado de México, Jalisco, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas (Vega, 2002).

Se realizaron muestreos y análisis de agua de pozos ubicados en el área del Palomar, en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, para la determinación de fluoruros presentes, cuyos resultados fueron de valores arriba del límite máximo permisible. Para determinar el mejor método para remover el flúor y controlar los otros dos parámetros fuera de rango, se llevaron a cabo pruebas de jarras utilizando diferentes reactivos que actúan como adsorbentes y coagulantes. Cabe señalar que durante las pruebas se ajustó el pH. Posterior a diferentes ensayos, se logró la remoción del flúor y se mantuvo por debajo de lo recomendado por la NOM-127-SSA1-1994. En este sentido, se procedió al diseño de una planta piloto para ser probada en la zona afectada, con la que se obtuvieron buenos resultados.

## 2. Marco teórico

La naturaleza química del agua es uno de los criterios más importantes que determina su utilidad para una necesidad específica. Como tal, no todas son aptas para beber, de ahí los problemas de escasez de agua potable. La presencia de fluoruro en cantidades que exceden los límites es un tema preocupante desde el punto de vista de la salud pública. Al igual que con cualquier otro contaminante, la contaminación con flúor puede ocurrir por razones tanto naturales como antropogénicas.

### 2.1 Efectos sobre la salud humana

Los efectos sobre la salud humana y animal de la ingesta del flúor han sido aceptados por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2002) en los criterios establecidos en el documento *Guías para la calidad de agua potable*. Por ejemplo, en concentración de 1 mg por litro, puede ayudar a prevenir caries dentales. Sin embargo, las concentraciones mayores de 3 mg por litro pueden resultar en fluorosis dental aguda a crónica, en la que el diente se vuelve de color amarillo a marrón; la fluorosis esquelética, que causa debilidad, y la flexión de los huesos.

Es evidente, a partir de la información disponible, que una cierta cantidad de flúor es esencial para la formación de esmalte dental resistente a caries y para el proceso normal de mineralización en tejidos duros. El elemento se metaboliza a partir de compuestos electrovalentes y covalentes. Las bajas concentraciones de fluoruro estabilizan los sistemas esqueléticos al aumentar el tamaño de los

cristales de apatita y reducir su solubilidad. Alrededor del 95% del flúor en el cuerpo se deposita en los tejidos duros y continúa depositándose en estructuras calcificadas incluso después de que otros constituyentes óseos (Ca, P, Mg, CO<sub>3</sub> y citrato) hayan alcanzado un estado estable. La edad es un factor importante para decidir en qué medida el flúor se incorpora al esqueleto. La absorción casi cesa en el esmalte dental después de la edad de aproximadamente treinta años.

La concentración de flúor en aguas subterráneas ha sido ampliamente estudiada. Existen casos especiales de concentraciones de hasta 38.5 mg/l en algunas regiones de la India. Los minerales de flúor más comunes en la corteza terrestre son la fluorita y la apatita. Las rocas ígneas y volcánicas tienen una concentración de flúor que varía desde 100 ppm hasta >1000 ppm.

El hecho de que el problema asociado con el exceso de flúor en el agua potable sea altamente endémico y generalizado en países como India llevó a muchos investigadores a explorar un buen número de materiales orgánicos e inorgánicos que adoptan varios procesos desde la coagulación, precipitación por adsorción, intercambio iónico, entre otros.

En las últimas décadas, la toxicidad de fluoruro asumió proporciones globales. Ahora se reconoce como un riesgo para la salud generalizado y tiende a convertirse en un problema de salud endémico en al menos 25 naciones de África, Asia y norte y sur de América, donde la concentración de fluoruro de agua subterránea está en el rango de 3.6-177 ppm.

El flúor es un elemento altamente reactivo que se combina con otros elementos mediante enlaces covalentes e iónicos. Se encuentra principalmente en rocas alcalinas y suelos alcalinos, siendo la fluorita el componente principal. Las fuentes naturales están asociadas a las condiciones geológicas de un área. Varias rocas tienen minerales que contienen flúor, como apatita, fluorita, biotita y hornablenda. La meteorización de estas rocas y la infiltración de la lluvia a través de ellas aumenta la concentración de flúor en las aguas subterráneas. La lixiviación del flúor de la corteza terrestre es la principal fuente de contenido de este elemento en las aguas subterráneas; sin embargo, las otras fuentes, como los alimentos, también se agregan para aumentar su ingesta total en el cuerpo humano.

La fluorosis es una condición clínica caracterizada por un exceso ingestión de flúor a través del agua, los alimentos y el aire, y es un problema de salud grave. Causa toxicidad y manifestaciones sistémicas que pueden ser incapacitantes. El flúor ingerido con agua continúa acumulándose en los huesos hasta la edad de 55 años. En altas dosis, puede interferir con los carbohidratos, la proteína de los lípidos, las vitaminas, las enzimas y el metabolismo mineral. También altera la

homeostasis de la glucosa y conduce a la intolerancia a la glucosa, que indica una asociación entre la ingesta crónica de flúor y el metabolismo de carbohidratos. De igual manera, altera la secreción y/o síntesis de proteínas e interfiere con las vías de señalización. Varios informes indicaron que las dietas y los suplementos son beneficiosos en cierta medida para superar la toxicidad inducida por fluoruro.

La intoxicación por fluorosis también puede desarrollarse a partir de la ingesta crónica de fluoruro de sodio como terapia de larga duración para la osteoporosis, el uso de ollas revestidas con teflón, mascar tabaco y el uso excesivo de ácido níflúmico (fármaco antiinflamatorio no esteroideo). La absorción de flúor en el cuerpo se puede reducir tomando sales de calcio o magnesio. Por el contrario, el fosfato, los sulfatos y el molibdeno aumentan su absorción gastrointestinal y conducen a la toxicidad. Hasta el 99% del flúor absorbido se combina con los huesos mineralizados, principalmente en los dientes, la pelvis y las vértebras.

El flúor está involucrado en una serie de reacciones enzimáticas. En tejidos mineralizados y biomateriales, sus iones aumentan su estabilidad al disminuir la solubilidad de su hidroxapatita fase mineral.

Dado que la ingestión de alto contenido de flúor tiene un efecto a largo plazo en la salud humana, es esencial controlar su concentración en el agua subterránea utilizada para beber periódicamente, y tomar medidas para llevarla dentro del rango permisible. Para ello, existen varios métodos disponibles *in situ* o *ex situ*. Para diluir el agua subterránea contaminada con flúor se pueden construir estructuras de recarga artificial en lugares adecuados que disminuirán su concentración.

Como se ha mencionado, el flúor no sólo presenta efectos negativos para la salud humana. Se requiere de él para la mineralización del hueso y los dientes, el mantenimiento de la fertilidad, la hematopoyesis y la activación de ciertas enzimas, como la adenilato ciclasa, las fosfatasa ácidas y alcalinas y la isocitrato deshidrogenasa. Los estudios *in vitro* sugieren que ayuda a las actividades de la histona metiltransferasa, estabiliza la interacción entre la guanosina trifosfatasa (GTPasa) y las proteínas activadoras de la GTPasa, y afecta el ensamblaje postraducciona l de las cadenas de glicosaminoglicanos en las células óseas mineralizantes.

Es ampliamente aceptado que un bajo nivel de ingesta de flúor disminuye la susceptibilidad a la caries dental en los seres humanos. Su acción anticaries está mediada por su incorporación al esmalte dental como flúor (hidroxil) apatita, que tiene altos niveles de flúor, bajos niveles de carbonato y alta resistencia a

los ácidos. Además, puede inhibir el metabolismo bacteriano de los carbohidratos, por lo tanto, disminuye la producción de ácidos. Hace algunas décadas, el uso de pasta dental fluorada para la prevención de la caries dental era una gran moda, pero pronto se volvió obsoleto debido a los informes crecientes de efectos nocivos sobre la salud oral, como la aparición de dermatitis perioral. La ingesta diaria de 1-3 mg flúor/kg de peso corporal tiene un efecto potencial sobre la prevención de la caries dental en un corto periodo; sin embargo, la ingesta prolongada de dosis iguales puede tener efectos perjudiciales para la salud. Anteriormente, también se usaba en el tratamiento de la osteoporosis, aunque se sabía que el margen terapéutico era estrecho. Algunos investigadores incluso informaron un mayor riesgo de fractura en mujeres osteoporóticas tratadas con flúor. Por lo tanto, actualmente no se usa para la prevención y el tratamiento de la osteofluorosis.

La toxicidad aguda por flúor es causada por la exposición a grandes dosis de compuestos de fluoruro inorgánico altamente solubles, como el fluoruro de sodio, el fluoruro de hidrógeno gaseoso o el ácido fluorhídrico. En la intoxicación aguda, casi todos los sistemas de órganos se ven afectados. Los signos clínicos son en su mayoría inespecíficos y se parecen a los envenenamientos causados por otros irritantes gastrointestinales como el arsénico, el mercurio, el bario y el ácido oxálico (Martínez *et al.*, 2016). Las manifestaciones en humanos incluyen vómitos (a veces manchados de sangre), dolor abdominal espasmódico difuso, diarrea, cianosis, debilidad severa, disnea, espasmo muscular, paresia y parálisis, trastornos cardiovasculares, convulsiones y coma que terminan en muerte (WHO, 1984). La dosis mínima para producir efectos adversos para la salud en humanos es de aproximadamente 5 mg de fluoruro/kg de peso corporal, y la letal mínima en adultos varía entre 32 y 64 mg de fluoruro/kg de peso corporal (Whitford, 1996).

## 2.2 Mecanismos de intoxicación y eliminación en seres humanos

Después de la absorción desde el tracto gastrointestinal, el tracto respiratorio o la piel y la membrana mucosa, el flúor llega a los diferentes órganos y tejidos del cuerpo a través de la circulación sanguínea. Después de la ingesta oral, el fluoruro no absorbido se excreta mediante las heces, y del 50 al 70% del absorbido sale por la orina, la transpiración, la saliva, la leche y el huevo (en las aves) y el resto se retiene en el cuerpo. Los tejidos calcificados, principalmente los huesos y los dientes, actúan como un sumidero natural para el flúor y contienen alrededor del 99% de su carga corporal total. Su acumulación en los tejidos blandos



es muy baja, y los riñones tienen la mayor concentración. La placenta parece proteger al feto de sus efectos tóxicos, como es evidente por el bajo paso de fluoruro transplacentario en muchas especies animales. El líquido cefalorraquídeo normal contiene una concentración de fluoruro muy baja, pero aumenta marginalmente durante la toxicidad crónica.

El flúor liberado en el aire por los volcanes y las actividades industriales existe tanto en forma gaseosa como en partículas. Las formas gaseosas comunes incluyen ácido fluorhídrico (HF), tetrafluoruro de silicio ( $\text{SiF}_4$ ), tetrafluoruro de carbono ( $\text{CF}_4$ ) y hexafluorosilicato ( $\text{H}_2\text{SiF}_6$ ). Por otro lado, el fluoruro de sodio (NaF), el fluoruro de aluminio ( $\text{AlF}_3$ ), el fluorosilicato de calcio ( $\text{CaSiF}_6$ ), el espato flúor ( $\text{CaF}_2$ ) y la criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) son sus formas comunes emitidas por las industrias. Las erupciones volcánicas son las principales fuentes naturales de fluoruro en el aire en muchas partes del mundo, siendo HF la principal forma gaseosa liberada. La liberación mundial anual de HF a partir de fuentes volcánicas oscila entre 60 y 6 000 kt, de las cuales aproximadamente el 10% puede introducirse directamente en la estratosfera. Otros compuestos de flúor (como  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  y  $\text{F}_2$ ) también están presentes en los gases volcánicos. Estos compuestos de fluoruro gaseosos y particulados, dependiendo de su solubilidad y tamaño de partícula, pueden ser absorbidos parcial o completamente a través del tracto respiratorio (WHO, 2002). HF tiene alta solubilidad en agua y se absorbe rápidamente en el tracto respiratorio superior. Los compuestos de flúor particulados se depositan en la nasofaringe, el árbol traqueobronquial y los alvéolos, y su absorción depende de su solubilidad en agua y del tamaño de partícula. Las partículas más grandes pueden escupirse y llegar al tracto gastrointestinal, donde se absorben o se excretan en las heces. En un estudio en ratas, la exposición controlada a HF (8.7 mg HF/m<sup>3</sup> en el aire durante 2 h/día durante seis meses) no tuvo efectos evidentes en la apariencia, el comportamiento o el aumento de peso, pero dio como resultado la acumulación de flúor en el cabello, hueso y dientes (Stolarska *et al.*, 2000). La absorción de flúor del tracto respiratorio puede tener cierta importancia en los animales que viven en áreas cercanas a las industrias que emiten fluoruro gaseoso.

El tracto respiratorio parece ser una ruta importante de captación de flúor en los trabajadores de las fábricas, donde la exposición ocupacional prolongada a concentraciones moderadamente altas en el aire ambiente puede causar fluorosis dental y osteoarticular. Sin embargo, para los animales herbívoros que viven en áreas donde el aire está contaminado con compuestos de flúor particulados o gaseosos, no es la única ruta de absorción. La mayoría de las emisiones de flúor en el aire contaminan el suelo, el agua y la vegetación a una gran dis-

tancia de la fuente de emisión (Radostits *et al.*, 2000). Las plantas forrajeras y las hierbas cultivadas en áreas contaminadas pueden acumular una gran cantidad de flúor. Por lo tanto, las altas concentraciones en el forraje y los pastos que crecen en las proximidades de las emisiones industriales de flúor son bastante comunes (Swarup y Dwivedi, 2002), lo que puede contribuir significativamente a la carga total de flúor en los herbívoros que viven en dichas áreas. El gas de flúor es extremadamente irritante y causa irritación nasal y ocular (incluso en niveles bajos) y la muerte después de la inhalación debido a edema pulmonar (en niveles altos). Del mismo modo, la inhalación aguda de HF después de las salpicaduras faciales con ácido fluorhídrico puede causar ulceración bronquiolar, hemorragia/edema pulmonar y la muerte. El daño renal y hepático también ocurre en animales tras la exposición al exceso de flúor o gas de alta frecuencia (ATSDR, 2003), lo que sugiere una absorción sustancial a través del tracto respiratorio.

La exposición dérmica de ácido fluorhídrico puede causar daños a la piel y las membranas mucosas por irritación (picazón o sensación de ardor) y quemaduras. La gravedad está directamente relacionada con la concentración y la duración de la exposición. Cuando el ácido fluorhídrico se aplica directamente sobre la piel, se absorbe rápidamente a través de la epidermis y causa un daño extenso y una mayor concentración de flúor en la circulación sistémica (ATSDR, 2003). La absorción dérmica de otros compuestos de flúor, particularmente aquellos que ocurren en estado sólido, son quizás muy bajos. La ruta dérmica de absorción no parece jugar un papel significativo en la toxicidad crónica en los vertebrados. El efecto de esta deposición no se conoce claramente. Los estudios sobre la acumulación en los tejidos corporales y sus efectos tóxicos en peces y otros invertebrados son numerosos, pero faltan datos sobre la contribución relativa del tracto dérmico, gastrointestinal y otras rutas de absorción.

Independientemente de la ruta de exposición, el fluoruro absorbido llega a la circulación sanguínea, que actúa como un medio de transporte hacia diferentes partes del cuerpo. El flúor en la sangre existe en dos formas: fluoruros orgánicos e inorgánicos. El inorgánico sólo es importante desde un punto de vista toxicológico, ya que es la única forma activa. Los valores de flúor total en plasma sanguíneo tienen poco interés biológico porque no se conoce la conversión de formas orgánicas a inorgánicas (Venkateswarlu, 1975). En sangre, aproximadamente el 75% de fluoruro inorgánico permanece en plasma, alrededor del 5% se une con proteínas plasmáticas y el resto está presente en o sobre los eritrocitos. Fuera del fluoruro inorgánico total en plasma, del 15 al 70% permanece en forma iónica (Singer y Armstrong, 1964).

La forma iónica no se difunde a través de las membranas celulares, sino que ocurre como HF que está en un estado no iónico. En el humano, al menos el 50% del flúor total en suero está en forma no iónica, pero éste puede predominar tras su consumo excesivo (Swarup y Dwivedi, 2002).

En los seres humanos, el flúor pasa libremente a través de la placenta cuando su concentración en la sangre materna es baja, pero la placenta regula su transferencia y protege al feto cuando la concentración es alta (Mohanty *et al.*, 2011). Este mecanismo es tal vez un proceso pasivo, y el feto está protegido por la mayor parte del espacio líquido materno, el rápido aclaramiento, la lenta difusión de fluoruro placentario y la calcificación ectópica de la placenta. El efecto de la variación en los tipos placentarios en el transporte transplacentario de flúor en diferentes especies animales no está claro hasta el momento. La ausencia de lesiones fluoróticas congénitas en la mayoría de las especies animales sugiere que, a pesar de las diferencias en la estructura y el mecanismo de transporte de minerales, todos los tipos de placenta proporcionan cierta protección.

Algunos estudios en animales de laboratorio y humanos sugieren que la concentración de flúor en el cabello puede servir como una manera discreta para determinar la carga corporal total de este elemento. La concentración en el cabello de las personas que no están expuestas a una alta absorción fluctúa entre 1.81 y 2.32 ppm, y puede llegar a 5 460 ppm en aquellas expuestas ocupacionalmente a la contaminación por flúor. La concentración en recortes de uñas en humanos también puede servir como un biomarcador, aunque sólo refleja el consumo de flúor de unos 3 a 6 meses antes.

El fluoruro no absorbido del tracto gastrointestinal se elimina a través de las heces, mientras que una parte presente en la circulación sistémica se excreta a través de diferentes rutas. Una vez que se reduce la absorción, el fluoruro depositado en el hueso comienza a movilizarse lentamente y se excreta en la orina y las heces. En casi todos los mamíferos, el riñón juega un papel clave en este sentido. Otras rutas de eliminación y excreción incluyen saliva, leche y sudoración.

La excreción urinaria de flúor es un proceso dependiente del pH. El aclaramiento renal de flúor es mayor con la orina alcalina. Sin embargo, su eliminación extrarrenal sigue siendo insignificante durante la producción de orina alcalina. El grado de reabsorción está inversamente relacionado con el pH del fluido tubular, por lo que la excreción urinaria se correlaciona estrechamente con el pH urinario (Jarnberg *et al.*, 1981). Con un pH urinario de 5.0, la relación entre el aclaramiento de flúor y la tasa de filtración glomerular puede ser tan baja como del 5%, y puede exceder el 65% con un pH urinario de 6.5. Alrededor del 35–45% del fluoruro filtrado se reabsorbe en los túbulos renales

proximales, independientemente del pH urinario final, aunque en la acidosis, la mayoría de la reabsorción ocurre en la nefrona distal. El daño renal reduce significativamente la eliminación urinaria

Una fracción del fluoruro ingerido que no se absorbe en el tracto gastrointestinal se excreta en las heces. La eliminación fecal de flúor depende de varios factores, como la solubilidad de los compuestos de flúor, la presencia de cationes divalentes, la concentración de otros componentes de la dieta (grasa, fibra, proteínas) y la edad y estado fisiológico. La solubilidad del fluoruro ingerido aparece como el determinante principal que regula su excreción fecal y urinaria.

En los humanos, la concentración promedio de fluoruro salival es de aproximadamente el 75% de la concentración plasmática, y varía dentro del rango de 0.01-0.06 ppm en individuos no expuestos al exceso de dicho elemento. La concentración puede aumentar 10 veces su valor de referencia cuando una persona consume compuestos solubles de flúor en la dieta. Se estima que menos del 1% del fluoruro ingerido se excreta en la saliva humana. Se supone que el fluoruro salival juega un papel importante en la prevención de la caries dental en los seres humanos.

La concentración de flúor en la transpiración en humanos es aproximadamente del 20% de los niveles plasmáticos. Puede servir como una ruta importante de excreción en humanos que trabajan duro en climas cálidos y húmedos. Un estudio reveló que alrededor del 13-38% del fluoruro ingerido se puede excretar en la transpiración en condiciones de alta temperatura y humedad (Henschler *et al.*, 1975).

### 3. Metodología

Existen diversos métodos para reducir la concentración de flúor en agua e incluso su eliminación. Algunos de ellos no alcanzan los límites máximos permitidos, por lo que el objetivo de este trabajo es identificarlos y seleccionar el más factible para beneficiar a la población del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.

Con base en la experiencia, hay cuatro sustancias indicadas para la eliminación de fluoruro: magnesio, alumbre, fosfato tricálcico, cal y resinas aniónicas.

#### 3.1 Método con magnesio

El contenido del fluoruro se reduce cuando el magnesio se encuentra en concentración suficiente, pues el hidróxido de magnesio lo absorbe. Sin embargo, se necesita una proporción de 23 mg/l de magnesio para reducir el fluoruro de 1.5 mg/l hasta el valor deseado de 1.0 mg/l, y se requieren 146 mg/l de magnesio para una reducción de fluoruro de 3.5 mg/l a 1.0 mg/l. Puesto que el

contenido de magnesio de las aguas naturales raramente excede los 50 mg/l, es preciso agregar sulfato de magnesio cuando se trata de reducir concentraciones más altas de fluoruro.

Debido a que muchas aguas naturales contienen magnesio, y puesto que en algunas fluoruradas el contenido de magnesio puede ser suficiente para reducir el contenido de fluoruro en cantidad sustancial aun sin la adicción artificial de un compuesto magnésico, este método puede resultar ventajoso.

Cuando la concentración de magnesio en el agua que debe tratarse es menor a la que se necesita para reducir la concentración de fluoruro al máximo, podrá añadirse magnesio de otro origen, como la magnesita calcinada o la cal dolomítica, que es más barata.

Este método no sólo tiene la ventaja de hacer de la eliminación del fluoruro un subproducto gratuito de la eliminación de la dureza, sino que extrae también la sílice.

### 3.2 Método con alumbre

En algunos lugares se han obtenido buenos resultados al utilizar alumbre como tratamiento. Sin embargo, en aguas naturales con fluoruro de sodio resultó muy poco eficaz debido a que el catión de calcio o magnesio asociado con el ión de flúor en el agua afecta enormemente la totalidad de su eliminación por flóculos de alumbre. Por lo tanto, este método no puede aplicarse en muchas aguas naturales.

### 3.3 Método del fosfato tricálcico

La remoción del fluoruro se logra con la regeneración del fosfato tricálcico mediante un tratamiento con solución de hidróxido sódico al 1%, seguido de un lavado con ácido clorhídrico diluido para neutralizar el exceso alcalino, pudiéndose sustituir éste último por dióxido de carbono.

En la planta de Climax, estado Colorado, este método ha mostrado resultados satisfactorios. En la ciudad de Britton, estado de Dakota del Sur, se utiliza el fosfato tricálcico juntamente con un tanque a presión. También se han obtenido buenos resultados, pero tiene la desventaja de que el tratamiento no puede observarse.

### 3.4 Método de ablandamiento por cal

En la ciudad de Mount Sterling, estado de Ohio, la concentración de fluoruro en el agua cruda se redujo de 1.7 mg/l a 0.95 mg/l por ablandamiento con cal

y sosa con pH de 10.1, al mismo tiempo que unos 27 mg/l de magnesio del agua cruda se precipitaron.

### 3.5 Ósmosis inversa

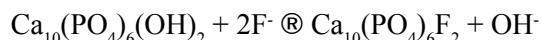
Este método sólo se aplica a nivel industrial en procesos específicos, ya que el costo del tratamiento es muy elevado.

Este proceso es la separación de iones y aniones del agua, que consiste en un equipo de dos celdas separadas con una membrana porosa que deja pasar el agua y no los iones. Se ejerce una presión en la celda del lado de la solución más concentrada de iones, venciendo su presión osmótica, la cual existe cuando hay una diferencia de concentración de iones en las soluciones tratando de alcanzar el equilibrio entre la solución menos concentrada a la otra, diluyéndola.

### 3.6 Intercambio iónico

En el mercado, existen resinas aniónicas para la remoción de fluoruros. Se dividen en tres grupos: 1) grupo de cambio polar: amino primario, débilmente básico; 2) grupo de cambio polar: nitrógeno cuaternario, fuertemente básico, tipo 1, y 3) grupo de cambio polar: nitrógeno cuaternario, fuertemente básico, tipo 2. Estas resinas se regeneran con sosa cáustica.

Existe zeolitas naturales, específicas para el intercambio iónico del flúor, como lo es la hidroxiapatita, que se encuentra en los huesos. Su preparación se hace removiendo grasas y proteínas, triturando, estabilizando con sosa y sales, purificando y cribando a 0.25 a 0.60 mm de tamaño efectivo. La regeneración de la zeolita es también con sosa acústica.



La hidroxiapatita también se prepara a partir de la apatita o apatito, que es un mineral formando microcristales (en las rocas eruptivas y pizarras cristalinas) y fenocristalinas (en las pizarras talcosas y cloritosas). Es quebradizo y fosforescente al calor, su peso específico es de 2.9 a 3.2 y su dureza de 5 en escala de Mohs adimensional. Sus cristales prismáticos poseen colores diversos, como rojo, verde o violeta.

## 4. Resultados y discusión

El agua obtenida de los pozos del municipio de Tlajomulco de Zúñiga tiene en promedio 2.20 mg/l de flúor como  $\text{F}^-$ , valor que está por arriba de los límites máximos permitidos por la Norma para consumo humano, lo cual indica que

la población que se abastece de ellos está en riesgo de padecer fluorosis. Shen *et al.* (1989) realizaron experimentos de solubilidad de fluorita y de calcita, y demostraron que el contenido de fluoruros en el agua subterránea se presenta en un ambiente ácido. Con base en lo anterior, se realizaron diferentes configuraciones de pruebas de jarras, con resultados satisfactorios con valores por debajo de los que refiere la NOM-127-SSA1-1994.

Una vez realizado el análisis de las tecnologías existentes, se estableció la técnica de adsorción con mezcla de sulfato de aluminio (método alumbre) y óxidos de calcio y magnesio (método de ablandamiento).

Los valores de los análisis de laboratorio para la caracterización del agua de pozo se muestran a continuación:

**Tabla 1.** Caracterización de agua cruda

Parámetro	Unidad	Valor
pH	s/u	7.06
Conductividad	µmho/cm	247
Sólidos disueltos totales	mg/l	147
Temperatura	°C	22.6
Turbiedad	UTN	2.31
Color aparente	Pt-Co	14
Cloruros	mg/l	13.9
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	26
Aluminio	mg/l	0.001
Manganeso	mg/l	0.003
Hierro	mg/l	0.137
Nitrato (N)	mg/l	8.7
Nitritos (N)	mg/l	0.008
Nitrógeno amoniacal	mg/l	0.01
Sulfatos	mg/l	25
Flúor	mg/l	2.22

Fuente: Reporte de Laboratorio acreditado ante la EMA, Apoyo Técnico Industrial SA de CV.

Se observa que la concentración de flúor se encuentra arriba del límite máximo permisible establecido por la modificación a la NOM-127-SSA1-2000.

Se realizaron pruebas de jarra y se analizaron pH y concentración de flúor en agua filtrada con Whatman grado 40, con retención de partículas mayores a 8 µm y velocidad de filtración (Herzberg) de 340 s.

Se utilizó un equipo de pruebas de jarras de dos litros, marca Phipps and Bird, para establecer los gradientes de velocidad y los tiempos agitación.

**Tabla 2.** Valores de agitación y tiempos en prueba de jarras

Fase	Agitación (rev/s)	Tiempo (s)
Mezcla rápida	100	1
Coagulación	50	50
Floculación	10	20
Sedimentación	0	20

Fuente: Reporte de Laboratorio, Equipos para Filtración de Occidente Sa de CV.

Se prepararon soluciones de 5 mg/l de CaO y 5 mg/l de MgO.

**Tabla 3.** Dosificación de productos químicos y resultados

Prueba	CaO (mg/l)	MgO (mg/l)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/l)	NaOH (mg/l)	pH agua filtrada (mg/l)	Flúor agua filtrada (mg/l)
1	10	10	450	3	7.21	1.62
2	10	10	450	1.3	6.64	1.75
3	37.5	37.5	450	1.5	6.68	1.73
4	45	45	450	5	8.15	1.93
5	60	30	600	3	7.53	1.76
6	60	30	750	3	7.4	1.27
7	60	30	750	3	6.75	1.24
8	60	30	750	2	6.40	1.14
9	60	30	720	2	6.6	1.25
10	60	30	700	2	6.65	1.30

Fuente: Reporte de Laboratorio, Equipos para Filtración de Occidente Sa de CV.



## 5. Consideraciones finales

El sulfato de aluminio necesario para la coagulación consume alcalinidad y baja el pH. Se requiere ajustar el pH con NaOH, además de la dosificación de CaO.

La prueba número 10 con valor de 1.30 mg/l de flúor es la dosificación óptima.

Se puede emplear la prueba de jarra número 2 con la adición del proceso de filtración posterior con carbón de activado de hueso para remover el 0.25 mg/l excedente.

Debido a la concentración de flúor en agua cruda, existe riesgo de morbilidad de fluorosis por sobreexposición en seres humanos. Se vuelve importante ampliar la difusión en materia de salud pública para poblaciones que se encuentran expuestas ante este problema.

Si bien es cierto que algunos síntomas de sobreexposición en seres humanos han sido estudiados, la literatura aún discute sobre los efectos positivos y negativos en la salud humana. En este documento se han identificado los mecanismos de entrada al cuerpo humano y los principales de eliminación. Existe otro tipo de literatura que aborda cómo favorecer la eliminación de flúor en el cuerpo humano a través de tratamiento médico y nutricional.

## Referencias

- ATSDR. (2003). *Toxicological profile for fluorides, hydrogen fluoride, and fluorine*. Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- HENSCHLER, D., BUTTNER, W. Y PATZ, J. (1975). *Absorption, distribution in body fluid and bioavailability*. Conferencia. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-80875-3\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-80875-3_18)
- JARNBERG, P.O., EKSTRAND, J. Y IRESTEDT, L. (1981) Renal fluoride excretion and plasma fluoride levels during and after enflurane anaesthesia are dependent on urinary pH. *Anaesthesiology*, 54, 48-52.
- MARTÍNEZ, A.M., MERCADO R.M., ALEGRÍA, T.J. Y MEJÍA, S.J. (2016). Preliminary human health risk assessment of arsenic and fluoride in tap water from Zacatecas, México. *Environmental Monitoring and Assessment*. 188(8), 1-13.
- MOHANTY, M.G.S, VYAKARANAM, S., BHONGIR, S. Y RAO, A.V.P. (2011). Transplacental transport of fluoride, calcium and magnesium. *Nat J Integr Res Med*, 2, 51-55.
- NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- RADOSTITS, O.M., GAY, C.C., BLOOD, D.C. Y HINCHCLIFF, K.W. (2000). *Veterinary medicine, a textbook of the diseases of cattle, sheep, pigs, goats and horses*, 9th edn. WB Saunders Company Ltd.
- SHEN, Z., M. ZHOU Y M. TANG. (1989). *The characteristics of fluorine in groundwater of North China and the significance of fluorite-water interaction to fluorine transportation*. Water-Rock Interaction, Ed. Balkema.
- SINGER, L. Y ARMSTRONG, W.D. (1964). Regulation of plasma fluoride in rats. *Proc Soc Exp Biol Med*, 117, 686-689.
- STOLARSKA, K., CZARNOWSKI, W., URBANSKA, B. Y KRECHNIAK, J. (2000). Fluoride in hair as an indicator of exposure to fluoride compounds. *Fluoride*, 33, 174-181.
- SWARUP, D. Y DWIVEDI, S.K. (2002). *Environmental pollution and effects of lead and fluoride on animal health*. Indian Council of Agricultural Research.
- VEGA G.S. (2002). *Riesgo Sanitario Ambiental por la presencia de arsénico y fluoruro en los acuíferos de México*. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- VENKATESWARLU, P. (1975). Determination of total fluorine in serum and other biological materials by oxygen bomb and reverse extraction techniques. *Anal Biochem*, 68, 512-521.

- WHITFORD, G.M., PASHLEY, D.H. Y STRINGER, G.I. (1976). Fluoride renal clearance: a pH-dependent event. *Am J Physiol*, 230, 527-532.
- WHO. (2002). *Fluorides. Environmental Health Criteria 227*. World Health Organization.



*Agua, ciudad y territorio*

Se terminó de editar y digitalizar en agosto de 2021

El diseño, la corrección ortotipográfica  
y la conversión digital  
estuvieron a cargo de

**typotaller**

Barra de Navidad 76

Guadalajara, México

*typotaller.com*

*typotaller@gmail.com*